



**Universidad Autónoma de Querétaro**  
**Facultad de Ingeniería**

Monitoreo de vibraciones en tiempo real para detectar  
daños en estructuras

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Doctor en Ingeniería

Presenta

M. en I. Juan Pablo Amézquita Sánchez

Dirigido por:

Dr. Aurelio Domínguez González

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

San Juan del Rio, Qro. Noviembre 2012.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Doctorado en Ingeniería

Monitoreo de vibraciones en tiempo real para detectar daños en estructuras

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el de  
Doctor en Ingeniería

**Presenta:**

M. en I. Juan Pablo Amézquita Sánchez

**Dirigido por:**

Dr. Aurelio Domínguez González  
Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

**SINODALES**

Dr. Aurelio Domínguez González  
Presidente



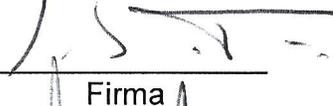
Firma

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos  
Secretario



Firma

Dr. René de Jesús Romero Troncoso  
Vocal



Firma

Dr. Arturo García Pérez  
Suplente



Firma

Dr. Ramin Sedaghati  
Suplente

Ramin Sedaghati  
Firma



Dr. Aurelio Domínguez González  
Director de la Facultad



Dr. Irineo Torres Pacheco  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Diciembre 2012  
México

## RESUMEN

En la actualidad, 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. Las estructuras civiles frecuentemente sufren de daños a lo largo de su vida de servicio. Estos daños se debe a diversos factores tales como: corrosión, acumulación de cracks, degradación de las columnas y vigas y el impacto de objetos extraños. En este trabajo se propone una metodología para monitorear la condición de una estructura del tipo truss con el fin de detectar daños, su localización y la severidad de la misma, la cual esta basa en el análisis de la vibración producida por un shaker electrodinámico. Finalmente, con los resultados obtenidos se pudieron publicar 2 artículos en revistas indizadas y 1 artículo en un congreso internacional.

**(Palabras claves:** Estructura tridimensional Truss, vibraciones, frecuencias naturales, procesamiento de señales, MUSIC).

## SUMMARY

Nowadays, structural health monitoring (SHM) has become a relevant topic that is attracting increasing interest from researchers and government agencies concerned with maintenance and safety of different kinds of structures such as buildings, bridges and truss-type structures, in order to permit their further operational utilization or to impose their repair or retirement. Civil structures often suffer damages during their service life. These damages are mainly due to several causes such as: excessive movements; corrosion; high temperature; cumulative crack growth; degradation of columns, joints, and beams; and impact by a foreign object. This work proposes a methodology for monitoring the assessment of a truss-type structure, in order to detect, to locate, and to quantify the severity of the damages into the structure. The methodology is based on the vibration signature analysis produced by the excitation of an electrodynamic shaker. Finally, with the obtained results two articles were published in indexed journals and one article was presented in an international congress.

**(Keywords:** Truss-type structure, vibrations, natural frequencies, signal processing, MUSIC).

## **DEDICATORIA**

A mi Esposa, mis Padres, mis Hermanas y a mi Sobrina.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por darme la vida y permitirme terminar mis estudios de maestría.

A mi esposa Silvia, por apoyarme en todo momento y por haberme dado la fuerza para continuar en los momentos difíciles.

A mis padres y a mis hermanas, por siempre darme su apoyo incondicional y por creer en mí en esta etapa de mi vida.

A mis asesores y colaboradores Dr. Aurelio Domínguez González, Dr. René de J. Romero Troncoso, Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos y Dr. Arturo García Pérez, por la confianza que siempre me han dado, por guiarme en el camino de la investigación y por la formación académica y profesional que me han brindado.

A todos mis compañeros y amigos, en especial del grupo HSPdigital, Gallo, Carlitos, Martin, Rooney, Chuco, Pachon, David, Amando, Pacheco, Benigno por todas las aventuras vividas.

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca (213849) para realizar mis estudios doctorales en la Universidad Autónoma de Querétaro.*

A Rosy y Male por siempre facilitarnos los trámites y por brindarme una sonrisa todos los días.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	2
1.1.1. Monitoreo Estructural	2
1.1.2. Técnicas para generación de señales	3
1.1.3. Procesamiento de señales en FPGAs	4
1.2. Justificación	6
1.3. Hipótesis y Objetivos	7
1.4. Descripción del problema	8
1.5. Planteamiento general	9
<b>2. REVISION DE LA LITERATURA</b>	<b>11</b>
2.1 Estructuras civiles	11
2.1.1 Estructuras de barras articuladas	11
2.1.2 Modelo matemático de las estructuras	13
2.1.2.1 Frecuencia natural	13
2.1.2.2 Frecuencia de resonancia	14
2.1.2.3 Factor de amortiguamiento	15
2.2 Monitoreo de la integridad estructural	16
2.3 Métodos de detección de fallas en estructuras	16
2.3.1 Métodos clásicos	17
2.3.2 Métodos dinámicos	18
2.4 Técnicas de procesamiento de señales	18
2.4.1 Transformada rápida de Fourier (FFT)	19
2.4.2 Transformada corta de Fourier (STFT)	20
2.4.3 Transformada Wavelet	21
2.4.4 Transformada Wavelet Packet	23
2.4.5 Clasificación de múltiples señales (MUSIC)	24
2.4.6 Redes Neuronales	26
2.4.6.1 Elementos de una neurona artificial	27
2.4.6.2 Topología	30

	2.4.6.3	Tipos de aprendizaje	34
	2.4.6.4	Pasos para crear una red neuronal	37
	2.4.6.5	Diseño del conjunto de datos de entrenamiento y validación	37
	2.5	Sintetizador digital de formas de onda	38
	2.5.1	Ventajas de los sintetizadores digitales de forma de onda	41
3		<b>METODOLOGÍA</b>	43
	3.1	Interfaz gráfica	44
	3.2	Sintetizador digital de formas de onda	48
	3.2.1	Interfaz USB, memoria dinámica y acumulador de fase	49
	3.2.2	Convertidores digital-analógicos de alta velocidad	50
	3.2.2.1	Convertidor DAC2904	51
	3.2.3	Acondicionamiento de la señal	53
	3.3	Actuador primario	54
	3.3.1	Amplificador lineal	54
	3.3.2	Shaker electrodinámico	55
	3.4	Estructura tridimensional de barras	56
	3.4.1	Descripción de los componentes de la estructura	57
	3.5	Sistema de instrumentación	58
	3.5.1	Acelerómetro Tri-axial	59
	3.5.2	Convertidor analógico digital	60
	3.5.3	Transmisor	61
	3.5.4	Sistema de adquisición de datos	61
	3.5.5	Ubicación de los sensores	62
	3.6	Metodología para el análisis de fallas en la estructura	64
	3.6.1	Indicador de daño	65
	3.6.2	Diseño y entrenamiento de la red neuronal	67
	3.6.3	Proceso MUSIC-ANN	69
4		<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	71
	4.1	Desarrollo tecnológico	71
	4.1.1	Tarjeta para generar señales basada en FPGA	71
	4.1.2	Descripción del sistema de excitación	72
	4.1.3	Casos de estudio	72
	4.1.4	Resultados	73
	4.1.4.1	Terremotos	73
	4.1.4.2	Vibración ambiental	74
	4.1.4.3	Señal sintética	75
	4.1.4.4	Discusión	75
	4.2	Desarrollo científico	76
	4.2.1	Descripción de la experimentación	76

4.2.2	Casos de estudio	78
4.2.3	Resultados	79
4.2.4	Discusión	80
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>82</b>
	<b>REFERENCIAS</b>	<b>84</b>
	<b>ANEXO A. ARTICULOS INTERNACIONALES PUBLICADOS</b>	<b>90</b>
A.1	Vibration control on smart civil structures: a review	91
A.2	Hardware-software system for simulating and analyzing earthquakes applied to civil structures	105
	<b>ANEXO B. ARTICULOS PUBLICADOS EN CONGRESO INTERNACIONAL</b>	
B.1	Monitoreo estructural basado en vibraciones para detectar daños en estructuras del tipo Truss	119

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1.1. Planteamiento general.	10
2.1. (a) Estructura de barras articuladas, (b) Montaje del elemento barra.	12
2.2. Sistema masa, resorte y amortiguador.	14
2.3. Método gráfico para la medición del amortiguamiento.	15
2.4. Algoritmo de Mallar (DWT).	22
2.5. Algoritmo de Mallar (IDWT).	23
2.6. Neurona artificial.	27
2.7. Red monocapa.	32
2.8. Red multicapa.	33
2.9. Aprendizaje supervisado.	35
2.10. Aprendizaje no supervisado.	36
2.11. Acumulador de fase.	40
2.12. Forma de onda de la señal Q del acumulador de fase.	40
2.13. Sintetizador digital de formas de onda arbitrarias.	41
3.1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.	43
3.2. Interfaz gráfica.	44
3.3. Modulo simulador.	47
3.4. Modulo analizador.	48
3.5. Sintetizador digital de formas de onda.	49
3.6. Diagrama a bloques.	50
3.7. Vista superior del convertidor DAC2904 con sus respectivas terminales	52
3.8. Diagrama de tiempo del DAC2904.	53
3.9. Acondicionamiento de la señal.	53
3.10. Amplificador lineal PA-141.	54
3.11. Shaker electrodinámico ET-127.	55
3.12. Estructura de barras articuladas.	56
3.13. (a) Nudo, (b) Barra, (c) Esparrago, (d) Tuerca.	58
3.14. Sistema de instrumentación.	59
3.15. Acelerómetro triaxial.	60
3.16. Tarjeta de vibraciones. (a) Vista superior, (b) Vista inferior.	61
3.17. Sistema de adquisición de datos (SAD).	62
3.18. Ubicación de los sensores en la estructura Truss.	63
3.19. Comportamiento de la señal de vibración en la estructura.	63
3.20. Pseudo-espectro de ambas señales.	67
3.21. Funciones Gaussianas del valor del indicar de daño del sensor-1.	69
3.22. Proceso MUSIC-ANN.	70
4.1. Tarjeta sintetizadora digital de formas de onda.	71

4.2. Puesta de experimento.	72
4.3. Terremoto de México 1985.	74
4.4. Vibración ambiental.	74
4.5. Señal sintética.	75
4.6. Puesta de experimento. a) Estructura bajo estudio, b) Sistema completo, c) Acelerómetro, d) Sintetizador digital de formas de onda y sistema de adquisición de datos.	77
4.7. Localización de los daños aplicados en la estructura.	78
4.8. Daños bajo estudio. a) Corrosión externa, b) Corrosión interna, c) Cracks.	79

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Características de algunos convertidores digital-analógicos.	50
2. Descripción del material utilizado en la estructura.	58
3. Error de la señal reproducida.	76
4. Eficiencia de la metodología propuesta para identificar la condición de la estructura, cuantificar la severidad del daño y localizar el daño.	80

# 1. INTRODUCCIÓN

Con el incremento de nuevas infraestructuras civiles en todo el mundo y la creación de nuevos equipos de sensado, el desarrollo de un sistema de identificación de daños que pueda extraer información cuantitativa y pueda proveer el desempeño de la estructura se ha convertido en un tema prioritario de investigación. Monitoreo de la integridad estructural (*Structural Health Monitoring*) es un tema relevante para ingeniería civil, ingeniería aeroespacial, ingeniería mecánica, entre otras, ya que permite seguir el comportamiento de un determinado sistema estructural detalladamente. El monitoreo de la integridad estructural consiste en la implementación de un sistema para identificar daños, el cual envuelve monitoreo, procesamiento de datos, y su interpretación para evaluar la condición de una estructura, con el fin de detectar daños en su estado inicial y tomar la decisión del correspondiente mantenimiento, para prevenir la caída o colapso de la estructura, evitando pérdidas humanas y económicas.

En este trabajo se propone una metodología basada en el monitoreo de las vibraciones para evaluar el desempeño de una estructura ante diferentes condiciones de falla. Este trabajo tiene como base principal el procesamiento digital de señales (*Digital Signal Processing, DSP*), donde se proponen diferentes técnicas de análisis que permiten la extracción de la información deseada, a partir de las señales de acelerómetros, teniendo como resultado final un sistema de monitoreo aplicado a una estructura tridimensional del tipo truss.

En el capítulo 1 se presenta una descripción del problema y los esfuerzos que se han hecho para resolverlo. Además, se plantean los objetivos del trabajo y se plantea a grandes rasgos la forma de enfrentar el problema. El capítulo 2 se realiza una revisión de la literatura, estableciendo las bases matemáticas para resolver el problema propuesto. En el capítulo 3 se presenta la metodología seguida para la realización de la investigación. En el capítulo 4 se muestran los resultados y en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

## **1.1 Antecedentes**

Actualmente, 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 civiles, por ello después de una revisión bibliográfica la siguiente investigación se clasifica en tres secciones: en la primera sección se analizan técnicas para el monitoreo de estructuras, como segunda sección se analizan diversas técnicas para la generación de señales, como tercera sección trabajos de procesamiento digital relacionados con FPGA (Field Programmable Gate Arrays - Arreglo Programable de Compuertas en Campo) que han sido desarrollados en México y en especial dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro.

### **1.1.1 Monitoreo Estructural**

En la actualidad, varios métodos clásicos y dinámicos han sido propuestos para el monitoreo de daños en estructuras. Los métodos clásicos consisten en procedimientos visuales o experimentales tales como ultrasonido, el cual ha sido empleado para detectar corrosión en placas de aluminio (Tuzzeo y di Scalea, 2002), corrientes Eddy para detectar crack en placas (Banks et al., 2002), radiografías para detectar fatiga en el concreto (Vossoughi et al., 2007), emisión acústica, la cual ha sido empleada para detectar fallas en vigas metálicas (Li et al., 2011), y procesamiento de imagen con el fin de detectar cracks en superficies de concreto (Takafumi et al., 2012). Sin embargo, los métodos mencionados presentan diversas desventajas, por ejemplo, todas estas técnicas requieren que la localización del daño sea conocida, y que la estructura a ser inspeccionada tenga un fácil acceso (Curadelli et al., 2008). Estas limitaciones han conducido al desarrollo de técnicas globales de monitoreo basadas en el cambio de la vibración en la estructura, las cuales han sido llamadas métodos dinámicos. Estos

métodos están basados en los cambios de vibración de la estructura, debido a que la medición de la vibración es suficientemente sensible para detectar daños, inclusive cuando los daños están localizados en áreas internas o escondidas de la estructura. La idea básica del monitoreo estructural basado en vibraciones es que las modificaciones en las características estructurales debido a una falla afecta a la respuesta vibratoria de la estructura (Talebinejad et al., 2011).

En los años recientes, diferentes trabajos relacionados con el monitoreo de estructuras basados en vibración han sido propuestos. Por ejemplo, Jian et al. (2005) propuso la detección de crack en un edificio escalado, para obtener información del estado de la estructura, esta estructura fue excitada por medio de un mazo, la vibración obtenida fue analizada por medio de la transformada wavelet fusionada con una red neuronal. Mehrjoo et al. (2008) propusieron una red neuronal para poder detectar las fallas en las uniones de puentes del tipo Truss. Taha (2010) empleo la transformada wavelet para descomponer la vibración adquirida por un edificio y los datos se combinaron con una red neuronal para detectar daños causados por falta de elementos. Gonzalez-Perez et al. (2011) presentaron el uso de redes neuronales para detectar daños en vigas de puentes vehiculares, con la finalidad de entrenar la red neuronal un modelo de elemento finito del puente fue creado, donde los parámetros utilizado para entrenar la red neuronal fueron los modos forma del puente cuando presenta un daño o con daño.

### 1.1.2 Técnicas para generación de señales

La generación de ondas sintéticas es una herramienta de gran utilidad para la excitación de sistemas mecánicos tales como estructuras civiles. Al respecto se han propuesto técnicas de síntesis digital directa (DDS) como en la contribución de Ibrahim (2001) donde se presenta un diseño para generar señales seno y coseno en base a una tabla de búsqueda (LUT) que propone particionar las direcciones de los registros en tres y dividir el tamaño de las LUT en cinco pequeñas tablas para mantener baja la contaminación espectral. Strollo and Caro

(2002) presentaron un diseño de un sintetizador digital de onda basado en la expansión polinomial Chebyshev de primer orden para generar señales seno y coseno, con esta propuesta consiguen una pureza espectral de 80 db. Wen et al. (2004) presentaron una nueva arquitectura para el diseño de sintetizadores digitales basada en mínimos cuadrados que genera señales seno y coseno que son comparadas con series de Taylor a fin de encontrar un polinomio de grado menor que pueda ser implementado en un chip TSMC 0.25 *um* 1P5M tecnología CMOS en forma pipeline. Con esta técnica se consigue una pureza espectral de 100 db. Harris (2007) presentó un diseño de un sintetizador digital de onda que combina la arquitectura de un oscilador acoplado con la de un CORDIC, posteriormente realizan un control automático de ganancia para mejorar la fase consiguiendo generar señales seno y coseno de cualquier ángulo, lo que permite conseguir una pureza espectral de 150 db.

### 1.1.3 Procesamiento de señales FPGAs.

En lo que concierne a la etapa de procesamiento emplear la tecnología FPGA es muy viable ya que son dispositivos de punta tecnológica que permiten realizar procesos de cómputo sofisticado, tales como el procesamiento de señales y procesamiento de imágenes, en tiempos muy cortos. En México, estos dispositivos no han pasado desapercibidos y han sido utilizados para diversas aplicaciones. Uno de los grupos principales en México en lo referente a la aplicación de tecnología FPGA en instrumentación y control es "HSPdigital", el cual es parte de la Universidad Autónoma de Querétaro. A continuación, se presentan algunos de los trabajos realizados en este grupo: Romero et al. (2004) desarrolló una metodología para la detección en línea de ruptura de herramientas en máquinas CNC (Control Numérico Computarizado), donde utilizan la fuerza de corte del movimiento de los ejes para obtener la transformada wavelet y utilizando un algoritmo de auto correlación se detecta la ruptura de la herramienta. Esta metodología se implementó en un FPGA utilizando técnicas de procesamiento de

señales en hardware. Osornio et al. (2008) desarrollaron un controlador proporcional integral derivativo (PID) aplicado a máquinas CNC de alta velocidad con el objetivo de cumplir los requerimientos en tiempo de actualización del lazo del servo. Osornio et al. (2009) implementaron en FPGA un generador de perfiles polinomiales de alto grado con limitaciones dinámicas de jerk para máquinas CNC y robótica con el objetivo de mejorar el maquinado. Proponen un algoritmo libre de multiplicadores computacionalmente eficiente para la evaluación de los polinomios. Rangel et al. (2009) presentaron una nueva metodología para la detección de media barra rota en motores de inducción tipo jaula de ardilla implementada en un FPGA, la cual correlaciona el espectro de la señal de corriente y vibraciones bajo condiciones de carga y sin carga para conocer el estado del motor.

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. Chávez (2010), realizó estudios de daños en estructura Truss tridimensional cuando es 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.

## 1.2 Justificación

Las estructuras civiles frecuentemente sufren de daños durante su vida de servicio. Estos daños son principalmente debido a varias causas tales como: movimientos excesivos, corrosión, alta temperaturas, acumulación de crecimiento de crack, degradación de columnas, uniones y vigas, y el impacto de objetos extraños (Umesha et al. 2009). La acumulación de estos daños puede provocar que la estructura sufra un debilitamiento, lo que puede inducir un daño irreparable y en un dado caso el colapso de la estructura, lo que puede desembocar en la pérdida de vidas humanas y económicas. Ante esta situación surge la necesidad por desarrollar métodos analíticos y experimentales que envuelvan el monitoreo, el procesamiento de datos, y su interpretación para evaluar el estado de la estructura, con el fin de detectar daños tempranamente y hacer el correspondiente mantenimiento. Por ello la primera justificación es que la investigación que se desarrollará aportará fundamentos para generar soluciones reales para el monitoreo y análisis de las vibraciones en las estructuras.

Otra justificación importante es que parte de la investigación se enfocará en el desarrollo de un sintetizador de ondas arbitrarias en tiempo real, robusto y económico capaz de conectarse con cualquier sistema de excitación. Debido a que los sintetizadores comerciales son muy caros (5000 dólares en adelante) y no son capaces de generar señales arbitrarias.

Por último la justificación y aportación más importante de esta investigación será el desarrollo de un sistema de monitoreo estructural en base a las señales de vibraciones, el cual se realizará mediante procesamiento digital de señales en hardware donde los algoritmos desarrollados serán implementados en un FPGA, ya que estos dispositivos permiten realizar diseños reconfigurables y procesamiento paralelo a velocidades muy altas, logrando así un monitoreo de la estructura en tiempo real. Con este trabajo se pretende aportar al plano científico el desarrollo de modelos matemáticos los cuales puedan culminar en algoritmos reconfigurables basados en procesamiento paralelo de arquitectura abierta que

permitan llevar a cabo el monitoreo del estado de la estructura. Al mismo tiempo la investigación será el primer antecedente dentro de la universidad del estudio de un sistema de monitoreo de vibraciones en estructuras, pues los trabajos hasta ahora realizados se han enfocado a máquinas herramienta, robots y motores de inducción. Lo anterior destaca la importancia del trabajo pues es una nueva línea de investigación en la Universidad, la cual tiene gran importancia e impacto en la industria de la región, el país y el mundo, lo que justifica su desarrollo. La justificación del uso de un FPGA es por el requerimiento de un dispositivo que permita realizar una implementación en tiempo real, además de ser un dispositivo de bajo costo que permite realizar diseños paralelos y alcanzando tiempos de procesamiento 10 veces más rápidos que un DSP (Procesador Digital de Señales) y 100 veces que una PC.

### **1.3 Hipótesis y objetivos**

**Hipótesis:** La detección de daños en estructuras puede ser lograda mediante el monitoreo, procesamiento y análisis digital de señales de vibración.

**Objetivo general:** Desarrollar un sistema de monitoreo que mediante la adquisición y procesamiento de las señales de vibración permita detectar daños estructurales y su correspondiente ubicación.

#### **Objetivos particulares**

1. Desarrollar e implementar modelos matemáticos para la creación de un generador de ondas arbitrarias que sean precisos y permitan excitar de forma adecuada una estructura.
2. Implementar algoritmos para el procesamiento digital de señales, que sean eficientes y precisos, mediante métodos de diseño óptimos.

3. Proponer una metodología para el monitoreo y análisis de las múltiples entradas que permita conocer el estado de la estructura.
4. Desarrollar un producto, económico, robusto y competitivo con los analizadores y sintetizadores de onda existentes, mediante los modelos matemáticos e implementación digital, para responder a las necesidades de la industria.
5. Publicar 2 artículos en revistas internacionales indizadas basados en los resultados científicos y tecnológicos del trabajo para su difusión.
6. Colaborar con la formación de recursos humanos nacionales mediante la dirección de una tesis de licenciatura.

#### **1.4 Descripción del problema**

Dentro de las demandas requeridas por la ingeniería civil radica en el hecho de crear sistemas de monitoreo capaces de evaluar el estado de una estructura civil. Esto implica el poder detectar el tipo de daño que está presente en la estructura, su localización y la cuantificación la severidad del daño, con el fin de determinar las medidas necesarias para corregir el estado de la estructura. Este problema requiere de sistemas que cuenten con un procesador de alta capacidad, además del diseño e implementación de algoritmos eficientes y la ubicación óptima de los sensores que puedan proporcionar el monitoreo de algunos parámetros y en base a ello determinar la condición de la estructura. Uno de los problemas principales para poder extraer información de la estructura es la forma de excitar la estructura. Esto conlleva a la necesidad de desarrollar un generador de formas de onda arbitrarias en tiempo real para poder excitar las estructuras de una manera muy similar a las señales generadas tales como sismos, vibraciones ambientales, etc.

La razón principal para analizar y diagnosticar el estado de una estructura es determinar las medidas necesarias para corregir el estado de la estructura, lo que permitirá su operación o programar su reparación o retiro. De manera que, al

estudiar los datos, el interés principal deberá ser la identificación de un daño estructural. Por ello es necesario contar con un sistema independiente de la estructura el cual pueda ser reconfigurado para monitorear y analizar las características particulares de cada estructura. Los FPGAs cuentan con esta característica además de proporcionar un análisis en tiempo real de la señal con el beneficio extra del bajo costo.

El resolver el problema del monitoreo y análisis para la detección temprana de daños en las estructuras, beneficiaría la industria de la región en diferentes factores como ahorro de primas a expertos analizadores, así como el poder descifrar la ubicación de la falla y su severidad, permitiría reducir costos por mantenimiento correctivo ya que se pueden hacer predicciones con el análisis de las vibraciones y ahorro en la compra de analizadores espectrales, etc.

## **1.5 Planteamiento general**

El planteamiento general del proyecto se presenta a en la Figura 1.1.

El sistema está compuesto de 4 unidades principales:

- 1 El sistema de excitación.
- 2 Sensores.
- 3 Sistema de adquisición da datos.
- 4 PC.

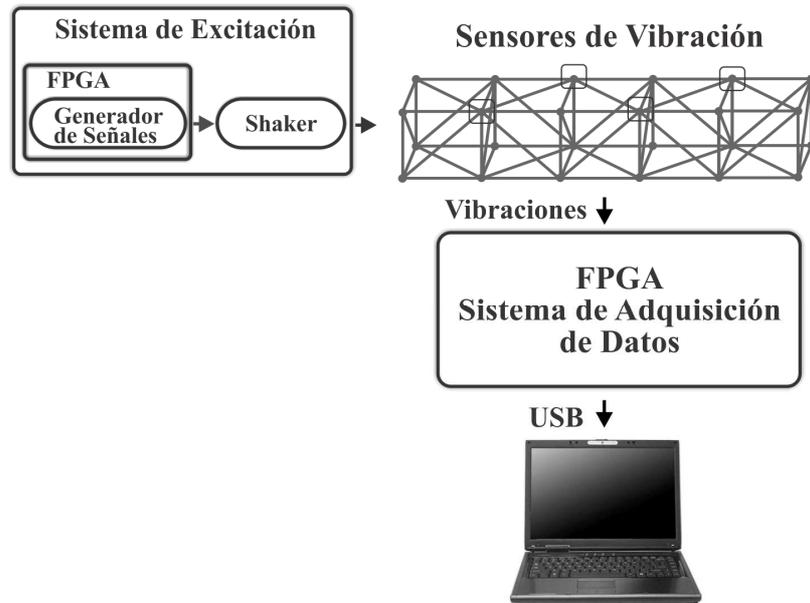


Figura 1.1. Planteamiento general.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo, el cual está basado en el análisis de las vibraciones para evaluar el desempeño de una estructura del tipo Truss ante diferentes condiciones de falla. El sistema mostrado en la Figura 1.1 cuenta con un sistema de de excitación basado en FPGA, el cual se encarga de generar la señal y enviarla a un shaker electrodinámico para excitar la estructura, al mismo tiempo sensores de aceleración monitorean la condición de la estructura. Posteriormente, un sistema de adquisición de 12 bits, el cual esta basado en FPGA, se encarga de adquirir la señal de vibración, acondicionarla y digitalizarla, para su posterior envío al FPGA (DAS). Los datos adquiridos por el DAS (*Data Acquisition System*) son 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 la condición de la estructura, localizar la falla y la severidad de la misma, a través de un análisis en frecuencia (análisis de la amplitud de las frecuencias naturales) empleando una técnica de alta resolución, multiple signal classification (MUSIC), y un algoritmo de inteligencia artificial (Redes neuronales).

## **2. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

En esta sección se presenta un panorama acerca de las técnicas de análisis que se han empleado para el monitoreo de estructuras y que establecen las bases para proponer y diseñar nuevas estrategias para la detección de fallas en un su estado inicial.

### **2.1 Estructuras civiles**

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 pueden llegar a producir daños en la estructura o bien, el colapso de la misma.

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.

#### **2.1.1 Estructuras de barras articuladas**

Las estructuras de barras articuladas son las más empleadas en el diseño de la infraestructura civil ya que son fáciles de ensamblar, existe un ahorro de material en comparación a otros diseños de estructuras, su rápida instalación, su peso ligero y permiten un espacio accesible para su mantenimiento. Por lo tanto, las estructuras de barras articuladas juegan un papel importante en la economía teniendo aplicaciones en el diseño de puentes, torres, grúas, techos, esqueletos de edificios, entre otras.

En arquitectura y en ingeniería estructural, una estructura de barras articuladas (Truss) es una estructura que comprende una o varias unidades triangulares construidas con elementos rectos cuyos extremos están conectados a las articulaciones llamadas nodos. Las fuerzas externas y reacciones a dichas fuerzas se considera que actúan solo en los nodos resultando en compresión o tensión en los miembros de la estructura.

La estructura empleada en este trabajo de tesis consta de cinco cubos hechos de aluminio, la cual esta empotrada en una pared de concreto. Cada cubo mide 0.707 de lado de manera que las barras diagonales son de 1 m de longitud. Los nodos tienen una masa de 0.2Kg, miden 0.055m de lado y están conectados por medio de un tornillo con las barras. Los elementos que conforman la estructura se diseñan a partir de estas dimensiones y a la topología mostrada en la Figura 2.1(a). La Figura 2.1(b) muestra el ensamble de la barra con el nodo.

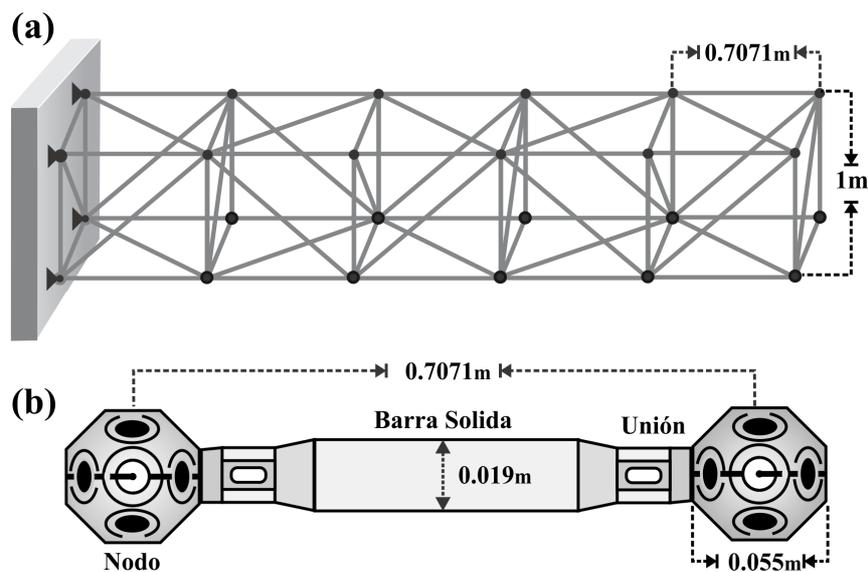


Figura 2.1. (a) Estructura de barras articuladas. (b) Montaje del elemento barra.

## 2.1.2 Modelo matemático de las estructuras

Las estructuras civiles son modeladas por la ecuación general de movimiento, 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

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (1)$$

donde  $M$ ,  $C$  y  $K$  son matrices de tamaño  $n \times n$  que representan la masa, amortiguamiento y rigidez del sistema respectivamente.  $\ddot{x}(t)$ ,  $\dot{x}(t)$ ,  $x(t)$  y  $f(t)$  son matrices columna de tamaño  $n$  que corresponden a la aceleración, velocidad, posición y la fuerza aplicada respectivamente. Las estructuras del tipo truss envuelven algunas conexiones mecánicas, las cuales afecta el comportamiento de la vibración de la estructura. Por lo tanto, un modelo exacto que describa el comportamiento de los elementos barra y los elementos de conexión es necesario. Para ello, en la tesis de maestría de Chávez (2010) se propuso un modelo de elemento finito que describe con precisión el comportamiento de la estructura truss empleada en esta tesis y el cual es base para este trabajo.

### 2.1.2.1 Frecuencia natural

La frecuencia natural se conoce como la frecuencia principal a la 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 2.2. 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.

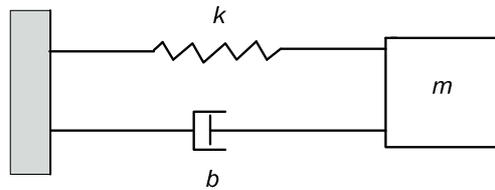


Figura. 2.2. Sistema masa, resorte y amortiguador.

Las frecuencias naturales de una estructura se calculan por medio de la raíz cuadrada de los eigenvalores de la matriz de rigidez  $K$  multiplicada por el inverso de la matriz de masa  $M$ , lo cual es descrito por la Ecuación 2.

$$\omega_n = \sqrt{KM^{-1}} \quad (2)$$

Por lo tanto si la masa o la rigidez cambian la frecuencia natural del sistema estructural cambiara.

### 2.1.2.2 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 esta denotada por la Ecuación 3.

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

donde  $\omega_n$  es la frecuencia natural del sistema y  $\zeta$  es el factor de amortiguamiento.

### 2.1.2.3 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 2.3, el factor de amortiguamiento se ve representado por la Ecuación 4.

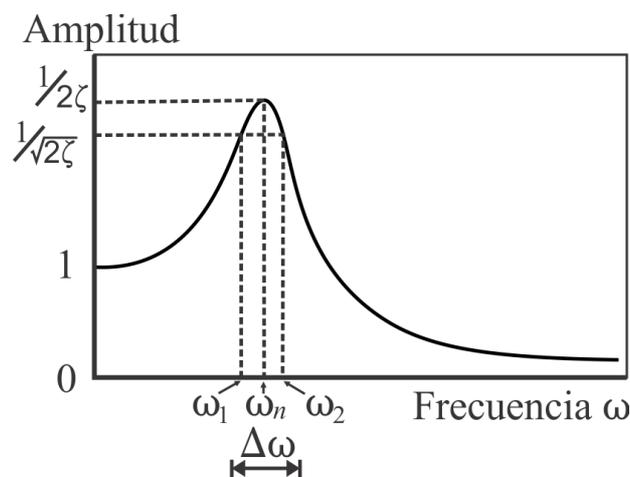


Figura 2.3. Método gráfico para la medición del amortiguamiento.

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

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  $\zeta = 0$  el sistema incrementa su amplitud infinitamente debido a que la frecuencia de resonancia y la frecuencia natural son iguales  $\omega_r = \omega_n$ .

## **2.2 Monitoreo de la integridad estructural**

Monitoreo de la integridad estructural “Structural health monitoring” 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 de barras articuladas, etc., con el fin de permitir su operación o programar su reparación o retiro (Doebbling et al., 1998). El monitoreo de la salud 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).

## **2.3 Métodos de detección de fallas en estructuras**

Durante los últimos 30 años se han propuesto diversos métodos clásicos y dinámicos para evaluar el daño estructural. A continuación se describen.

### 2.3.1 Métodos clásicos

Los métodos clásicos o también llamados técnicas no destructivas consisten en procedimientos visuales o experimentales, tales como:

1. Inspección visual. Este tipo de métodos incluyen algunas variantes de niveles de especialización que van desde una evaluación óptica a simple vista hasta 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. Emisión ultrasónica. 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.
3. 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.
4. 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.

Sin embargo, los métodos mencionados requieren que la localización del daño sea conocida y que la estructura al ser inspeccionada tenga un fácil acceso. Estas limitaciones han conducido al desarrollo de nuevas técnicas globales de monitoreo que puedan aplicarse en sistemas estructurales mientras estos se hallen en servicio.

### **2.3.2 Métodos dinámicos**

Los métodos dinámicos están basados en los cambios de vibración de la estructura, ya que la medición de la vibración es suficientemente sensible para detectar daños, inclusive cuando los daños están localizados en áreas internas o escondidas de la estructura. La idea básica del monitoreo estructural basado en vibraciones es que las modificaciones en las características estructurales debido a una falla afecta a la respuesta vibratoria de la estructura afectando sus parámetros modales tales como frecuencias naturales, factor de amortiguamiento, modos forma, entre otros (Talebinejad et al., 2011).

Para este trabajo de tesis se optó por el análisis del parámetro modal frecuencias naturales, las cuales permite el monitoreo global de una estructura.

## **2.4 Técnicas de procesamiento de señales**

Los continuos avances en el monitoreo de estructuras ha llevado al empleo de diversas técnicas de procesamiento de señales basada en el análisis de la vibración con el objetivo de detectar, localizar y cuantificar la severidad de los daños en las estructuras. Las más empleadas se describen a continuación.

### 2.4.1 Transformada rápida de Fourier (FFT)

Dado que dentro de la literatura la FFT (*Transformada Rápida de Fourier*) es considerada una de las mejores herramientas para análisis de señales estacionaras discretas, la FFT es ampliamente aplicada para la obtención de las frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y en ciertos casos para la detección de fallas en estructuras civiles (Proakis, 2006).

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 5.

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

donde el kernel de transformación  $W_N^{nk}$  está definido por la Ecuación 6.

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

De la Ecuación 6, los componentes reales  $W_N^{nk}$  son conocidos como los componentes en fase  $I_F$  de  $W_N^{nk}$  y los componentes imaginarios son conocidos como la cuadratura de los componentes  $Q_F$  de  $W_N^{nk}$ . La FFT consiste en la descomposición de  $N$  puntos de la DFT sucesivamente en pequeñas DFTs a fin de aprovechar la simetría y la periodicidad del factor fase.

A pesar de los resultados empleando la FFT, Tang et al. 2011 mencionan que la FFT presenta demasiadas desventajas para extraer la dinámica de una estructura o su aplicación en el estudio de las estructuras, ya que las señales

analizadas no son lineales y no estacionarias, por lo tanto no pueden ser analizadas por la FFT adecuadamente.

### 2.4.2 Transformada corta de Fourier (STFT)

El análisis espectral utilizando la transformada de Fourier es adecuado para analizar vibraciones en el estado estable. Esto indica que efectos transitorios de vibración son promediados en el periodo de análisis, perdiéndose información sobre la naturaleza o forma de estas variaciones. Por tanto existe la necesidad de un análisis que describa de mejor forma las señales transitorias. Esto se consigue con la transformada corta de Fourier (STFT).

STFT es una técnica capaz de analizar señales no estacionarias. La idea básica de la STFT es aplicar la FFT consecutivamente y en periodos cortos de tiempo.

STFT se define por la Ecuación 7, donde  $x(t)$  y  $h(t)$  son la señal a analizar y la función ventana, respectivamente, con respecto al tiempo  $\tau$ .

$$A_t(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)h(t - \tau)e^{-j\omega\tau} dt \quad (7)$$

A pesar de las mejoras que se presenta en la STFT, Amezcuita-Sanchez *et al.*, 2010 mencionan que esta técnica requiere tener una ventana grande, donde las señales transitorias no son claramente apreciadas, o ventanas pequeñas con resolución pobre en frecuencia, lo cual no permite observar las frecuencias del sistema de una manera adecuada.

### 2.4.3 Transformada wavelet

La transformada continua wavelet (CWT) es considerada una de las mejores herramientas para el análisis de señales no estacionarias. La transformada wavelet ha sido empleada para la detección de las frecuencias naturales y detección de fallas en estructuras civiles (Yan y Miyamoto, 2006; Xiang y Liang, 2012) ya que esta herramienta puede descomponer a la señal en múltiples frecuencias, hecho conocido como multi-resolución. Entre sus principales ventajas la transformada wavelet es local en tiempo, real, ortogonal, ortonormal y compacta.

La transformada continua wavelet (CWT) es mostrada en la Ecuación 8 como la convolución  $x(t)$  con una función conocida como wavelet madre  $\psi(t)$ .

$$CWT_{f(t)}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (8)$$

donde  $x(t)$  es la señal a analizar,  $a$  es el factor de escalamiento o (dilatación) que representa la frecuencia y  $b$  es el parámetro que representa la posición en tiempo. El factor de escalamiento siempre es  $a$  mayor que cero, y la función es dilatada cuando  $a > 1$  y son contraídas cuando  $a < 1$ . Para obtener la transformada discreta wavelet (DWT) es necesario el parámetro de tiempo  $t$  correspondiente al número de muestras  $n$ , el parámetro de dilatación es definido por  $a = 2^j$  y el de translación será  $b = k2^j$ . Una vez definidos estos parámetros donde  $j \in N$  y  $k \in Z$  la Ecuación continua 8 es convertida en su versión discreta (DWT) como en la Ecuación. 9.

$$DWT(j, k) = \sum_N x(n) h_j(n - 2^j k) \quad (9)$$

La transformada discreta wavelet (DWT) es construida por un banco de filtro pasa-alto y pasa-bajo, conocido como el algoritmo de Mallat, como se muestra en la Figura 2.4.

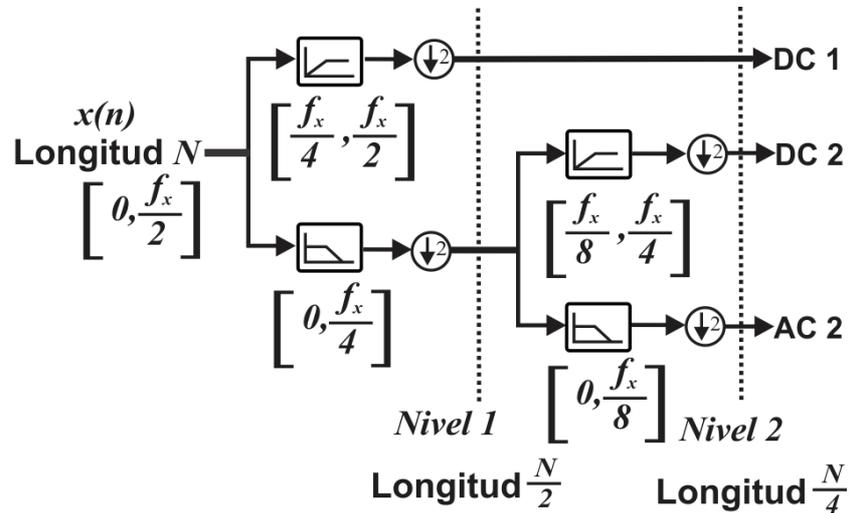


Figura. 2.4. Algoritmo de Mallat (DWT).

De acuerdo al algoritmo de Mallat a la convolución de la señal  $x(n)$  con el filtro pasa-baja se le conoce como aproximación del nivel L ( $AC_L$ ) y a la convolución de la señal  $x(n)$  con el filtro pasa-altas se le conoce como detalle del nivel L ( $DC_L$ ). El primer nivel de descomposición de  $x(n)$  se le conoce como nivel 1 y está compuesto por el  $DC_1$  correspondiente a las componentes de alta frecuencia de la señal  $x(n)$  y  $AC_1$  que corresponde a las componentes de baja frecuencia de la señal  $x(n)$ , el proceso de descomposición continua ahora con  $AC_1$  de la cual se obtiene el nivel 2 y está formado por  $DC_2$  correspondiente a las componentes de las altas frecuencias de  $AC_1$  y  $AC_2$  correspondiente a las componentes de baja frecuencia de  $AC_1$  y este procedimiento se repite hasta obtener el nivel  $L$  de descomposición deseado. De acuerdo a las propiedades de bancos de filtros de la DWT. Los niveles de descomposición están limitados por el número de muestras  $n$  de la señal a descomponer ya que cada nivel es diezmado con respectó a la señal de entrada. Una vez hecha la descomposición de la señal

$x(n)$  en los  $L$  niveles, la reconstrucción de la señal se realiza de manera inversa (IDWT) al algoritmo de descomposición (DWT) como se observa en la Figura 2.5.

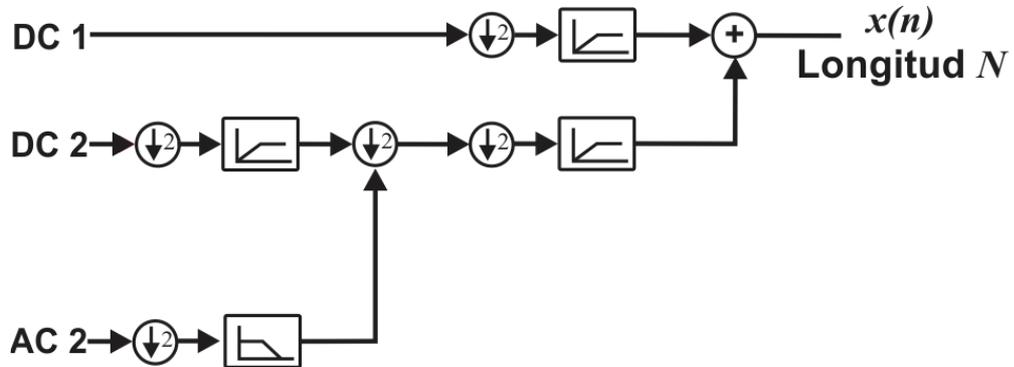


Figura. 2.5. Algoritmo de Mallat (IDWT).

Por lo tanto, de acuerdo a las propiedades de bancos de filtros de la DWT, la banda de frecuencia de una aproximación  $AC_L$  y de un detalle  $DC_L$  está determinada por la Ecuación 10 y 11 respectivamente, donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo.

$$AC_L \Rightarrow \left[ 0, \frac{f_s}{2^{L+1}} \right] \quad (10)$$

$$DC_L \Rightarrow \left[ \frac{f_s}{2^{L+1}}, \frac{f_s}{2^L} \right] \quad (11)$$

#### 2.4.4 Transformada wavelet packet

La transformada wavelet packet (WPT), como la transformada discreta wavelet (DWT), es una técnica que descompone una señal en componentes sucesivos de frecuencias bajas y altas repetidamente. Consecuentemente, en WPT, los coeficientes de las aproximaciones y detalles son descompuestos para crear un árbol de bandas de frecuencias. Por lo tanto, WPT puede proveer bandas

de frecuencia uniformes, a diferencia de la DWT donde solo los coeficientes de aproximación son descompuestos (Reda *et al.* 2006). WPT es definida por la Ecuación 12, donde  $j$  and  $k$  representan la escala y translación, respectivamente, y  $n$  representa la modulación u oscilación de los parámetros

$$W_{j,k}^n(t) = 2^{j/2} W^n(2^j t - k) \quad (12)$$

La WPT es obtenida a través de las siguientes ecuaciones recursivas (13) y (14), donde  $h(k)$ ,  $g(k)$  y  $W^n$  son los coeficientes de los filtros pasa-bajas, pasa-altas asociados con la función escala y la wavelet madre, respectivamente.

$$W^{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) W^n(2t - k) \quad (13)$$

$$W^{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) W^n(2t - k) \quad (14)$$

Zang *et al.* 2004 y Adewuyi y Wu, 2011 mencionaron que la transformada wavelet (DWT y WPT) han recibido mucha atención ya que estas son simple, rápidas y no son caras para implementar. Sin embargo, estos algoritmos presentan varias desventajas tales como: no pueden proporcionar la precisión y la fiabilidad necesaria para estructuras a gran escala debido a su comportamiento complicado, la diversidad de las propiedades de los materiales, y susceptibilidad a ruido de las mediciones de la respuesta estructural, además tiene la necesidad de un conjunto de datos de muestra grandes, y es necesario mucho procesamiento.

#### 2.4.5 Clasificación de múltiples señales (MUSIC)

A pesar de los resultados que se han obtenido con las técnicas antes mencionadas, sería deseable contar con un algoritmo con la habilidad de monitorear la dinámica de una estructura con gran precisión, inmune al ruido, sin la necesidad de mucho procesamiento ni muchos datos y que permita crear una

metodología para identificar, localizar y cuantificar la severidad de daños en la estructura en un procedimiento automático. Una técnica prometedora en el monitoreo de estructura basado en vibraciones es el algoritmo clasificación múltiple de señales (MUSIC), el cual fue introducido por Jiang y Adeli en 2007 para el monitoreo de estructuras civiles. Esta técnica presenta grandes ventajas en comparación a las técnicas antes mencionadas, ya que produce una estimación espectral de alta resolución, inclusive para datos que están embebidos en mucho ruido, y la técnica tiene una mayor defectibilidad en comparación a la FFT convencional, lo cual son factores importantes en este trabajo de tesis. Por lo tanto, la técnica propuesta puede ser una herramienta muy eficiente para el monitoreo de las estructura en tiempo real.

Los métodos sub-espacio son conocidos como métodos de alta resolución, los cuales pueden detectar frecuencias inclusive en señales envueltas en mucho ruido (Garcia-Perez *et al.* 2011). Los métodos sub-espacio asumen que la señal discreta en tiempo  $x[n]$  puede ser representada por  $m$  señales sinusoidales complejas en ruido  $e[n]$  como lo describe la Ecuación 15.

$$x[n] = \sum_{i=1}^m \overline{B}_i e^{j2\pi f_i n} + e[n], \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (15)$$

con

$$\overline{B}_i = |B_i| e^{j\phi_i} \quad (16)$$

donde  $N$  es el número de datos de la muestra,  $B_i$  es la amplitud compleja de las  $i$ th señales sinusoidales complejas,  $f_i$  es su frecuencia, y  $e[n]$  es una secuencia de ruido blanco con media cero y varianza  $1 \sigma^2$ . Este método emplea la descomposición de los eigenvectores de  $x[n]$  para obtener dos sub-espacios

ortogonales. La matriz de auto-correlación  $R$  de la señal con ruido  $x[n]$  es la suma de la señal y matrices de auto-correlación del ruido ( $R_s$  y  $R_n$ , respectivamente).

$$R = R_s + R_n = \sum_{i=1}^p |B_i|^2 e(f_i) e^H(f_i) + \sigma_n^2 I \quad (17)$$

donde  $p$  es el número de frecuencias, el exponente  $H$  denota la traspuesta Hermitiana,  $I$  es la matriz identidad, y  $e^H(f_i)$  es la señal vector dado por la Ecuación 18.

$$e^H(f_i) = [1 \quad e^{-j2\pi f_i} \quad \dots \quad e^{-j2\pi f_i(N-1)}] \quad (18)$$

De la condición de ortogonalidad de ambos sub-espacios, el pseudospectrum MUSIC  $Q$  esta dado por la Ecuación 19.

$$Q^{MUSIC}(f) = \frac{1}{|e(f)^H v_{m+1}|^2} \quad (19)$$

donde  $v_{m+1}$  es el eigenvector ruido. Esta expresión muestra los picos que están a las frecuencias exactas de las principales componentes sinusoidales, donde  $e(f)^H v_{m+1} = 0$ .

#### 2.4.6 Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales, como su nombre lo indica, pretenden imitar en una pequeñísima escala la forma de funcionamiento del sistema nervioso central, específicamente las neuronas que forman el cerebro humano, las cuales son elementos individuales de procesamiento, estas neuronas pueden tener contacto con el ambiente por medio de los sentidos, pueden hacer conexiones con ellas

mismas, y también pueden actuar por medio de glándulas o impulsos nerviosos hacia el exterior. La información que viaja entre las neuronas, es modificada por las sinapsis, estas pueden ser excitadoras e inhibitoras, estas sinapsis dan el comportamiento de la red neuronal.

Las redes neuronales artificiales son el resultado de la investigación del procesamiento en paralelo, aplicadas en sus inicios al reconocimiento de patrones alcanzado en la actualidad una infinidad de aplicaciones por ejemplo el monitoreo de estructuras para la identificación, localización y cuantificación de daños en estructuras de una forma automática y en tiempo real.

#### 2.4.6.1 Elementos de una neurona artificial

Las redes neuronales son modelos basados en el cerebro humano, por lo tanto una adecuada elección de los elementos que componen este modelo ayudaran a obtener una mejor aproximación del modelo original, McCulloch y Pitts fueron los primeros en proponer un modelo de una neurona artificial, en la Figura 2.6 se muestra dicho modelo, la Ecuación 20 muestra la salida de la neurona.

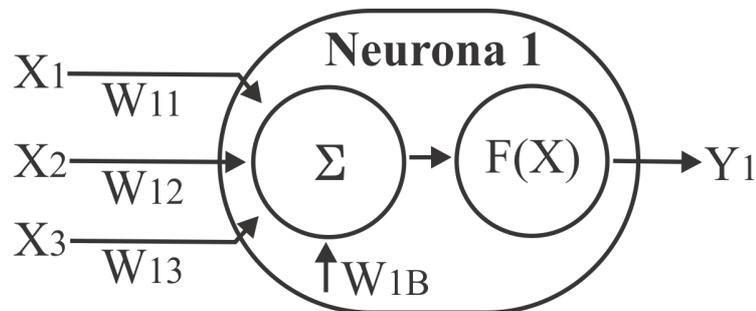


Figura 2.6. Neurona artificial.

$$y_1 = F(X_1 W_{11} + X_2 W_{12} + X_3 W_{13} + W_{1B}) \quad (20)$$

donde  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$  son las entradas,  $W_{11}$ ,  $W_{12}$ ,  $W_{13}$  y  $W_{1B}$  son los pesos o conexiones entre neuronas y  $F(X)$  es una función de activación como se describe a continuación.

La Ecuación 20 para un número de entradas  $n$  puede ser descrita como:

$$y_1 = F\left(\sum_{i=1}^n X_i W_{1i} + W_{1B}\right) \quad (21)$$

Esencialmente una red neuronal está constituida por 3 elementos:

- ❖ Unidades de proceso.
- ❖ Conexión entre neuronas.
- ❖ Tipos de función de activación

❖ Unidad de proceso.

La unidad de proceso, consiste en recibir las entradas del ambiente o de células vecinas, calcular su valor de salida y enviarlas a neuronas vecinas o reenviarlas al ambiente. En los modelos propuestos de las redes existen tres tipos de unidades de proceso: capa de entrada, capas ocultas y capa de salida. La capa de entrada recibe las señales del ambiente de algunos sensores. La capa de salida es la que envía las señales al ambiente para realizar alguna tarea. Las capas ocultas o intermedias son las que se encuentran en el interior de la red, su conexión es solo entre neuronas, no tienen contacto con el exterior.

❖ Conexión entre neuronas.

La conexión que une a las neuronas de una red neuronal tiene asociado un peso en el cual está almacenado el aprendizaje.

Una neurona recibe un conjunto de señales de sus neuronas vecinas las cuales le dan información del estado en que se encuentran las neuronas con las que se está conectada. Cada conexión tiene un peso el cual puede ser positivo o negativo. Así como en el cerebro existen conexiones excitadoras y conexiones inhibitoras, los pesos positivos corresponden a una excitación y los pesos

negativos a una inhibición, por lo tanto, un peso igual a cero significa que no hay conexión entre ellas.

La regla de propagación nos dice que el procedimiento a seguir para combinar los valores de entrada con los pesos de la conexión: se considera que el efecto de cada señal es aditivo, de tal forma que la entrada total o neta recibe la neurona es la suma del producto de cada señal individual por el peso que conecta ambas neuronas.

❖ Tipos de función de activación.

Así como es necesario una regla que combine las entradas con los pesos de las conexiones, es necesario también que exista una regla para evaluar la entrada global de la neurona para determinar el estado en el que se encontrara la neurona para determinar un nuevo estado de activación.

Cualquier función definida en un intervalo de posibles valores de entradas, un incremento monotonico, y que tengan un límite superior y un límite inferior, podrán realizar la función de activación de forma satisfactoria. Al principio se empezaron a utilizar funciones sencillas de manejar como la función escalón en la cual solamente se utiliza cuando la salida de la red es binaria (dos posibles valores). Las funciones sigmoidales son las más apropiadas cuando se procesa información analógica la cual toma infinidad de valores dentro de un rango dado.

1. Función escalón: Una de las formas más fáciles de definir una función de activación de una neurona es considerar que es binaria. En la función escalón es para las neuronas binarias para la cual la suma de las entradas puede ser mayor o menor a un umbral, si es mayor al umbral toma el valor de 1 y si es menor al umbral toma el valor de 0 o en otros casos 1. Este tipo de redes son sencillas para poder ser implementadas en hardware pero sus capacidades se reducen demasiado debido a que sus resultados solo pueden ser binarios.

2. Función lineal: en esta función, si la suma de sus entradas es menor a un límite inferior, toma el valor de 0 o 1. Cuando la suma de sus entradas es mayor a un límite superior, toma el valor de 1. Si la suma de las entradas está comprendida entre los límites inferior y superior, entonces la función se define como una función lineal.
3. Funciones Sigmoidales: con la función sigmoideal o tangente hiperbólica, para la mayoría de los estímulos de entrada, el valor entregado por la función son cercanos a los valores asintóticos. Con esto la mayoría de los valores quedan cercanos a la parte alta o baja de la función sigmoideal. Por lo que esta función es tan importante, se debe a que su derivada es siempre positiva, es decir que siempre existen valores continuos, a diferencia del escalón, que en el valor del umbral, existe una discontinuidad. Esta derivada positiva en la función sigmoideal, hace que se puedan utilizar entrenamientos que utilizan derivadas, y por eso mismo con la función escalón no se podrían utilizar. La Ecuación 22, describe el comportamiento de la función LogSig. La Ecuación 23 describe el comportamiento de la función tangente hiperbólica.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (22)$$

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (23)$$

#### 2.4.6.2 Topología

La topología de las redes neuronales es la forma en la que están estructuradas o en otros términos su arquitectura. Esta consiste en la organización y disposición de las neuronas en forma de capas o agrupaciones que están alejadas de la entrada y la salida.

Cuando se realiza una clasificación de este tipo de redes se hace la subdivisión entre las capas o niveles de neuronas. De aquí surgen la clasificación de las redes monocapa y multicapa.

❖ Redes monocapa.

Las redes monocapa, como su nombre lo indica, solo poseen una capa o nivel de neuronas agrupadas entre la entrada y la salida (ver figura 2.7), la ecuación 24 muestra el valor de sus salidas, mientras que la Ecuación 25 muestra el valor de salida para una red monocapa de  $n$  neuronas y  $m$  entradas, donde  $m$  puede ser igual a  $n$ .

En las redes monocapa, se establecen conexiones laterales entre las neuronas, esto significa que trabajan sin capa escondida utilizando su única capa para lograr su aprendizaje. También existen las conexiones auto-recurrentes que es la salida de una neurona conectada a su propia entrada. Una topología similar es la *crossbar*, la cual consiste en una matriz de terminales, ya sea de entrada o de salida, o de barras que se cruzan en puntos determinados a los que se les asocia un peso. Esta representación suele utilizarse como etapa de transición, puesto que es relativamente fácil desarrollar en hardware una estructura como la anterior.

Las redes monocapa se utilizan normalmente en tareas relacionadas con lo que se conoce como auto asociación.

❖ Redes multicapa.

En este tipo de redes las capas exceden más de dos niveles (ver figura 2.8), la salida de este tipo de red está dada por el resultado secuencial de las capas anteriores tal y como muestra la Ecuación 26, el resultado de una capa siguiente no puede ser dado si antes no se ha calculado el resultado de la capa previa.

Una forma para distinguir la capa a la que pertenece una neurona consiste en fijar la atención en el origen de las señales que recibe a la entrada y el destino de la señal de salida. Normalmente todas las neuronas reciben señales de entrada de la capa anterior y envían señales de salida a la capa superior. A estas conexiones se les llama conexiones hacia adelante o *feedforward*. Otra característica de las redes multicapa es que, además de enviar señales hacia adelante, también pueden enviar señales de salida a las entradas de las neuronas de la capa anterior, a estas conexiones hacia atrás o *feedback*. Estas características permiten distinguir entre las redes con conexiones hacia adelante o redes *feedforward*, y las redes con conexiones tanto para adelante como hacia atrás o redes *feedforward/feedback*.

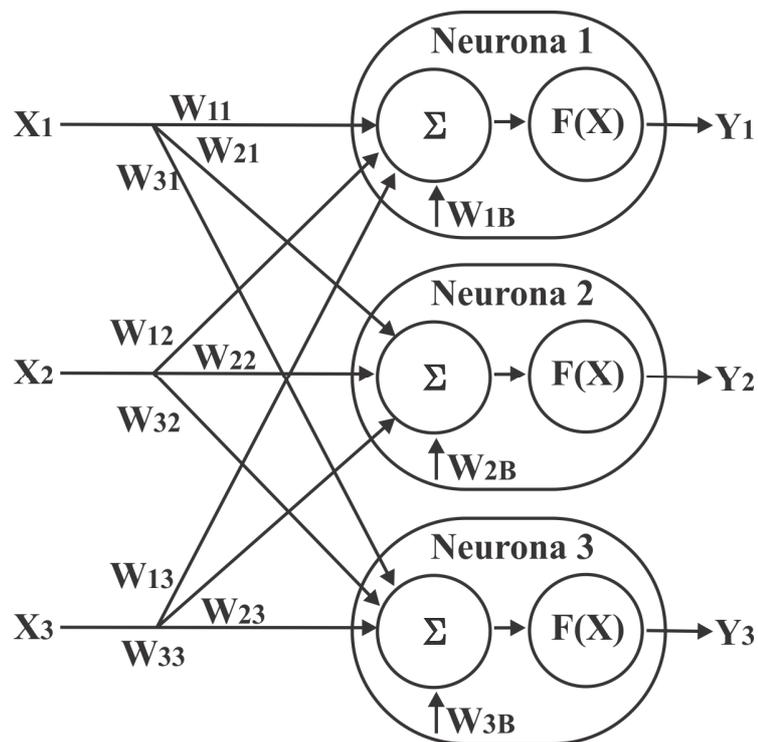


Figura 2.7. Red monocapa.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = f \begin{pmatrix} X_1 W_{11} + X_2 W_{12} + X_3 W_{13} + W_{1B} \\ X_1 W_{21} + X_2 W_{22} + X_3 W_{23} + W_{2B} \\ X_1 W_{31} + X_2 W_{32} + X_3 W_{33} + W_{3B} \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = f \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m X_i W_{i1} + W_{1B} \\ \sum_{i=1}^m X_i W_{i2} + W_{2B} \\ \sum_{i=1}^m X_i W_{i3} + W_{3B} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m X_i W_{in} + W_{nB} \end{pmatrix} \quad (25)$$

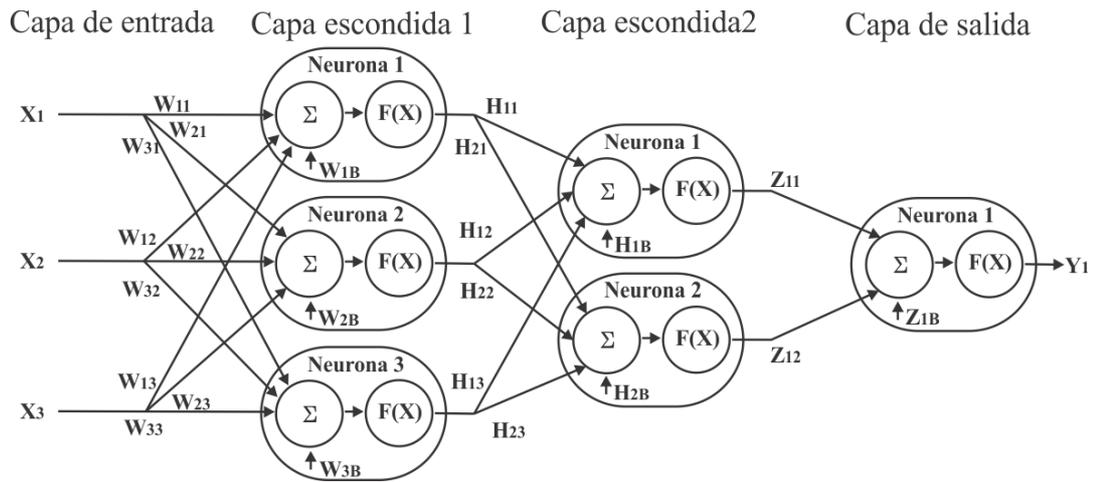


Figura 2.8. Red multicapa.

$$y_1 = f(S_1 z_{11} + S_2 z_{12} + z_{1B}) \quad (26)$$

donde  $S_1$  y  $S_2$  son las salidas de la capa escondida 2 respectivamente y están definidas por:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = f \begin{pmatrix} P_1 H_{11} + P_2 H_{12} + P_3 H_{13} + H_{1B} \\ P_1 H_{21} + P_2 H_{22} + P_3 H_{23} + H_{2B} \end{pmatrix} \quad (27)$$

donde  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  son las salidas de la capa escondida 1 respectivamente y están definidas por:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = f \left( \begin{array}{l} X_1 W_{11} + X_2 W_{12} + X_3 W_{13} + W_{1B} \\ X_1 W_{21} + X_2 W_{22} + X_3 W_{23} + W_{2B} \\ X_1 W_{31} + X_2 W_{32} + X_3 W_{33} + W_{3B} \end{array} \right) \quad (28)$$

### 2.4.6.3 Tipos de aprendizaje

El aprendizaje o entrenamiento de las redes neuronales es el proceso mediante el cual se modifica la respuesta de una información entrante por medio de la modificación de los pesos. Estos cambios no son más que, la destrucción, modificación y creación de las conexiones entre las neuronas de las redes neuronales. En los sistemas biológicos este proceso es constante. En los modelos artificiales, la creación de una nueva conexión implica que el peso tenga un valor diferente de cero y la destrucción de una conexión sucede cuando un peso pasa a ser cero.

Se debe tomar en cuenta que, cuando se desea que la red aprenda una nueva información, se debe conocer como se tienen que modificar el valor asignado a las conexiones cuando estas ya han aprendido.

Estos criterios determinan las reglas de aprendizaje de la red. Generalmente solo se utilizan dos: las que responden al aprendizaje supervisado y las que pertenecen al aprendizaje no supervisado. La diferencia existente entre estos dos tipos de entrenamiento es, la presencia o ausencia de un agente externo o supervisor que controle el proceso de aprendizaje de la red neuronal.

#### ❖ Aprendizaje supervisado.

El aprendizaje supervisado se caracteriza porque el proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada

determinada. El supervisor comprueba la salida de la red y en caso de que esta no coincida con la deseada, se procederá a modificar los pesos de las conexiones, con el fin de conseguir que la salida obtenida se aproxime a la deseada, en la Figura 2.9 se muestra el entrenamiento supervisado.

Este tipo de aprendizaje se suele considerar, a su vez, tres formas de llevarlo a cabo que dan lugar a los siguientes tipos de aprendizaje supervisado.

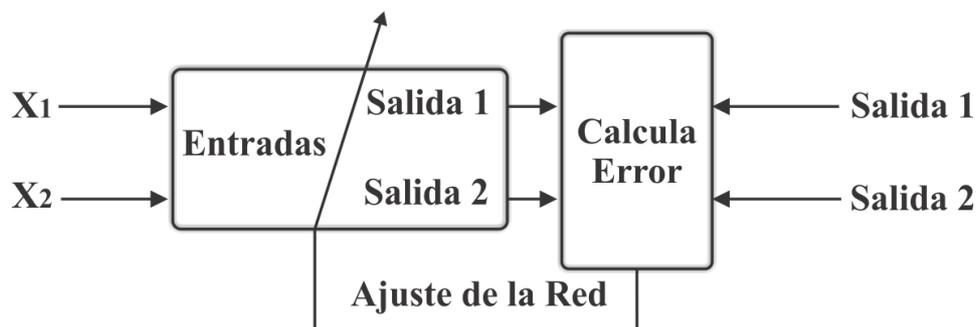


Figura 2.9. Aprendizaje supervisado.

- ❖ *Aprendizaje por corrección de error:* consiste en ajustar los pesos de las conexiones de la red en función de la diferencia entre los valores deseados y los obtenidos en la red, es decir, en función del error cometido en la salida.
- ❖ *Aprendizaje por refuerzo:* este aprendizaje supervisado, es más lento que el anterior, que se basa en la idea de no disponer de un ejemplo completo del comportamiento deseado, es decir, de no indicar en el entrenamiento exactamente la salida que se desea que proporcione la red ante una determinada entrada.
- ❖ *Aprendizaje estocástico:* este tipo consiste básicamente en realizar cambios aleatorios en los valores de los pesos de las conexiones de la red y evaluar su efecto a partir del objeto deseado y de las distribuciones de probabilidad. Si el error es menor del cambio, es decir se acerca la salida al valor deseado, se

acepta el cambio, si el erro no es menor, se aceptaría el cambio en función de una determinada y preestablecida distribución de probabilidad.

❖ **Aprendizaje no supervisado.**

El aprendizaje no supervisado se caracteriza, a diferencia del supervisado, en el cual el proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo, este tipo de aprendizaje no cuenta con un agente externo que enseñe a la red las salidas deseadas con ciertas entradas. Existen dos tipos de entrenamiento no supervisado, en el primer caso, normalmente se pretende medir la familiaridad o extraer características de los datos de entrada, mientras que el segundo suele orientarse hacia la clusterización o clasificación de dicho datos en la figura 2.10.



Figura 2.10. Aprendizaje no supervisado.

❖ **Aprendizaje Hebbiano:** Hebb entiende un conjunto de neuronas fuertemente conexas a través de una estructura compleja. La eficiencia podría identificarse con la identidad o magnitud de la conexión, es decir, con el peso. Se puede decir, por tanto, que el aprendizaje consiste básicamente en el ajuste de los pesos de la conexión de acuerdo con la correlación (multiplicación en el caso de los valores binarios +1 y -1) de los valores de activación (salidas) de las dos neuronas conectadas. Si las dos conexiones son activas (positivas) la conexión entre ellas se refuerza, si una es activa y otra pasiva, la conexión entre ellas se debilita.

- ❖ Aprendizaje competitivo y cooperativo: este tipo de aprendizaje, suele decirse que las neuronas compiten y cooperan unas con otras con el fin de llegar a cabo una tarea dada. Con este tipo de aprendizajes, se pretende que cuando se presente a la red cierta información en la entrada, solo una de las neuronas de salida de la red, se active, esto quiero decir, que alcance se valor de respuesta máximo. Por tanto, las neuronas compiten por activarse, quedando finalmente una, o una por grupo, como neurona vencedora, quedando anuladas el resto, que son forzadas a sus valores de respuesta mínimo.

#### 2.4.6.4 Pasos para crear una red neuronal

Crear un conjunto de datos de entrenamiento.

- Crear un conjunto de datos de validación.
- Crear la red.
- Entrenar la red (usar el conjunto datos de entrenamiento).
- Validar la red para averiguar si aprendió y generalizó (usar el conjunto de datos de validación).

Usar la red aplicando datos nuevos, posiblemente diferentes a los de entrenamiento y validación.

#### 2.4.6.5 Diseño del conjunto de datos de entrenamiento y validación

El conjunto de datos de entrenamiento y de validación debe representar de forma apropiada el experimento.

- No se puede usar el conjunto de validación para el entrenamiento.
- El conjunto de entrenamiento debe contener los distintos tipos de lecciones que represente la totalidad del problema real.

- El conjunto de entrenamiento no debe de ser demasiado grande, ya que se provocaría un sobre entrenamiento.
- Las redes más grandes requieren un conjunto de entrenamiento más grande.
- El conjunto de entrenamiento puede obtenerse de una colección muy grande de datos y un generador de datos aleatorios, para seleccionar solo algunos datos del conjunto original.

Un síntoma de sobre entrenamiento es que la red trabaja muy bien con el conjunto de entrenamiento pero produce malos resultados con el conjunto de validación.

En bastantes aplicaciones los datos de entrada a una red neuronal deben ser pre-procesados, es decir, requieren de cierta manipulación antes de llegar a la capa de entrada para ser mejor utilizados o utilizados de forma diferente. En algunas aplicaciones los datos de entrada se normalizan, se cambian de espacio o simplemente se sustituyen por alguna magnitud que los represente, esta última, tiene como finalidad sustituir un gran número de datos por un valor único, en el que además se aprovechará alguna particularidad del conjunto de datos. Algunas magnitudes utilizadas son promedio, mediana, homogeneidad, entropía, energía, etc., la magnitud u operación elegida puede ser cualquiera ya que dependerá de la aplicación y de la característica que el diseñador quiera resaltar en el conjunto de datos.

## **2.5 Sintetizador digital de formas de onda**

En la actualidad los sintetizadores digitales de formas de onda son unidades elementales de trabajo en todos los laboratorios científicos, educativos, militares, etc. esto debido al hecho de que la inmensa mayoría de los sistemas electrónicos requieren de un generador de señales de manera interna o externa, o en el caso de las estructuras civiles se necesita contar con un generador señales

que genere señales arbitrarias de tal forma que permita excitar las estructuras en una forma similar a terremotos, vibraciones ambientales, etc.

Anteriormente las técnicas empleadas para la generación de señales se basaban en circuitos osciladores a base de transistores con una determinada potencia. Desafortunadamente, sus dimensiones físicas y eléctricas estaban sujetas a cambios al modificarse la temperatura, la humedad, la presión, potencial de alimentación y a cargas eléctricas. Estas modificaciones afectan la forma de la onda en su amplitud y su frecuencia dando como resultado una señal de no muy buena calidad. Básicamente, esta técnica para generación de señales la conocemos como tipo analógica.

Debido a las limitaciones que presenta la técnica anterior y dado que un factor muy importante en la generación de señales es la estabilidad, se han desarrollado sistemas basados en sintetizadores digitales de formas de onda, los cuales, apoyados con circuitos integrados de alta tecnología permite generar señales de mejor calidad.

Un sintetizador digital de formas de onda es un dispositivo electrónico que permite emular por medios digitales una señal analógica. Este dispositivo permite controlar una señal tanto en frecuencia como en amplitud, simetría, modulación, número de canales de trabajo, y capacidad de almacenamiento.

El principio básico de un sintetizador digital de formas de onda parte de la estructura mostrada en la Figura 2.11, conocida como acumulador de fase.

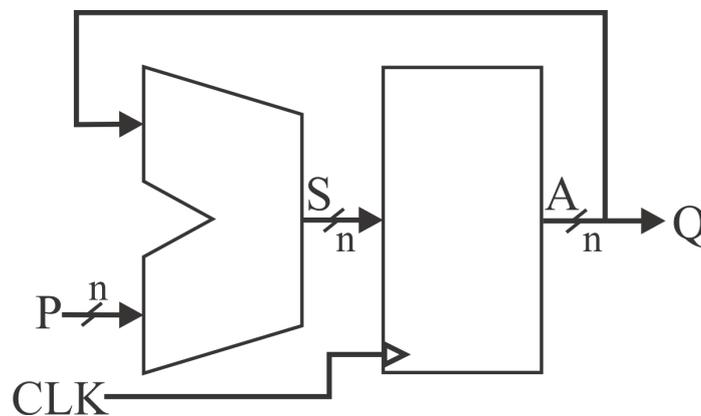


Figura 2.11. Acumulador de fase.

El acumulador de fase es un sistema digital que a cada pulso activo de reloj suma el valor de la fase  $P$  con el valor acumulado previamente  $A$  y lo vuelve a almacenar en  $A$  para producir la salida  $Q$ . De esta forma, la señal  $Q$  tiene un comportamiento de rampa digital como se muestra en la Figura 2.12 y cuya frecuencia está dada por la Ecuación 29.

$$f_o = \frac{P}{2^n} f_{CLK} \quad (29)$$

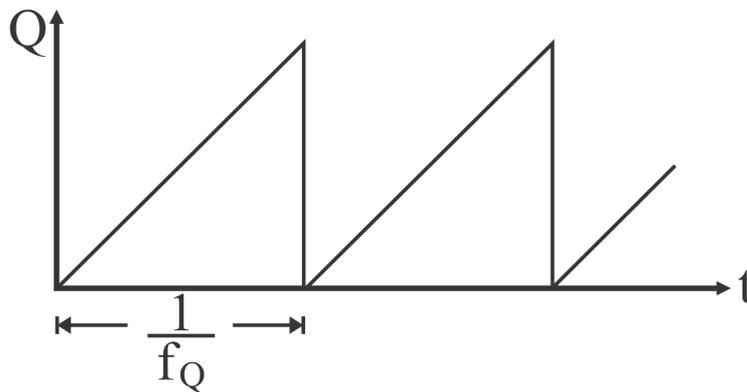


Figura 2.12. Forma de onda de la señal  $Q$  del acumulador de fase.

La característica principal de la Ecuación 29 es que ahora se puede producir un generador de base de tiempo cuya frecuencia de salida sigue un patrón directamente proporcional a la frecuencia base de reloj. Esta característica puede ser comparada con la generación de base de tiempo por medio de un contador donde la frecuencia es inversamente proporcional al módulo  $N$  del mismo como aparece en la Ecuación 30. La frecuencia que se pueden obtener con un contador módulo  $N$  no se encuentran espaciadas de manera uniforme, mientras que las frecuencias obtenidas con el acumulador de fase si se encuentran espaciadas de manera uniforme.

$$f_{CNT} = \frac{1}{N} f_{CLK} \quad (30)$$

Con el acumulador de fase ya es posible obtener de manera directa las formas de onda: cuadrada y rampa o diente de sierra mediante un DAC; sin embargo, la onda sinusoidal no se puede obtener de forma tan directa y es necesario procesar la información para generar esta señal. La técnica más simple para generar la forma de onda sinusoidal (y en general, cualquier forma de onda arbitraria) consiste en la definición de una LUT que convierta la fase a la forma de onda deseada, de tal manera que el sintetizador de formas de ondas arbitrarias quede como se muestra en la Figura 2.13.

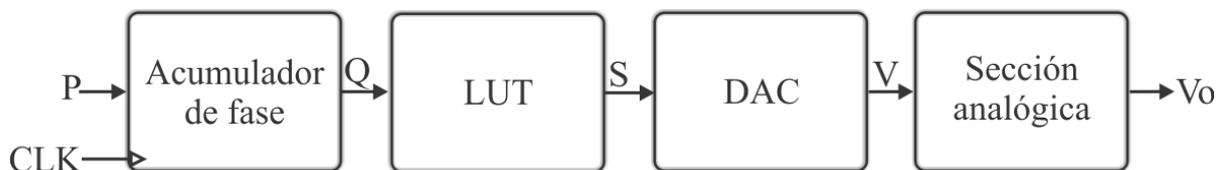


Figura 2.13. Sintetizador digital de formas de onda arbitrarias.

El sintetizador digital de formas de ondas arbitrarias de la Figura 2.13, en función de la frecuencia base de la señal  $CLK$ , produce una rampa (diente de sierra) digital  $Q$  con una frecuencia proporcional a  $P$ . La  $LUT$  convierte o decodifica la señal  $Q$  en una forma de onda arbitraria  $S$ . El  $DAC$  convierte la señal digital  $S$  en una tensión analógica  $V$  y la sección analógica de salida se encarga de proporcionar los niveles de tensión y acoplamiento de impedancias para dar como resultado final la señal  $Vo$  que es la forma de onda deseada.

### 2.5.1 Ventajas de los sintetizadores digitales de formas de onda

A continuación se presentan algunas ventajas de los sintetizadores digitales de formas de onda

- Resoluciones del orden micro-hertz para la frecuencia de salida y capacidad de control de fase con precisión, todo esto bajo absoluto control digital.

- Velocidad extremadamente rápida de cambio de la frecuencia de salida, saltos de frecuencia con fase continua y sin transitorios.
- Esta arquitectura elimina la necesidad de calibrar el sistema manualmente, así como los problemas asociados con la edad de los componentes y los cambios de temperatura.
- La interfaz de control digital facilita el control remoto de los sistemas y su control desde PC's.

### 3. METODOLOGÍA

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo, el cual está basado en el análisis de las vibraciones (análisis de la amplitud de las frecuencias naturales) para evaluar el desempeño de una estructura del tipo Truss ante diferentes condiciones de falla. El diagrama esquemático del sistema de monitoreo esta mostrado en la Figura 3.1, en el cual el sistema implementado consiste de cinco unidades: interfaz gráfica generadora de señales (IGO), sintetizador digital de formas de onda (SDFO), actuador primario (AP), sistema de instrumentación (SI), el cual está conformado por el sensor primario (SP), el acondicionador de señales (AS), y el sistema de adquisición de datos (SAD), y un algoritmo programado en MATLAB. La unidad IGO genera y modifica la señal que será empleada para excitar la estructura. La unidad SDFO está basada en FPGA y se encarga de guardar y reproducir la señal generada por la unidad IGO. La unidad AP incluye un amplificador lineal comercial, el cual recibe y acondiciona la señal generada por la unidad SDFO, y un shaker electrodinámico, el cual es alimentado por la señal acondicionada para excitar la estructura. El sistema emplea múltiple acelerómetros como SP para monitorear las aceleraciones en uno o varios puntos de la estructura simultáneamente. Finalmente, la unidad SAD, la cual está basada en FPGA, adquiere y almacena todas las señales medida por los sensores, acondicionadas y amplificadas por la unidad AS; luego, estas señales son enviadas a la PC para su análisis con el fin de estimar la condición de la estructura, localizar la falla y la severidad de la misma.

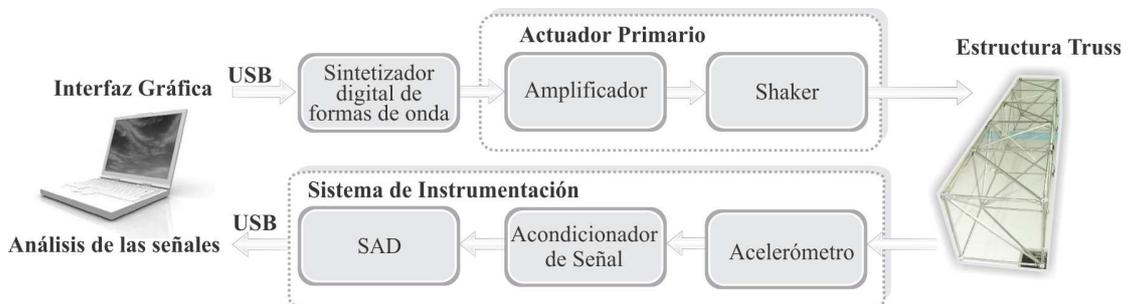


Figura 3.1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

### 3.1 Interfaz gráfica

Esta unidad es la encargada de generar la señal que excitará la estructura así como de monitorearla. IGO tiene una interfaz gráfica (GUI) para cargar los datos y presentar la salida. Mostrada en la Figura 3.2, la unidad IGO consta dos módulos, el módulo simulador y el módulo analizador. El módulo simulador es la principal ventana, la cual aparece cuando el programa inicia. El módulo está basado en cuatro etapas: vibración, parámetros de configuración del shaker, escalamiento de la señal y la unidad de control maestra. Figura 3.3 muestra el proceso total, descrito a continuación:

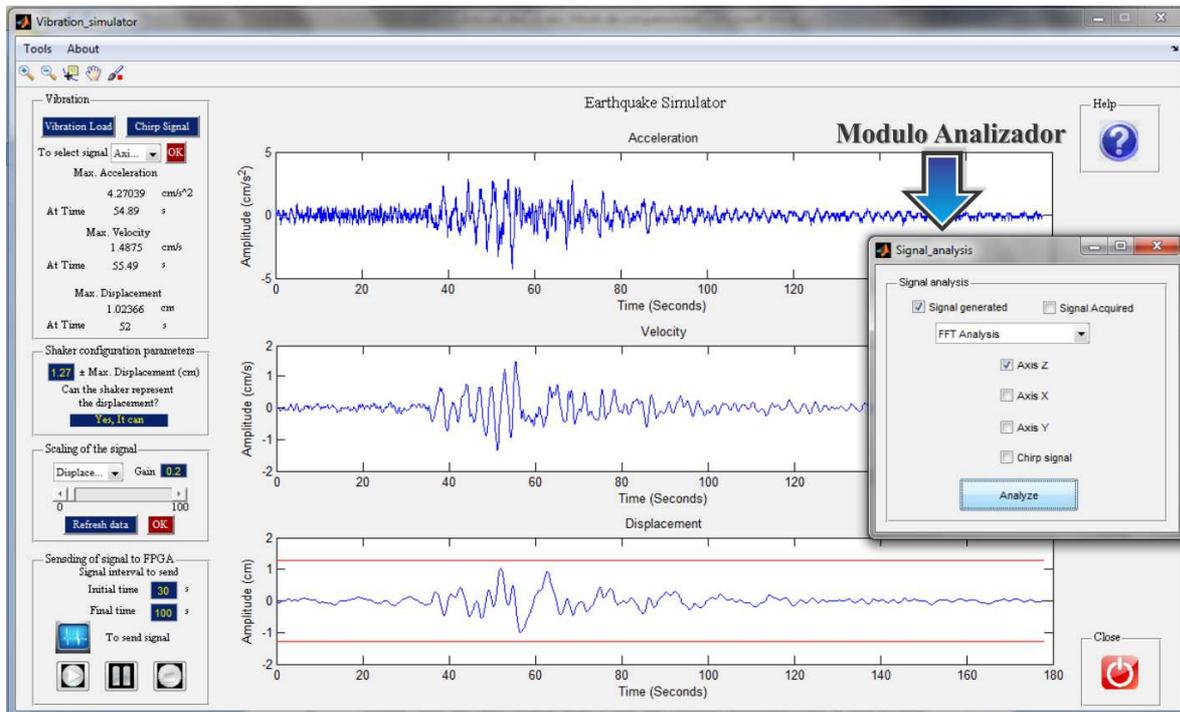


Figura 3.2. Interfaz gráfica.

1. Vibración. Esta etapa genera o carga una señal que será reproducida por el shaker. Terremotos, señales sintéticas y vibraciones ambientales pueden ser sintetizadas o generadas por esta etapa.

A continuación se presenta una breve explicación de como operar esta unidad. Primero, el push button "Vibration load" es empleado para cargar datos ya sea de aceleraciones de terremotos o de vibraciones ambientales tales como tráfico, viento, etc. Además, una señal sintética con ciertas características puede ser generada empleando el push button "Chirp signal". Posteriormente, por medio de un popup menú, la señal deseada es seleccionada. Este popup menú fue desarrollado debido a que en varios casos los datos cargados contienen aceleraciones horizontales y verticales. Como siguiente paso, los parámetros del shaker son fijados, esto con el propósito de comparar el máximo desplazamiento generado por la señal y el "Max displacement" que puede ser representado por el shaker. Finalmente, el push button "OK" es empleado para mostrar la señal generada o cargada en la interfaz. Simultáneamente, algunas características de la señal son mostradas tales como máxima aceleración, máxima velocidad, y máximo desplazamiento (ver figura 3.3a).

2. Parámetros de configuración del shaker. Esta etapa fija los parámetros para el uso del shaker electrodinámico (ver figura 3.3b). Esta etapa es esencial porque establece el máximo desplazamiento que puede representar el shaker. Además, esta etapa permite observar si la señal puede ser representada por el shaker. En todos los casos experimentales de este trabajo de tesis, el parámetro de desplazamiento fue fijado a  $\pm 1.27$  cm.
3. Escalamiento de la señal. Esta etapa escala la señal en amplitud (ver figura 3.3c). Primero, la señal a ser escalada es seleccionada por medio de un popup menú (aceleración, velocidad o desplazamiento). Posteriormente, una ganancia es establecida, la cual es multiplicada por la amplitud de la señal original para obtener la señal escalada. Con el fin de mostrar la señal escalada en la interfaz, es necesario presionar el push button "Refresh data". Simultáneamente, "máxima aceleración",

“máxima velocidad” y “máximo desplazamiento” son actualizados en la primera etapa “Vibración” (ver figura 3.3d). Parámetros de configuración del shaker (segunda etapa) son actualizados también (ver figura 3.3e). Este proceso es repetido hasta que el usuario obtiene una señal escalada deseada. Finalmente, cuando el usuario observa una señal escala deseada, el push button “OK” tiene que ser presionado para actualizar la señal que será enviada al sintetizador digital de formas de onda.

4. Unidad de control maestra. Esta etapa envía y controla la señal que será reproducida por el shaker. Primero, la región de la señal que será reproducida es seleccionada. Posteriormente, cuando el usuario selecciona la región deseada de la señal, el push button “To send signal” es empleado para enviar la señal al sintetizador digital de formas de onda (ver figura 3.3f). Con la finalidad de controlar fácilmente la señal que será reproducida por el sintetizador digital de formas de onda, tres push button “Play”, “Pause” y “Stop” son empleados. El push button “Play” permite la reproducción de la señal generada en la interfaz. El push button “Pause” permite al usuario pausar la reproducción de la señal. Finalmente, el push button “Stop” permite al usuario detener la señal reproducida.

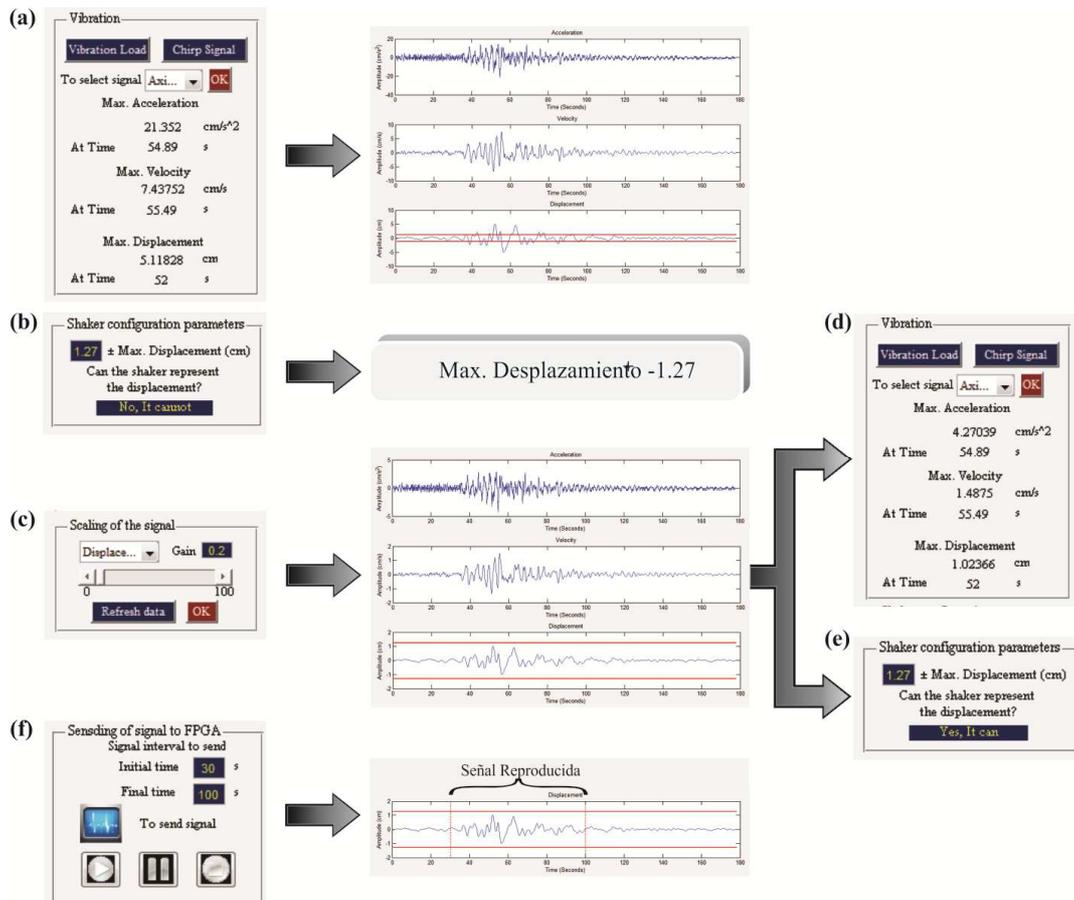


Figura 3.3. Módulo simulador.

El Segundo módulo “módulo analizador”, localizado en el menú “Tools”, es empleado para analizar ya sea la señal generada en el primer módulo o la señal adquirida por los acelerómetros a través de los algoritmos FFT, DWT, WPT, WPT-FFT y DWT-FFT. Una limitación existente en los software comerciales para el análisis por medio de WPT es la dificultad en determinar los rangos de frecuencia de la señal reconstruida de varios nodos (Zeng *et al.*, 2008). Entonces, es necesario determinar la correspondiente relación entre los nodos del árbol de descomposición y las bandas de frecuencias de la señal descompuesta. Un método simple para resolver este problema fue propuesto por Zeng *et al.* (2008), la cual es implementada en el “módulo analizador” y está basado en la conversión del código decimal al código gray. Cuando el usuario elige ya sea WPT o WPT-

FFT el software automáticamente selecciona el nodo apropiado de acuerdo a la escala y frecuencia seleccionada. El uso de este módulo, seleccionando WPT-FFT, es mostrado en la Figura 3.4. Las opciones seleccionadas para este ejemplo en el “módulo analizador” son: Terremoto de México 1985 como señal generada, WPT-FFT análisis, aceleración vertical (Eje Z), y 10 y 0.5 Hz para escala y frecuencia, respectivamente.

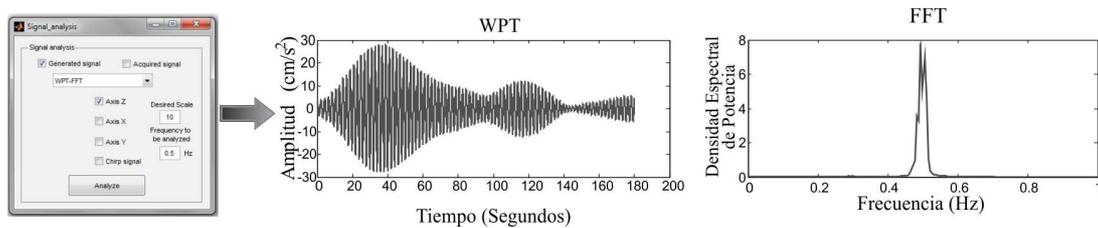


Figura 3.4. Módulo analizador.

### 3.2 Sintetizador digital de formas de onda

La unidad sintetizador digital de formas de onda (SDFO) esta basada en la técnica síntesis digital directa (DDS) (Romero-Troncoso y Espinosa-Flores, 1999). Mostrada en la Figura 3.5, la unidad SDFO está compuesta de cinco módulos: interfaz de comunicación, memoria dinámica, acumulador de fase, convertidor digital-analógico (DAC) y el acondicionamiento de la señal. La unidad SDFO recibe los datos generados de la interfaz gráfica por medio de la interfaz USB. Al mismo tiempo, los datos recibidos son almacenados en memorias dinámicas para formar la tabla de datos (LUT). El acumulador de fase incluye dos etapas, un sumador y un registro, los cuales se encargan de reproducir la señal guardada a una frecuencia deseada. Finalmente, los datos reproducidos son enviados al DAC para generar la señal analoga, la cual es acondicionada para alimentar el amplificador lineal.

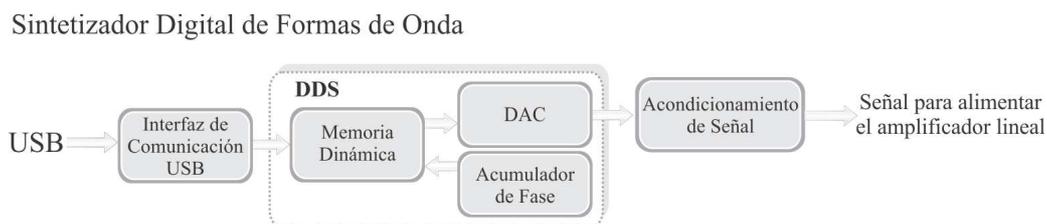


Figura 3.5. Sintetizador digital de formas de onda.

### 3.2.1 Interfaz USB, memoria dinámica y acumulador de fase

El sintetizador digital de formas de onda está basado en la tecnología FPGA. Los módulos interfaz USB y memoria dinámica se emplearon IP-cores descritos por Morales (2010) y Doñate (2011). Por lo tanto, se generó un IP-core para el acumulador de fase y un bloque (FSM) que se encargue del control de todos estos bloques. El bloque FSM cuenta con una estrada de 3 bits (I), con lo cual podemos generar la siguiente combinación: 000 para iniciar el almacenamientos de los datos, 001 lectura de los datos almacenados en memoria, 010 pausa la lectura de los datos, 011 parar la lectura de los datos y 100 para configurar el acumulador de fase. Además, el bloque FSM cuenta con 5 salidas, una para iniciar la escritura en la memoria (STR\_E), la segunda para configurar el acumulador de fase (CONF), la tercera para iniciar la lectura de los datos almacenados en la memoria y el inicio del acumulador de fase (SRT\_G), la cuarta pausa la salida de datos (PAUSA) y la última para parar todo el proceso (STOP). La Figura 3.6, muestra un diagrama a bloques de todos los módulos interconectados.

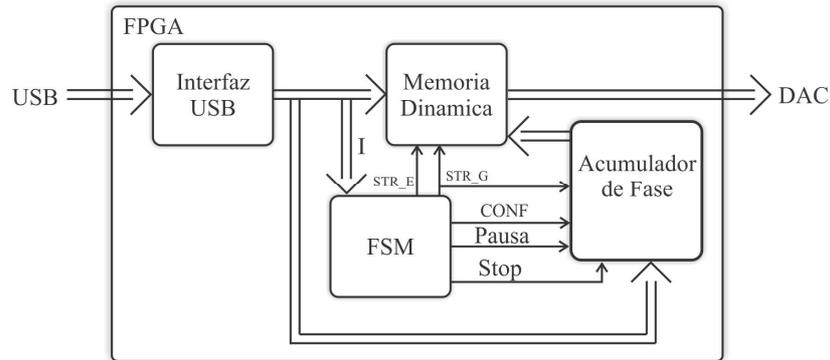


Figura 3.6. Diagrama a bloques.

### 3.2.2 Convertidores digital-analógicos de alta velocidad.

A continuación en la Tabla 1 se muestran algunos de los convertidores empleados para aplicaciones DDS. En la tabla se muestran las características más importantes de estos.

Tabla 1. Características de algunos convertidores digital-analógicos.

Convertidor DAC	Fabricante	Resolución	Velocidad de conversión	Número de canales	Tipo de encapsulado
DAC2900	Texas Instruments	10 bits	125 MPS	2	TQFP-48
DAC2902	Texas Instruments	12 bits	125 MPS	2	TQFP-48
DAC2904	Texas Instruments	14 bits	125 MPS	2	TQFP-48
DAC2932	Texas Instruments	12 bits	40 MPS	1	TQFP-48
DAC5652	Texas Instruments	10 bits	275 MPS	1	TQFP-48
DAC5672	Texas Instruments	14 bits	275 MPS	1	TQFP-48
HI1171	Intersil	8 bits	40 MPS	1	SOIC-24
HI5660	Intersil	8 bits	125 MPS	1	SOIC-28
THS5641A	Texas Instruments	8 bits	100 MPS	1	SOIC-28
THS5671A	Texas Instruments	14 bits	125 MPS	1	SOIC-28

De acuerdo a la tabla mostrada se seleccionó para este trabajo de tesis el DAC2904 debido a que cumple con las características necesarias para el diseño del generador de ondas arbitrarias.

### 3.2.2.1 Convertidor DAC2904.

Ya que se tienen todos los datos digitales de la onda a generar hay que convertirlos de manera analógica mediante un DAC. El DAC empleado en este proyecto de tesis fue el DAC2904 de Burr-Brown, el cual ofrece una resolución de 14 bits, una alta velocidad de conversión (125 MPS) y de doble canal, además es compatible con la tecnología CMOS, lo cual facilita la conexión con el FPGA. El DAC2904 combina la alta actuación dinámica con una proporción de actualización que crea una solución rentable para una gran variedad de aplicaciones en lo que respecta a la síntesis de formas de onda:

Algunas de sus características del DAC2904 son las siguientes:

- Compatibilidad de pines entre los miembros de la familia DAC2900 (10 bits), DAC2902 (12 bits) y DAC2904 (14 bits).
- El DAC2904 emplea un proceso avanzado de CMOS, la arquitectura segmentada minimiza la energía de rendimiento y maximiza la actuación dinámica.
- Todas las entradas digitales son de +3.3 V y +5 V en lógica compatible.
- El DAC 2904 está disponible en encapsulado del tipo TQFP-48 y tiene un rango de temperatura de -40°C a 85°C.

La Figura 3.7 muestra el encapsulado del DAC2904 con cada una de sus terminales.

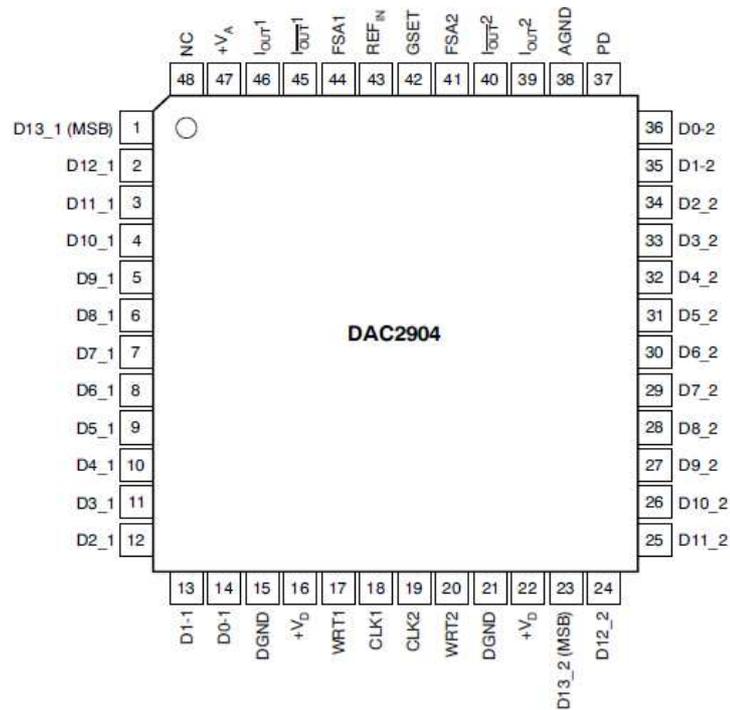


Figura 3.7. Vista superior del convertidor DAC2904 con sus respectivas terminales.

Las salidas del convertidor soportan un ciclo de reloj por encima de los 125 MHz. Tanto la escritura (WRT) como el reloj (CLK) trabajan en conjunto para su mejor desempeño, es decir, que trabaja en forma paralela, ya que cada dato del bus de entrada es convertido instantáneamente en cuanto llega éste.

Todas las entradas digitales del DAC2904 son compatibles con tecnología CMOS. Este convertidor está diseñado para operar con una fuente de voltaje de +3.0 V a +5.5 V. Los dos canales contenidos en el convertidor consisten de dos puertos de datos paralelos de 14 bits cada uno. Cada canal del DAC es controlado por su propia señal de escritura (WRT1, WRT2) y su señal de entrada de reloj (CLK1, CLK2).

En la Figura 3.8 se muestra el diagrama de tiempo del DAC2904, en él se puede observar que cuando llega el dato de entrada al convertidor, este es convertido instantáneamente en cuanto esta activa la señal de escritura (WRT) y la señal de reloj (CLK).

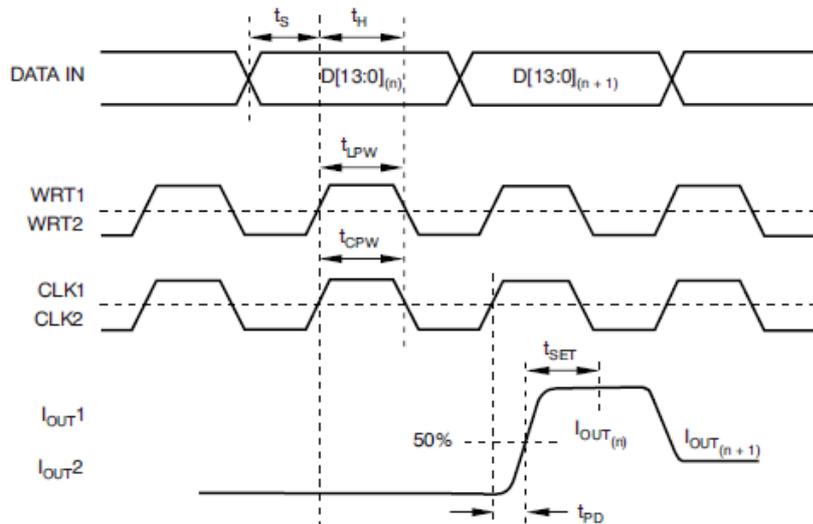


Figura 3.8. Diagrama de tiempos del DAC2904.

### 3.2.3 Acondicionamiento de la señal.

La figura 3.9 muestra el acondicionamiento de señal que se propuso para cada canal de salida.

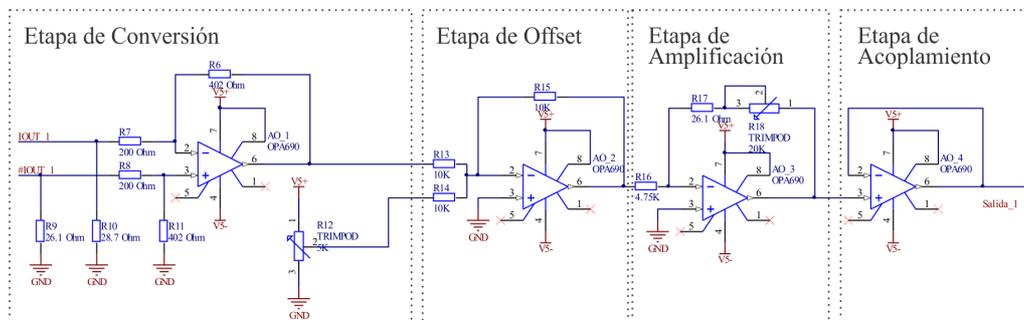


Figura 3.9. Acondicionamiento de la señal.

Como se puede observar en la figura, el acondicionamiento de la señal se divide en cuatro etapas:

1. Etapa de conversión. Esta etapa es empleada debido a que el DAC2904 su salida es corriente y con esta etapa se pasa la salida a voltaje con una salida máxima de  $\pm 1$  V.
2. Etapa de offset. Esta etapa nos permite controlar el offset de la señal.

3. Etapa de amplificación. Esta etapa fue diseñada para amplificar la señal, la máxima amplificación que se puede realizar  $\pm 5V$ , esto debido a que el amplificador está alimentado con  $\pm 5V$ .
4. Etapa de acoplamiento. Esta etapa fue diseñada con el fin de acople de impedancias y lo más importante para evitar caídas de voltaje.

### 3.3 Actuador primario

En esta sección se muestran algunas características del amplificador lineal y el shaker electrodinámico empleados para la excitación de la estructura.

#### 3.3.1 Amplificador lineal.

Para amplificar y acondicionar la señal que será empleada para excitar la estructura, el amplificador lineal PA-141 de Labworks inc (ver figura 3.10) es utilizado.



Figura 3.10. Amplificador lineal PA-141.

El amplificador PA-141 tiene dos modos de operación (voltaje y corriente). Sin embargo, cuando se opera en modo corriente si el amplificador no está conectado a una carga podría sufrir un daño, por ello se recomienda trabajar en

modo voltaje. Adicionalmente, el amplificador PA-141 cuenta con una protección por sobre corriente y sobre temperatura.

A continuación se muestran algunas características generales del amplificador:

- Salida máxima de voltaje 50 V rms
- Salida máxima de corriente 20 A rms
- Entrada de voltaje DC – 10KHz
- Impedancia de entrada 10 K ohms
- Enfriamiento interno
- Alimentación 2,200VA @ 100, 110, 200 o 220 V
- Peso 21.8 Kg

### 3.3.2 Shaker electrodinámico.

Para excitar la estructura, el shaker electrodinámico ET-127 es empleado en este trabajo de tesis (ver figura 3.11), el cual es muy adecuado para pruebas de vibración de sistemas mecánicos o eléctricos así como aplicaciones de pruebas modales. El sistema de suspensión de la armadura incorpora láminas de fibra de carbón, que permiten a la armadura tener una carrera larga mientras mantiene su alta rigidez. Sistema de protección, nivel de temperatura y nivel de desplazamiento, se incluyen para protección de Shaker.



Figura 3.11. Shaker electrodinámico ET-127

A continuación se muestran algunas características generales del shaker ET-127:

Desempeño:

- Fuerza máxima empleando señales seno 500 lbf pk
- Fuerza máxima empleando señales random 350 lbf pk
- Fuerza máxima empleando el choque 1000 lbf pk
- Max. Desplazamiento continuo pk-pk 1.0 in
- Rango de frecuencia DC – 4500 Hz

Físicas:

- Peso de la armadura 5.0 lb
- Rigidez de la suspensión 250 lb/in
- Dimensiones 21"x14.5"x14"
- Peso del shaker 475 lbs

### 3.4 Estructura tridimensional de barras

La estructura empleada en este trabajo de tesis se ilustra en la Figura 3.12.



Figura 3.12. Estructura de barras articuladas.

Los elementos son fabricados en aluminio comercial 6061, presenta una alta resistencia a la corrosión, facilidad de maquinar, relación resistencia/peso alta y gran estética. La estructura está 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.

### 3.4.1 Descripción de los componentes de la estructura.

A continuación se presentan las distintas piezas que componen la estructura, 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.

- ❖ Nudo. Pieza de unión entre dos o más elementos (ver Figura 3.13a). Barrenado y machueleado cada 45° en sus planos principales, de manera que permite su conexión a otros nodos en estas direcciones.
- ❖ Barra. Pieza que permite la unión entre dos nodos (ver Figura 3.13b). Es una barra con rosca interior en ambos extremos.
- ❖ Espárrago. Varilla roscada (ver Figura 3.13c). Junto con sus respectivas tuercas permite unir y ajustar la barra al nodo.
- ❖ Tuerca. Tuerca tipo estándar (ver Figura 3.13d). Permite el ajuste entre la barra, el nodo y el espárrago.

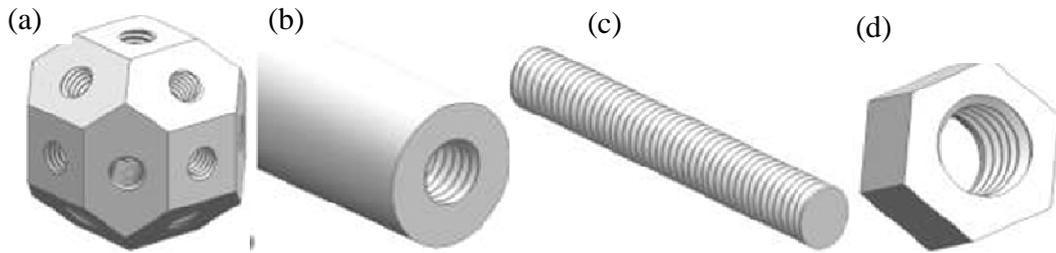


Figura 3.13. (a) Nodo, (b) Barra, (c) Espárrago, (d) Tuerca.

El material empleado para la construcción de la estructura es tabulado en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción del material utilizado en la estructura.

Pieza	Material	Cantidad de piezas
Nodo	Aluminio 6061	24
Barras	Aluminio 6061	70
Tuercas	Acero	280
Espárrago	Acero al carbón	140

### 3.5 Sistema de instrumentación

La señal de vibración es adquirida utilizando el sistema de instrumentación mostrados en la Figura 3.14, el cual consta de un sensor primario, en este caso un acelerómetro del tipo MEMS triaxial (LIS3L02AS4). La señal es acondicionada y digitalizada utilizando un convertidor analógico a digital ADS7841 y finalmente la etapa del transmisor (transceiver) que permite la comunicación con el SAD. Una vez que termina el SAD de capturar todo 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.

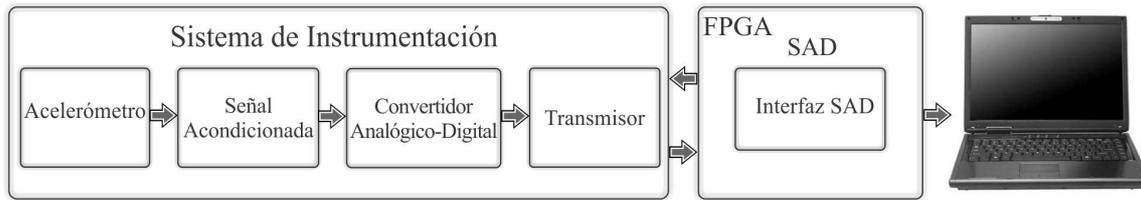


Figura 3.14. Sistema de instrumentación.

### 3.5.1 Acelerómetro Tri-axial

El sensor usado para el monitoreo de la señal de vibración es un acelerómetro de tres ejes de ST Microelectronics modelo LIS3L02ASA. 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. En la Figura 3.15 se puede observar la orientación de los ejes en los acelerómetros. Estas tres señales son entregadas por el acelerómetro de forma analógica por lo que se requiere de una etapa de acondicionamiento para cada señal, la cual fue realizada en base a las recomendaciones del fabricante. A continuación se menciona las principales características del acelerómetro:

- Tres ejes de análisis (x y z).
- Voltaje de operación de 2.4 V 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 ser sujetado en la estructura.

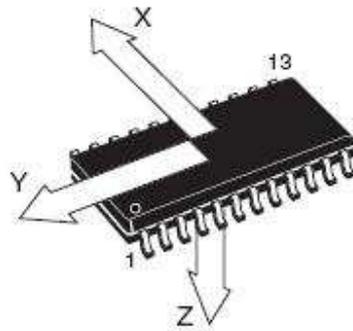


Fig. 3.15. Acelerómetro triaxial.

### 3.5.2 Convertidor analógico digital

El convertidor analógico digital empleado es el ASD7841 de Burr-Brown, es un convertidor de contacto superficial que cuenta con 4 canales analógicos y una salida síncrona de interfaz serie. Este dispositivo es comandado por una señal de reloj asíncrona, en base a esta señal se manda tanto los datos de configuración del convertidor 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 ksps
- 72dB SINAD
- Disipación de potencia de 2 mW a 200 kHz y con una fuente de alimentación de +5 V
- Incluye el modo de ahorro de energía

El voltaje de referencia puede ser ajustado entre 100 mV y  $V_{CC}$ , proporcionando a la salida el voltaje correspondiente entre 0 V y  $V_{REF}$ . El voltaje de

alimentación puede estar en el rango de 2.7 V a 5 V, lo cual permite ser utilizado directamente con tecnología CMOS. El ADS7841 tiene una velocidad de conversión de 200 kHz. Sus principales usos son en sistemas de adquisición de datos, sistemas de medición y prueba, procesos industriales de control, etc. Se eligió este convertidor en correspondencia a la resolución del sensor.

### 3.5.3 Transmisor

Una vez que los datos han sido convertidos a tipo digital son enviados vía RS-232 de la tarjeta de vibraciones al sistema de adquisición de datos. Para efectuar la transmisión se empleo el circuito MAX3243, el cual trabaja a 250 kbits/s, elevando el voltaje a un nivel de  $\pm 12$  V con el fin de eliminar ruido y reducir la pérdida de 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 RS-232 del FPGA hacia la PC, se prosigue al análisis de la señal de vibraciones del transitorio de paro mediante un algoritmo en MATLAB.

El sistema armado físicamente se muestra en la Figura 3.16, donde están plasmadas las vistas superior e inferior respectivamente.

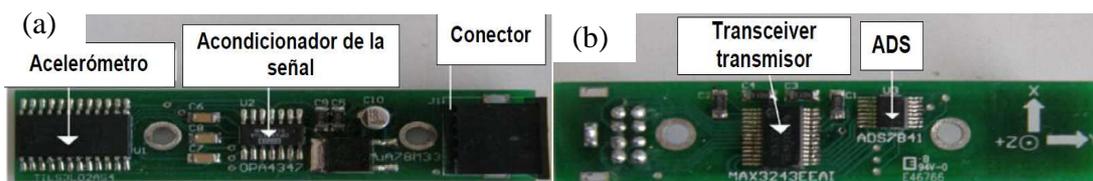


Fig. 3.16. Tarjeta de Vibraciones. (a) Vista Superior. (b) Vista Inferior.

### 3.5.4 Sistema de adquisición de datos

Mostrado en la Figura 3.17, 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.

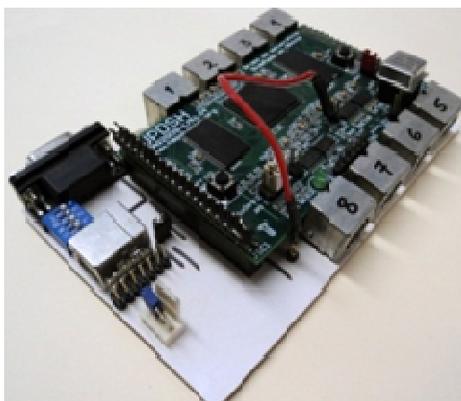


Figura 3.17. Sistema de adquisición de datos (SAD).

### 3.5.5 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 este 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 3.18 presenta la distribución de los cinco sensores de aceleración a lo largo de la estructura, enumerados a partir de la última sección (cubo 1) en voladizo hasta la sección empotrada al muro de concreto (cubo 5).

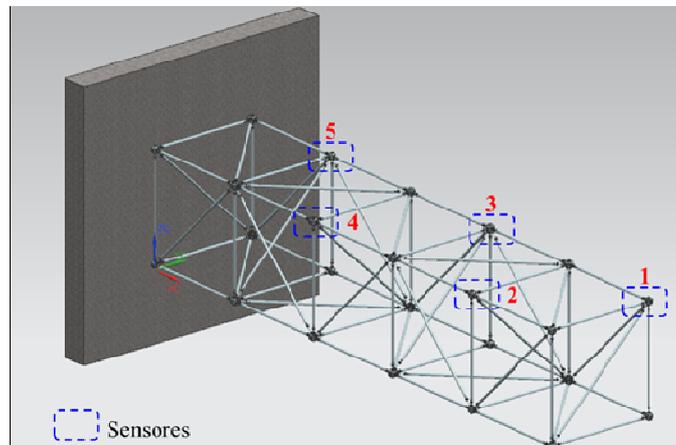


Figura 3.18. Ubicación de los sensores en la estructura Truss.

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

La Figura 3.19 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 monitoreo de la estructura.

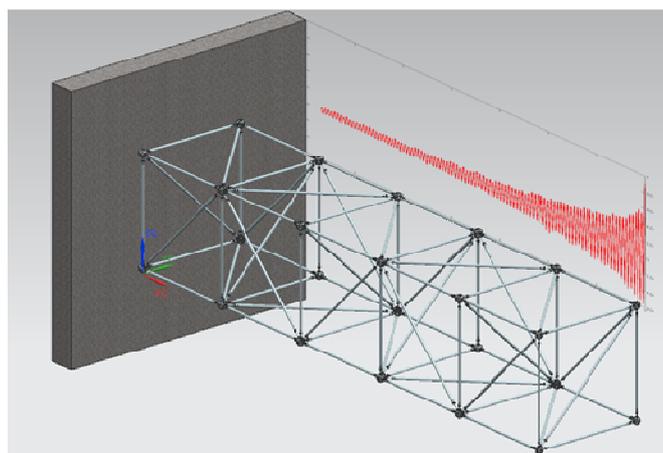


Figura 3.19. Comportamiento de la señal de vibración en la estructura.

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.

### **3.6 Metodología para el análisis de fallas en la estructura**

El análisis de la vibración es empleado para obtener un indicador de daño que permita monitorear la condición de la estructura. Un daño estructural produce cambios en la respuesta vibratoria de la estructura induciendo variaciones en su energía. Por lo tanto, el análisis de vibraciones es una herramienta poderosa de diagnóstico en el monitoreo de estructuras. La metodología propuesta para la identificación, localización y cuantificación de daños en la estructura a través de los algoritmos MUSIC y ANN incluye los siguientes pasos:

1. El primer paso es la adquisición de los datos de los cinco sensores localizados en cada cubo de la estructura truss (sin daños).
2. El segundo paso es la aplicación del algoritmo MUSIC a cada sensor para obtener el pseudo-espectro de la condición sana de la estructura.
3. Daños secuenciales en cada cubo son inducidos independientemente, es decir, el daño producido en el cubo-1 es reparado antes de colocar el daño en el cubo-2 y así sucesivamente. Así, un daño es aplicado al primer cubo y las muestras son adquiridas de los sensores en una forma similar al paso 1.

4. Posteriormente, los pseudo-espectros son obtenidos como en el paso 2 para establecer la firma de la vibración cuando hay una condición de daño.
5. Pasos (3) y (4) son repetidos para todos los cubos en la estructura y sus respectivos pseudo-espectros son obtenidos.
6. A continuación, un indicador de daño es obtenido de cada pseudo-espectro, y es indicativo de la condición de la estructura. El método para calcular este indicador es descrito posteriormente en la siguiente sección.
7. Como último paso, los indicadores de daño obtenidos son empleados para entrenar una red neuronal, con el fin de diagnosticar la condición de la estructura de una forma automática.

### 3.6.1 Indicador de daño

De acuerdo a Jian *et al*, (2005), la mayoría de los estudios enfocados a la identificación y localización de daños en estructuras están basados en el análisis de un solo sensor. Sin embargo, para un daño estructural dado, el conjunto de datos que son adquiridos de varios sensores colocados en diferentes ubicaciones contienen diferente información. Por lo tanto, cada sensor tiene una sensibilidad diferente al daño estructural, lo cual es representado como un cambio en la amplitud de las frecuencias naturales de la estructura. Este trabajo de tesis presenta una nueva propuesta para la identificación, localización y la cuantificación de los diferentes daños en una estructura del tipo truss, el cual está basado en la amplitud de las frecuencias naturales obtenidas por el algoritmo MUSIC de los cinco sensores.

El valor del indicador de daño propuesto es obtenido a través del análisis de un simple parámetro, y puede ser resumido como sigue:

1. Primero, el pseudo-espectro de cada sensor es obtenido aplicando el algoritmo MUSIC.
2. Posteriormente, una región de análisis es seleccionada. Esta región cubre la banda de frecuencia donde existan las frecuencias naturales con una gran concentración de energía y esta distribución de energía cambia debido a los diferentes tipos de daños en la estructura. Otra condición para seleccionar esta región se debe a los cambios causados por la temperatura, los cuales producen un desplazamiento de las frecuencias naturales, y estos no afectan a la metodología propuesta, ya que estas frecuencias naturales se mantienen dentro de la región de análisis. En este trabajo de tesis, la región análisis de 40Hz a 60Hz es seleccionada.
3. A continuación, la frecuencia natural con mayor amplitud en la región de interés es seleccionada. Este valor de amplitud es empleado como principal amplitud ( $A_1$ ).
4. Finalmente, el valor del indicador de daño (DIV) es obtenido como la raíz cuadrada de la suma de las amplitudes de las frecuencias naturales de la región seleccionada (exceptuando el valor de la amplitud principal) entre el valor de la amplitud principal, como lo describe la Ecuación 31.

$$DIV = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1} \quad (31)$$

Con la finalidad de explicar la estimación del valor del indicador de daño, el pseudo-espectro de la estructura sana y el pseudo-espectro del daño corrosión interna son empleados (ver figura 3.20). Se puede notar que la condición de daño causa cambios en la amplitud de las frecuencias naturales, donde es posible observar que en ambos casos la frecuencia central tiene la amplitud más grande. Los valores de las amplitudes de las frecuencias naturales en la estructura sana

son:  $A_1=52.8650$ ,  $A_2=49.8760$ , y  $A_3=44.0567$ ; y los valores de las amplitudes de las frecuencias naturales en el caso de daño son:  $A_1=67.2492$ ,  $A_2=60.2186$ , y  $A_3=56.3172$ . Una vez identificada la amplitud principal ( $A_1$ ) y las amplitudes adyacentes ( $A_2$  y  $A_3$ ), es aplicada la Ecuación 31 para obtener el valor del indicador de daño. El valor del indicador de daño para la estructura sana y corrosión interna son 1.2588 y 1.2260, respectivamente.

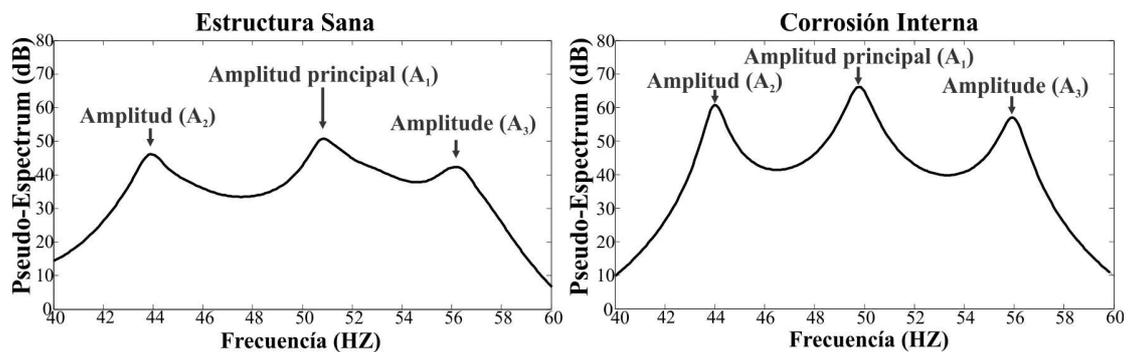


Figura 3.20. Pseudo-espectro de ambas señales.

### 3.6.2 Diseño y entrenamiento de la red neuronal

En este estudio, la arquitectura de una red multicapa es empleada para la identificación, localización y cuantificación de múltiples daños estructurales. La red neuronal propuesta consiste de 5 nodos de entrada, los cuales reciben los valores obtenidos por el pseudo-espectro aplicado a la señal de vibración, adquiridos por cada sensor (5 sensores colocados en cada uno de los cinco cubos). La red neuronal tiene 70 nodos en la capa oculta, y 12 nodos de salida, donde 4 de ellos son empleados para la identificación de la condición de la estructura, estructura sana, corrosión externa, cracks y corrosión interna, 3 nodos son empleados para cuantificar la severidad del daño, el cual se clasificó en ligero, moderado y severo, y los últimos 5 nodos son empleados para localizar el daño, primer cubo, segundo cubo, tercer cubo, cuarto cubo y quinto cubo. Los nodos en la capa oculta y la capa de salida emplean una función de activación Logsig. La red neuronal

propuesta es implementada en MATLAB y es entrenada usando un algoritmo back-propagation.

Un criterio  $3\sigma$  es empleado para calcular la zona del valor del indicador de daño. El criterio  $3\sigma$  radica dentro del rango  $[-3\sigma, 3\sigma]$  y captura el 99.73% de la probabilidad que una correcta decisión ha sido tomada con los valores entre estos rangos. El conjunto de datos de entrenamiento para cada condición de daño fueron obtenidos sintéticamente produciendo 200 valores del indicador de daño aleatoriamente dentro del rango  $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ , donde  $\mu$  es la media, y  $\sigma$  es la desviación estándar de los valores del indicador de daño calculados de las señales reales de vibración adquiridas de la estructura Truss en 10 pruebas. Cada conjunto de los 10 valores del índice de daño es empleado como conjunto de validación para identificar la condición del correspondiente daño, su localización y cuantificar la severidad del daño. La Figura 3.21 muestra el valor del indicador de daño estimado del sensor-1 ( $DIV_1$ ), para ello se muestran funciones Gaussianas para las tres condiciones de daño, su localización y su severidad, respectivamente. Estos datos (media y desviación estándar) fueron obtenidos a partir de las 10 pruebas realizadas para cada condición de la estructura. Es posible observar que cada condición de daño tiene diferente sensibilidad y esto se debe a su localización y a la severidad del mismo. Adicionalmente, se observa que algunas áreas se traslapan (e.g., corrosión externa-severidad alta para el caso de sano y daño en el cubo-2). Sin embargo, el valor del indicador de daño corresponde al sensor-1 y hay otros cuatro valores de indicadores de daño (sensores 2-5) que son aplicados a la red neuronal como se explica en la siguiente sección.

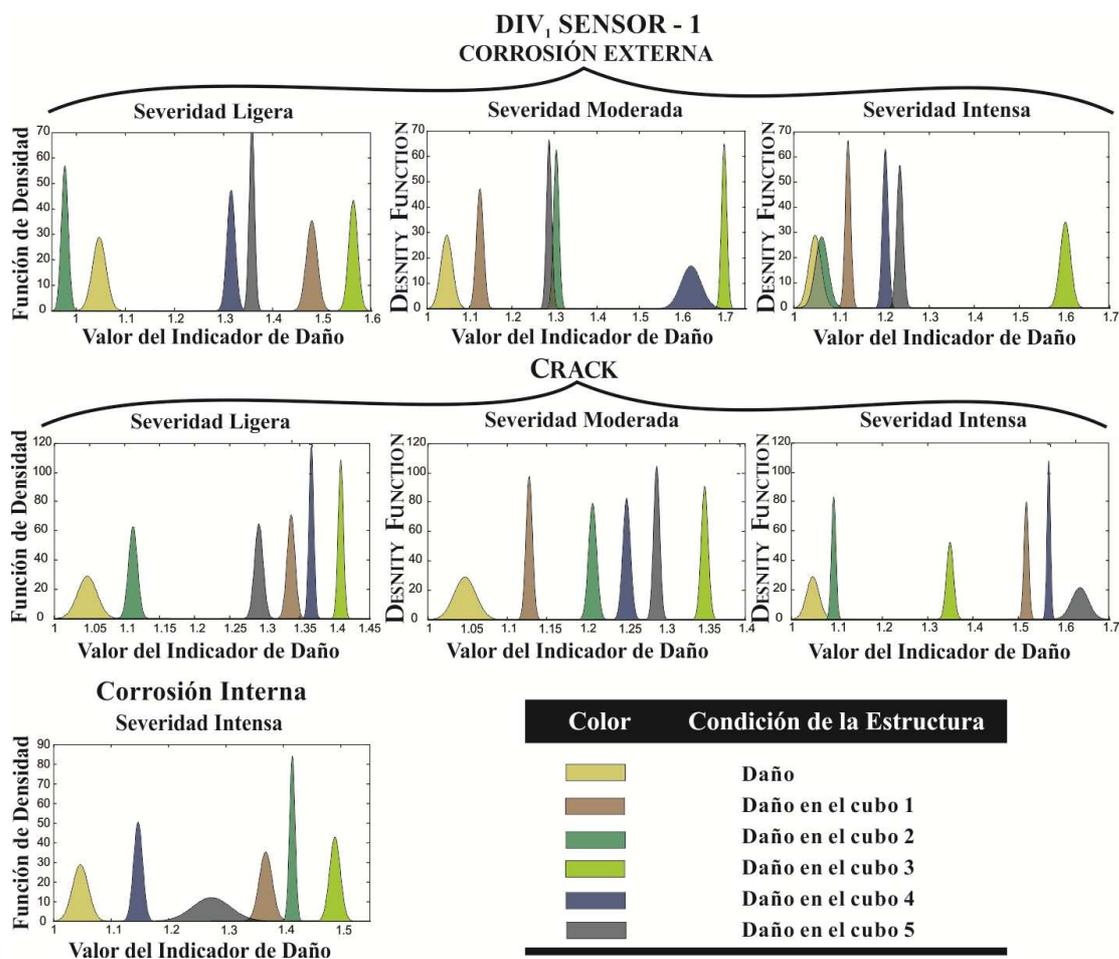


Figura 3.21. Funciones Gaussianas del valor del indicador de daño del sensor-1.

### 3.6.3 Proceso MUSIC-ANN

La Figura 3.22 muestra el proceso aplicado para la detección, localización y cuantificación de las diferentes condiciones de daño para la estructura truss. El proceso MUSIC-ANN está compuesto por dos bloques principales: El algoritmo MUSIC para computar el valor del indicador de daño ( $DIV_1$ ,  $DIV_2$ ,  $DIV_3$ ,  $DIV_4$ ,  $DIV_5$ ) de la señal de vibración de cada sensor y la ANN que identifica la condición de la estructura (Sana, corrosión externa, cracks, y corrosión interna) localiza el daño (primer-cubo, segundo-cubo, tercer-cubo, cuarto-cubo y quinto-cubo) y cuantifica

el daño (severidad ligera, severidad moderada y severidad intensa) a partir de los valores indicadores de daño estimados en la estructura Truss.

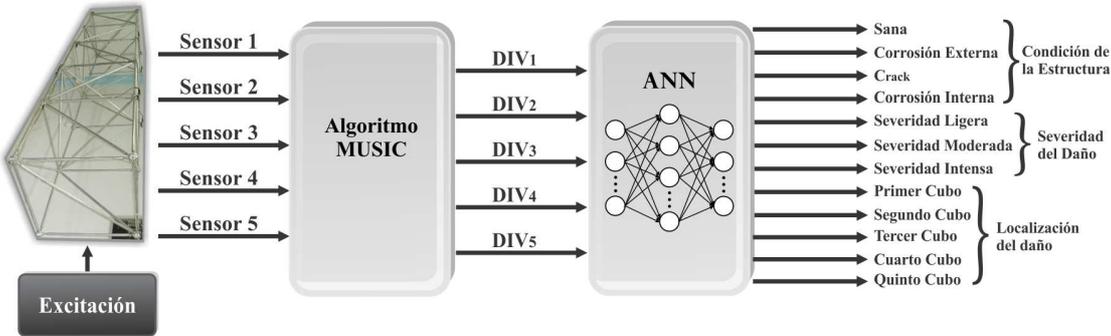


Figura 3.22. Proceso MUSIC-ANN.

## 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se muestran y discuten los resultados obtenidos con las metodologías propuestas.

### 4.1 Desarrollo tecnológico

Como desarrollo tecnológico se diseñó y construyó una tarjeta capaz de sintetizar formas digitales de onda arbitrarias.

#### 4.1.1 Tarjeta para generar señales basada en FPGA.

Uno de los elementos indispensables para poder excitar una estructura son los sintetizadores digitales de formas de onda. En este trabajo se desarrolló una tarjeta sintetizadora digital de formas de onda de propósito general de bajo costo y con buenas prestaciones que permitiera excitar la estructura con señales de terremotos, vibraciones ambientales, entre otras. La tarjeta desarrollada se muestra en la Figura 4.1, donde se observa la vista superior e inferior de la misma.

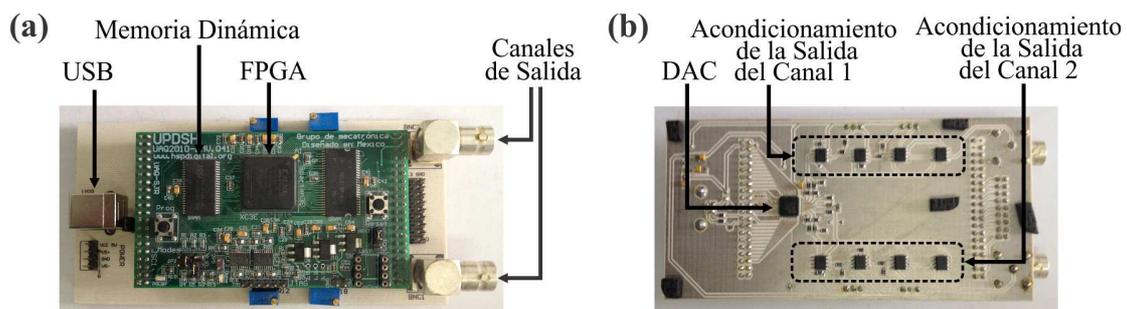


Figura 4.1. Tarjeta sintetizadora digital de formas de onda.

Las principales características de esta tarjeta de son:

- Conexión USB para transmisión de datos.
- 2 Canales analógicos de salida.

- Convertidor DAC hasta 125MPS por canal.
- Control de offset y de amplitud de la señal de salida.
- Máxima amplitud de la señal en ambas salidas ( $\pm 5V$ ).

#### 4.1.2 Descripción del sistema de excitación

Para poder corroborar la eficiencia de la tarjeta generadora de señales junto con el sistema de excitación se propuso el siguiente experimento (ver figura 4.2.). La tarjeta sintetizadora digital de formas de onda está conectada al amplificador comercial PA-141, este a su vez está conectado al shaker electrodinámico ET-127, el cual es el encargado de representar la señal que genere el sintetizador. Para poder monitorear el movimiento del shaker un acelerómetro modelo LIS3L02AS4 de STMicroelectronics es colocado en la parte superior del shaker como se puede observar en la Figura 4.2.

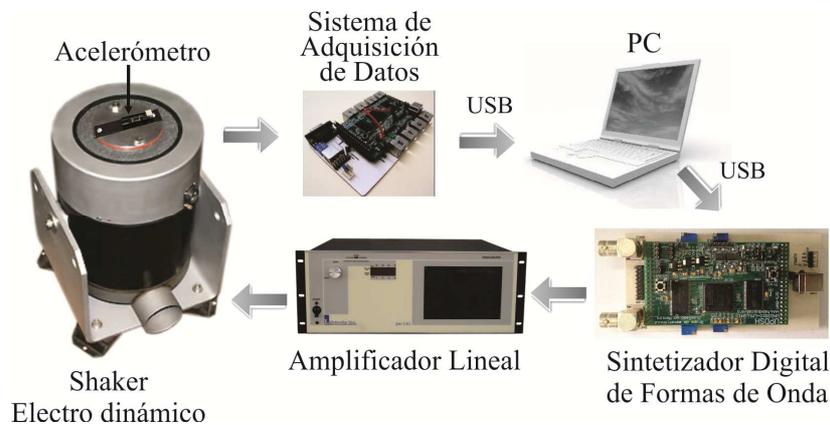


Figura 4.2. Sistema de excitación.

#### 4.1.3 Casos de estudio

Con la finalidad de validar la eficiencia del sistema de excitación, tres casos de estudios son propuestos. El primer caso de estudio se concentró en la

reproducción de una señal de terremoto. En segundo caso de estudio se enfocó a la reproducción de señales ambientales. El tercer caso de estudio se orientó a la reproducción de señales sintéticas.

En el primer experimento, el terremoto de México 1985 es empleado para que lo reproduzca el sistema de excitación.

En el segundo experimento, una señal de vibración ambiental causada por el tráfico es empleada para probar el sistema. La vibración empleada fue monitoreada en línea a través de dos acelerómetros tri-axiales montados en un puente rígido (ver figura 4.4a)

Finalmente, en el último experimento, la eficiencia del sistema es probada reproduciendo un barrido de una señal sinusoidal con un rango de frecuencia de 10 hasta 15 Hz.

#### 4.1.4 Resultados

En esta sección, los resultados de los experimentos propuestos son mostrados.

##### 4.1.4.1 Terremotos

Siguiendo la metodología propuesta, la aceleración grabada del terremoto de México 1985 es cargado en la interfaz gráfica (ver figura 4.3a). A continuación, la señal cargada es escalada hasta  $0.97 \text{ cm s}^{-2}$  de máxima aceleración,  $0.383 \text{ cm s}^{-1}$  de máxima velocidad y  $0.18 \text{ cm}$  máximo de desplazamiento. Adicionalmente, la región de máxima aceleración, 22 hasta 80 segundos (ver figura 4.3b), es seleccionada para ser reproducida por el shaker. La respuesta del sistema se muestra en la Figura 4.3c, la señal reproducida es comparada con la señal experimental obtenida, demostrando que el sistema es capaz de reproducir la señal con las mismas características que la señal generada por la interfaz gráfica.

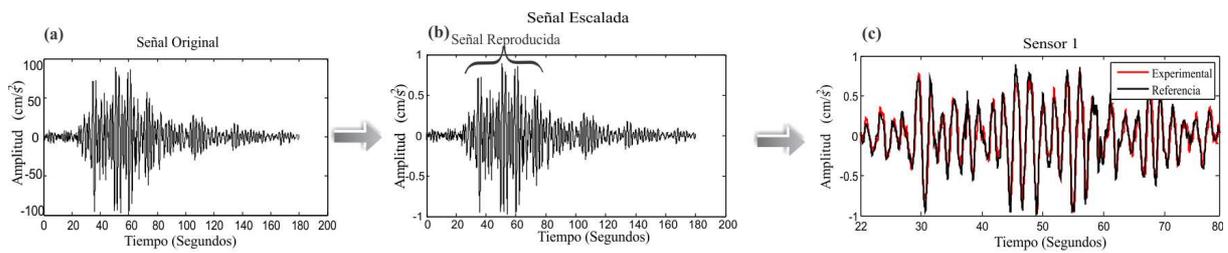


Figura 4.3. Terremoto de México 1985.

#### 4.1.4.2 Vibración ambiental

En la misma forma como la prueba anterior, la aceleración producida por el tráfico en el puente, es cargada en la interfaz gráfica (ver figura 4.4b). Para este experimento, la señal no es escalada ya que esta no presenta grandes desplazamientos. La señal cargada tiene las siguientes características:  $52.2 \text{ cm s}^{-2}$  de máxima aceleración,  $2.48 \text{ cm s}^{-1}$  de máxima velocidad, y  $0.15$  de máximo desplazamiento. Además, la región de máxima aceleración, 505 hasta 525 segundos (ver figura 4.4b), es seleccionada para ser reproducida por el shaker. Al igual que en el experimento anterior, la señal reproducida es comparada con la señal experimental obtenida (ver figura 4.4c), donde es posible observar que el sistema es capaz de reproducir la señal generada por la interfaz gráfica con mucha precisión.

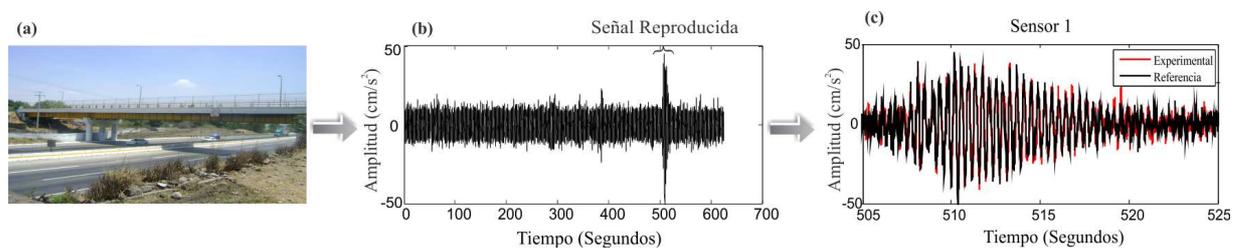


Figura 4.4. Vibración ambiental.

#### 4.1.4.3 Señal sintética

A diferencia de los dos casos anteriores, la herramienta “Chirp signal” fue empleada para generar la señal. La señal generada tiene las siguientes características: 10KHz de frecuencia de muestreo, 20 segundos de señal, 1060  $\text{cm s}^{-2}$  de máxima aceleración, 14.06  $\text{cm s}^{-1}$  de máxima velocidad y 0.15 cm de máximo desplazamiento; por lo tanto, el escalamiento no es necesario (ver figura 4.5a). Similar a los dos casos anteriores, la señal reproducida es comparada con la señal experimental obtenida, demostrando que el sistema es capaz de reproducir la señal con las mismas características que la señal generada por la interfaz grafica (ver figura 4.5b). Un zoom de la señal se muestra en la Figura 4.5c.

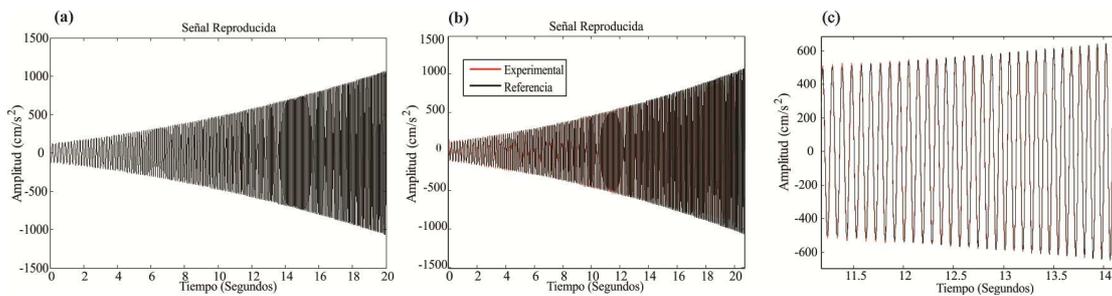


Figura 4.5. Señal sintética.

#### 4.1.4.4 Discusión

Los resultados muestran que el sistema de excitación propuesto tiene una gran precisión y es capaz de reproducir la señal con las mismas características que la señal generada por la interfaz gráfica. La Tabla 3 muestra el error relativo en porcentaje de la reproducción de la señal. Como se puede observar se obtiene un error máximo de 5.42% (caso terremoto México 1985), lo cual es muy aceptable y permiten demostrar que el sistema es muy eficiente.

Tabla 3. Error de la señal reproducida.

Señal reproducida	Error Relativo (%)
Terremoto México 1985	5.4248
Vibración ambiental	2.6481
Señal sintética	3.2183

## 4.2 Desarrollo científico

Como desarrollo científico se propuso un sistema de monitoreo capaz de identificar, localizar y cuantificar la severidad de las fallas a partir de los algoritmos de procesamiento de señales e indicadores de daño propuestos.

### 4.2.1 Descripción de la experimentación

La puesta de experimento se muestra en la Figura 4.6, donde se observa la localización de cada acelerómetro empleado para monitorear el comportamiento de una estructura del tipo Truss reconfigurable (ver figura 4.6a). Los acelerómetros empleados son las unidades LIS3L02AS4 de STMicroelectronics (ver figura 4.6c). Las señales obtenidas de la red de sensores son almacenadas en un sistema de adquisición (SAD) y enviados a la PC por medio del protocolo USB (ver figura 4.6d). La frecuencia de muestreo es fijada a 3.2KHz obteniendo 48000 muestras durante un tiempo de 15 segundos. Para realizar el análisis modal, un shaker electrodinámico de Labworks modelo ET-127 alimentado por un amplificador lineal de Labworks modelo PA-141 son empleados como fuente de excitación (ver figura 4.6b). Simultáneamente, el amplificador es alimentado por el sintetizador digital de forma de onda (ver figura 4.6d).

Con la finalidad de reducir tiempo computacional y para optimizar el cálculo del valor del indicador de daño, la señal adquirida es diezmada para limitar el rango de la frecuencia, y obtener una relación señal a ruido menor (Rangel *et al.*, 2009). La señal de vibración adquirida es diezmada 10 veces para limitar la frecuencia de

muestreo a 320 Hz y un rango de frecuencia de 0 hasta 160 Hz, ya que la región de interés radica por debajo de los 150 Hz. El experimento propuesto emplea un barrido sinusoidal con un rango de frecuencia de 15 Hz hasta 150 Hz durante 15 segundos para excitar la estructura. La Figura 4.7 muestra la localización de los diferentes daños aplicados a la estructura.

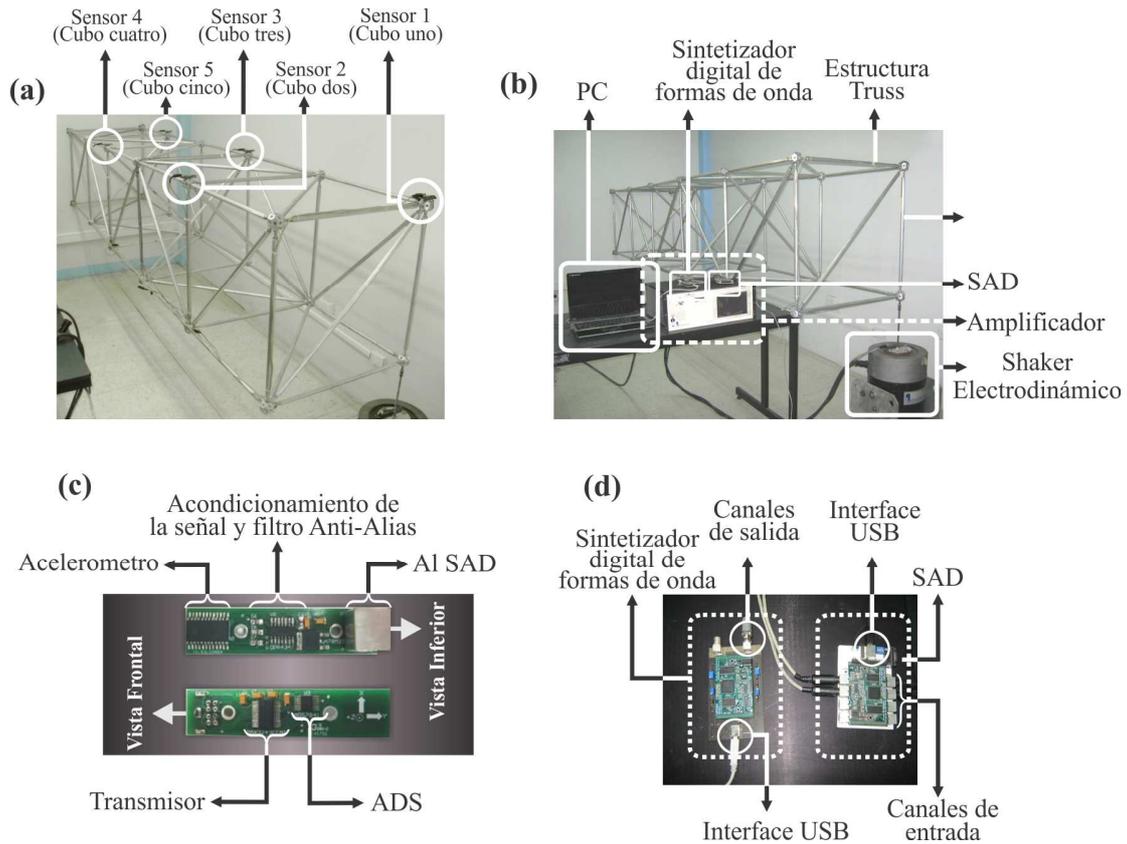


Figura 4.6. Puesta de experimento. a) Estructura bajo estudio, b) Sistema completo, c) Acelerómetro, d) Sintetizador digital de formas de onda y sistema de adquisición de datos.

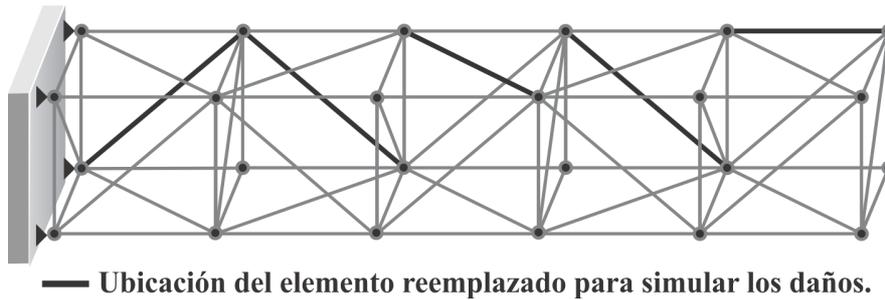


Figura 4.7. Localización de los daños aplicados en la estructura.

#### 4.2.2 Casos de estudio

Con la finalidad de validar la metodología propuesta, varios tipos de daños incluyendo corrosión externa e interna y cracks son propuestos en este trabajo.

La corrosión es uno de los mecanismos más dañinos en muchas de las estructuras civiles. Para entender mejor como el crecimiento de la corrosión afecta el comportamiento de la estructura, dos casos de corrosión son estudiados: corrosión externa y corrosión interna. Como la corrosión se produce normalmente durante un periodo largo de tiempo, el proceso de corrosión externa fue acelerado sumergiendo ambos extremos de una barra en ácido hidrociorídrico. El resultado de la corrosión es muy similar a la corrosión uniforme que ocurre típicamente en estructuras civiles. La corrosión externa en el elemento barra fue generada gradualmente con la finalidad de observar el comportamiento de la estructura bajo diferentes condiciones de severidad del daño. La Figura 4.8a muestra la comparación entre una barra sana y la barra dañada con corrosión externa. El diámetro menor para ligero, moderado e intensa severidad del daño son 17.5 mm, 16.5 mm, y 15 mm, respectivamente, y el elemento barra sano tiene un diámetro de 19 mm.

Por otro lado, para simular el daño por corrosión interna, un elemento de tubo hueco se utiliza en lugar de una barra sólida, por lo tanto, este elemento de la barra se considera que tiene una severidad intensa de daño. Las dimensiones de los elementos de tubo son 19 mm para el diámetro exterior y 16.5 mm para el

diámetro interno. La Figura 4.8b muestra la comparación entre el elemento de barra saludable y el elemento de tubo dañado.

Cracks son otro tipo de daño que ocurre frecuentemente en las estructuras civiles; entonces, para simular este daño en la estructura, una segueta es empleada para cortar una sección del elemento barra. La Figura 4.8c muestra la comparación entre el elemento barra sano y el elemento barra dañada con crack. La profundidad del crack para ligera, moderada e intensa severidad del daño son 2 mm, 5 mm, y 9 mm, respectivamente.

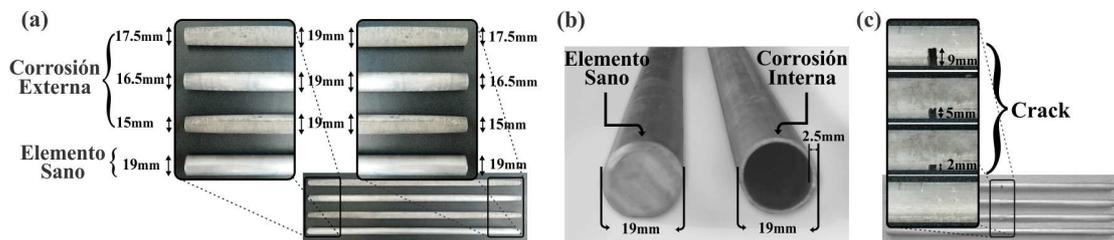


Figura 4.8. Daños bajo estudio. a) Corrosión externa, b) Corrosión interna, c) Cracks.

### 4.2.3 Resultados

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos por la metodología propuesta aplicada a la estructura del tipo truss para la identificación, localización y cuantificación de tres daños diferentes. Esta tabla presenta la efectividad alta de la fusión propuesta MUSIC-ANN en llevar a cabo el monitoreo de la condición de la estructura. De las siete imágenes de la función de densidad vs., valor del indicador de daño mostrado en la Figura 3.21, se puede observar que solamente dos señales (corrosión externa con severidad moderada y severidad intensa, respectivamente) muestran un traslape. Debe ser notado que las imágenes de la Figura 3.21 corresponden al análisis de las amplitudes de las frecuencias naturales con el algoritmo MUSIC del sensor 1 solamente, y este análisis es también aplicado a otros cuatro sensores. Los resultados del análisis de las amplitudes de los cinco sensores son las entradas de la ANN, la cual está

conformada por 70 nodos en la capa oculta, y 12 nodos de salida para predecir de una forma automática la condición de la estructura. De los nodos de salida de la ANN es posible obtener un 100% de certeza para todos los casos de estudio, la decisión correcta para identificación, localización y cuantificación de severidad de tres distintos daños aplicados a la estructura como se puede observar en la Tabla 4. Los resultados incluyen la identificación de la condición sana y la identificación de varios daños, así como, la localización y cuantificación de los diferentes daños propuestos. Para todos los casos, 10 pruebas fueron realizadas con la finalidad de adquirir la señal de vibración de la estructura excitada por un shaker electrodinámico.

Tabla 4. Eficiencia de la metodología propuesta para identificar la condición de la estructura, cuantificar la severidad del daño y localizar el daño.

CONDICIÓN DE LA ESTRUCTURA		LOCALIZACIÓN DEL DAÑO				
		CUBO-1	CUBO-2	CUBO-3	CUBO-4	CUBO-5
CORROSIÓN	LIGERA	10/10	100%	100%	100%	100%
EXTERNA	MODERADA	10/10	100%	100%	100%	100%
	INTENSA	100%	100%	100%	100%	100%
	LIGERA	100%	100%	100%	100%	100%
CRACK	MODERADA	100%	100%	100%	100%	100%
	INTENSA	100%	100%	90%	100%	100%
CORROSIÓN	INTENSA	100%	100%	100%	100%	100%
INTERNA						
	SANA			100%		

#### 4.2.4 Discusión

Los resultados muestran que la metodología propuesta tiene un 100% de efectividad detectando una estructura sana, una estructura con corrosión externa e

interna, y una estructura con crack. Sin embargo, la detección del crack en el cubo-3 se obtuvo un 90% de certeza, lo cual sigue siendo una eficiencia buena.

Además, la corrosión externa e interna y cracks son las condiciones más difíciles para detectar, ya que su detección depende de la severidad del daño; la severidad intensa es fácil detectar porque afecta en gran medida el comportamiento de la estructura. Sin embargo, la metodología propuesta puede detectar la presencia de cracks y corrosión externa en su estado inicial eficientemente. Además, una característica relevante de la metodología propuesta es la identificación-localización-cuantificación de tres daños distintos empleando un solo indicador de daño de una manera automática a diferencia de la los trabajos propuestos internacionalmente donde un daño único y su localización son estudiados la mayoría de las veces, además de requerir varios indicadores de daño para identificar la condición de la estructura.

## 5. CONCLUSIONES

Las estructuras civiles frecuentemente sufren de daños durante su vida de servicio. Estos daños son principalmente debido a varias causas tales como: movimientos excesivos, corrosión, alta temperaturas, acumulación de crecimiento de crack, degradación de columnas, uniones y vigas, y el impacto de objetos extraños. La acumulación de estos daños puede provocar que la estructura sufra un debilitamiento, lo que puede inducir un daño irreparable y en un dado caso el colapso de la estructura, lo que puede desembocar en la pérdida de humanos y económicas. Como se ha descrito, el monitoreo constante en cualquier estructura, proporciona la información necesaria para conocer la condición de la estructura con el fin de poder detectar fallas en su estado inicial y hacer el correspondiente mantenimiento o en ciertos casos el retiro de esa estructura.

En este trabajo de tesis se presenta una metodología nueva para la detección de daños estructurales por medio de la estimación de los pseudo-espectros empleando el algoritmo MUSIC fusionado con una ANN, con la finalidad de identificar, localizar y cuantificar la severidad de diferentes daños en una estructura del tipo truss de una forma automática basado en el análisis de la amplitud de las frecuencias naturales de la estructura. Los experimentos propuestos demuestran que la metodología propuesta es muy eficiente y fiable para identificar, localizar y cuantificar los tres tipos de daños estudiados, incluso cuando el daño está en una etapa inicial (severidad ligera). Por lo tanto, la fusión propuesta de los algoritmos MUSIC-ANN puede ser considerada una herramienta simple, efectiva y automática, la cual no requiere equipo sofisticado, y permite establecer una metodología para el monitoreo de la condición de la estructura practica y fácil de implementar, la cual ayudaría a evaluar la condición de la estructura, con la finalidad de detectar daños en su estado inicial y hacer el mantenimiento correspondiente, para prevenir la caída o colapso de la estructura, evitando pérdidas humanas y económicas.

Los terremotos son ondas sísmicas que causan las más grandes catástrofes: humanas, económicas y estructurales. Por lo tanto, es necesario tener un sistema capaz de reproducirlas con precisión que permita a los diseñadores de estructuras poder observar su comportamiento bajo esta excitación.

En este trabajo de tesis se propuso un sistema de excitación basado en una interfaz gráfica, un sintetizador digital de forma de onda, un amplificador lineal y un shaker electrodinámico. El sistema tiene diferentes herramientas para generar y modificar señales diferentes ya sea generada o adquirida. Tres experimentos han sido presentados en este trabajo de tesis. En el primer experimento, el sistema demostró ser una herramienta útil para sintetizar, modificar y reproducir señales de terremotos reales con una gran precisión, lo cual es fundamental en el análisis y diseño de estructuras. El segundo y tercer experimento son llevados a cabo para mostrar la eficiencia del sistema para generar o sintetizar otro tipo de señales tales como vibraciones ambientales y señales sintéticas, con el objetivo de conocer otras características como frecuencias naturales. De acuerdo a los resultados obtenidos, el sistema propuesto demostró ser una herramienta útil para poder excitar una estructura como en la vida real y en base a esto poder monitorear su comportamiento ante dicha excitación.

## REFERENCIAS

- Adeyuyi, A. P. y Z. Wu. 2011. Vibration-based damage localization in flexural structures using normalized modal macrostrain techniques from limited measurements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(3):154-172.
- Al-Ibrahim, M. M. 2001. A Novel Coherent Digital Sweep Oscillator with Extremely Low Sweep Rates and Harmonic Distortion. *Active and Passive Electronic Components*. 23:197-217.
- Amezquita-Sanchez J.P., E. Cabal-Yepez, R. J. Romero-Troncoso, R. A. Osornio-Rios, y A. Garcia-Perez. 2010. Determination of system frequencies in mechanical systems during shutdown transient. *Journal of Scientific & Industrial Research* 69(6): 415-421.
- Banks, H. T., M. L. Joyner, B. Wincheski, y W. P. Winfree. 2002. Real time computational algorithms for eddy-current based damage detection. *Inverse Problems*, 18(3):795-823.
- Chávez-Romero, R. 2009. Estudio de Daños en Estructuras usando Análisis Modal en un Modelo Instrumentado. Tesis Maestría UAQ.
- Curadelli, R. O., J. D. Riera, D. Ambrosini, y M. G. Amani. 2008. Damage detection by means of structural damping identification. *Engineering Structures* 30:3497-3504.
- Domínguez, A., I. Stiharu, y R. Sedaghati. 2006. Practical design optimization of truss structures using the genetic algorithms. *Research in Engineering Design*. 17:73-84.

- Farrar, C. L., y K. Worden. 2007. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365:303-315.
- Garcia-Perez A, R. J. Romero-Troncoso, E. Cabal-Yepez, y R. A. Osornio-Rios. 2011. Application of high-resolution spectral analysis for identifying faults in induction motors by means of sound. *Journal of Vibration and Control* Epub ahead of print 18 October 2011. doi: 10.1177/ 1077546311422925.
- González-Pérez, G., y J. Valdés-González. 2011. Identification of Structural Damage in a Vehicular Bridge using Artificial Neural Networks. *Structural Health Monitoring*, 10(1):33-48.
- Guo, H. Y., L. Zhang, y J. X. Zhou. 2004. Optimal placement of sensors for structural health monitoring using improved genetic algorithms. *Smart materials and Structures*, 13(3):528-534.
- Harris, F.2007. Ultra Low Phase Noise DSP Oscillator [DSP Tips & Tricks]. *IEEE, Signal Processing Magazine*. 24:121-124.
- Irwin, J. D., y E. R. Graf. 1979. *Industrial noise and vibration control*. Prentice Hall, New Jersey.
- Jian, G., C. Yong, y S. Bing-nan. 2005. Experimental study of structural damage identification based on WPT and coupling NN. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, 6A(7):663-669.
- Jiang, X. y H. Adeli. 2007. Pseudospectra, MUSIC, and dynamic wavelet neural network for damage detection of highrise buildings. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 71(5):606-629.

- Li, H., Y. Huang, W. L. Chen, M. L. Ma, D. W. Tao, y J. P. Ou. 2011. Estimation and Warning of Fatigue Damage of FRP Stay Cables Based on Acoustic Emission Techniques and Fractal Theory. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26:500–512.
- Mehrjoo, M., N. Khaji, H. Moharrami, y A. Bahreininejad. 2008. Damage detection of truss bridge joints using artificial neural networks. *Expert System with Applications*, 35(3):1122-1131.
- Nishikawa, T., J. Yoshida, T. Sugiyama, y Y. Fujino. 2012. Concrete Crack Detection by Multiple Sequential Image Filtering. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27:29–47.
- Osornio-Rios, R. A., R. J. Romero-Troncoso, G. Herrera-Ruiz, y R. Castañeda-Miranda. 2008. The application of reconfigurable logic to high speed CNC milling machines controllers. *Control Engineering Practice*. 16:674-684.
- Osornio-Rios, R. A., R. J. Romero-Troncoso, G. Herrera-Ruiz, y R. Castañeda-Miranda. 2009. FPGA implementation of higher degree polynomial acceleration profiles for peak jerk reduction in servomotors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 25:379-392.
- Paz-Anaya, M. 2009. Diseño, fabricación y análisis de vibraciones por medio de elemento finito de una estructura tridimensional reconfigurable. Tesis de Licenciatura UAQ.
- Proakis, J. G., y D. K. Manolakis. 2006. *Digital Signal Processing, Principles and Applications*, Fourth Edition, Prentice-Hall, New Jersey, USA.

- Rangel-Magdaleno, J. J. 2008. Análisis de vibraciones en tiempo real para maquinaria CNC. Protocolo doctoral UAQ.
- Rangel-Magdaleno, J. J., R. J. Romero-Troncoso, R. A. Osornio-Rios, E. Cabal-Yepez, y L. M. Contreras-Medina. 2009. Novel methodology for on line half-broken-bar Detection on induction motors. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. 58:1690-1698.
- Reda, M. M., A. Noureldin, J. L. Lucero, y T. J. Baca. 2006. Wavelet transform for structural health monitoring: A compendium of uses and features. Structural Health Monitoring, 5:267-295.
- Rodríguez-Doñate, C. 2009. Procesamiento digital de señales en FPGA para análisis de vibraciones en robots industriales. Protocolo doctoral UAQ.
- Romero-Troncoso, R. J. y G. Espinosa-Flores. 1999. Phase accumulator synthesis algorithm for DDS applications. Electronic Letters, 35:770-772.
- Romero-Troncoso, R. J., G. Herrera-Ruiz, I. Terol-Villalobos, y J. C. Jáuregui-Correa. 2004. FPGA based on-line tool breakage detection system for CNC milling machines. Mechatronics. 14:439-454.
- Strollo, A.G.M., E. Napoli, y D. De Caro. 2003. Direct digital frequency synthesizers using first-order polynomial Chebyshev approximation. Solid-State Circuits Conference, 2002. ESSCIRC 2002. Proceedings of the 28th European.
- 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.

- Talebinejad, I., C. Fischer, y F. Ansari. 2011. Numerical Evaluation of Vibration-Based Methods for Damage Assessment of Cable-Stayed Bridges. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26(3):239–251.
- Tang, J. P., D. J. Chio, C. W. Chen, W. L. Chiang, W. K. Hsu, C. Y. Chen, y T. Y. Liu. 2011. A case study of damage detection in benchmark buildings using a Hilbert–Huang transform-based method. *Journal of Vibration and Control*, 17(4): 623-636.
- Trejo, M. 2006. Sensado, análisis, modelado y optimización de las condiciones de corte para tornos CNC. Protocolo doctoral UAQ.
- Tuzzeo, D., y F. L. di Scalea. 2002. Non-contact air-coupled ultrasonic guided waves for detection of hidden corrosion in aluminum plates. *Journal of Research in Nondestructive Evaluation*, 13(2):61-78.
- Umesha, P. K., R. Ravichandran, y K. Sivasubramanian. 2009. Crack detection and quantification in beams using wavelets. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(8):593-607.
- Vela-Martínez, T. 2005. Modelación no lineal de las vibraciones autoinducidas en sistemas de maquinado. Protocolo doctoral UAQ.
- Vossoughi, F., C. P. Ostertag, P. J. M. Monteiro, y R. D. Albert. 2007. Damage characterization of concrete panels due to impact loading by motionless X-ray laminography. *Journal of Materials Science*, 42(9):3280-3285.
- Wen, C. H., H. Y. Hsu, H. Y. Ko, y A. Y. Wu. 2004. Least squares approximation-based ROM-free direct digital frequency synthesizer. *Circuits and Systems. ISCAS '04. Proceedings of the 2004 International Symposium on.*

- Xiang, J. y M. Liang. 2012. Wavelet-based detection of beam cracks using modal shape and frequency measurements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27: 439-454.
- Yan, B. y A. Miyamoto. 2006. A comparative study of modal parameter identification based on Wavelet and Hilbert–Huang transforms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21(1):9-23.
- Zang, C., M. I. Friswell, y M. Imregun. 2004. Structural damage detection using independent component analysis. *Structural Health Monitoring*, 3(1):69-83.

## **ANEXO A**

## Vibration control on smart civil structures: A review

Juan Pablo Amezcua-Sanchez<sup>1</sup>, Aurelio Dominguez-Gonzalez<sup>1</sup>, Ramin Sedaghati<sup>2</sup>, Rene Romero-Troncoso<sup>1</sup>, Roque Osornio-Rios<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>HSPdigital Research Group, C. A. Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Campus San Juan del Río, Universidad Autónoma de Querétaro, Moctezuma 249, Col. San Cayetano, 76807 San Juan del Río, Querétaro, México.

<sup>2</sup>Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, 1455 de Maisonneuve Boulevard, West Montreal, QC, H3G 1M8, Canada.

**Abstract:** Smart civil structures are capable of partially compensate the undesirable effects due to external perturbations; they sense and react to the environment in a predictable and desirable form through the integration of several elements such as sensors, actuators, signal processors and power sources working with control strategies. This paper will focus on the review the main control techniques applied to suppress vibrations in civil structures using smart materials, remarking the advantages and disadvantages of smart actuators and control strategies tendencies in smart civil structures.

**Key words:** Smart civil structures, Smart sensors, Smart actuators, Vibration control techniques.

### 1. INTRODUCTION

Civil structures play an important role in several engineering areas, where they have the main function of supporting elements. Their designs are limited to the use of materials with low damping and they depend on its stiffness for supporting loads. Hence, they have low capacity to dissipate energy and cannot be adapted to sudden excitation changes that could produce damages on the structure or collapse it. An alternative to solve these limitations is through designs in which the amount of materials for obtaining higher stiffness is increased or the use of ductile materials that allow more flexibility in the structure. Moreover, these limitations have led researchers to investigate new alternatives as the use of materials and systems that automatically allow compensating undesirable perturbations. Such perturbations have promoted the concept of intelligent/adaptive/adaptronic/active civil structure [1, 2] featuring low costs and not requiring additional material in the design as well as having a major capacity of energy dissipation to avoid damages in the structures compared to other designs that offer partial solutions.

Intelligent/adaptive/adaptronic/active structures are a subset of smart structures [3, 4]. An ideal smart civil structure is defined as a structure capable of compensating all the undesirable external perturbations; it also senses and reacts to the environment in a predictable, desirable way through the integration of several elements: sensors, actuators, signal processors and power sources [5]. Figure 1 shows a general block diagram of the close-loop control of a smart civil structure in which vibration signals are initially monitored by sensors. Then the information is conditioned and processed and the control system generates the appropriate waveform for exciting the actuator that compensates the exterior-generated vibrations in the structures.

An important aspect for monitoring and dissipating energy on civil structures is the use of sensors and actuators built with smart materials because they can be embedded or mounted without causing significant modifications in the mass or stiffness of the structure [6]. The use of smart materials and recent advances in the digital signal processing has promoted interest in the vibration control on structures. Owing to this, various control algorithms have been proposed, which can be classified into three groups: active, semi-active and passive control [7, 8].

This paper provides an important direction where the current state-of-the-art research is headed in the development of the vibration control strategies using smart materials applied to control civil structures. The paper is divided into four sections: the first one presents the control techniques employed for suppressing vibrations on civil structures using smart materials; the second section shows different types of smart actuators used on these structures to control them. Third section shows the implementation cost of control strategies and some application examples. Finally, conclusions are presented in the last section.

### 2. VIBRATION CONTROL STRATEGIES

---

\* Corresponding author E-mail address: [raosornio@hspdigital.org](mailto:raosornio@hspdigital.org), Tel.: +52-427-2741244

Summarized in Figure 2, vibration control strategies for smart civil structures could be generally classified into three categories: active, semi-active and passive control. In active control, an external power source controls the actuators to apply forces onto the object structures. The semi-active control devices use considerably less energy to adjust the structural properties than the active control devices do. The passive control method is activated by the structural motion. No external force or energy is applied to perform the control [9].

Based on mathematical modeling, the active and semi-active control of structures can be classified as i) classic control and ii) modern control. Vibration control strategies are described in this section; their advantages and disadvantages.

### 2.1. Mathematical modeling of a civil structure

According to [10] the first step in designing of a control system is to build a mathematical model of the structures and disturbances. Based on the mathematical model, a controller can be designed to provide desirable performance. Civil structures are modeled by using the general equation of motion [8], which governs the dynamic equilibrium amongst the external, elastic, inertia and damping forces acting on structure described by

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = F + F_c \quad (1)$$

where  $M$ ,  $C$  and  $K$  are the mass, damping and stiffness matrices, respectively,  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$ ,  $x$ ,  $F$  and  $F_c$  are the acceleration, velocity, position, the vector of physical applied forces at various degrees of freedom and control vector respectively. The damping matrix  $C$  represents various dissipation mechanisms in the structure, which are usually not so widely known [11].

### 2.2. Classic control

The main classic controls used for active and semi-active vibration controlling in civil structures are summarized in this section.

#### 2.2.1. PID control

One of the utilized control law in civil structures is Proportional Integral Derivative (PID) controller due to it can be easily implemented and has fast response [17, 18]. In figure 3 a diagram of the PID controller implementation is presented, where  $K_p$  is the proportional gain,  $K_i$  is the integral gain and  $K_d$  is the derivative gain. Suhariyono et al. [18] proposed the use of a digital PID for controlling a lightweight piezo-composite actuator (LIPCA). The experimental results showed that the LIPCA can effectively suppress free vibration of the aluminum beam, compared to the bare PZT and the 3GE + PZT actuator. Russ et al. [19]. presented a numerical analysis for simultaneous precision positioning and vibration suppression of smart composite beam structures with piezoelectric flat patches acting as actuators. Two types of PID controllers: PID vibration suppression (PID-VS) and PID simultaneous precision positioning and vibration suppression (PID-SPPVS) controller were proposed. The results showed that the FEA model with integrated PID-SPPVS controller is capable of reaching the desired position in a much shorter time in comparison to the PID-VS controller. Vibration amplitude reduction capabilities for the both PID controllers are very similar, although the PID-VS controller performs slightly better. A modified PID controller called PID iterative learning control for vibration control on a cantilever plate was presented by Xiaojin et al. [20]. Their discussion was focused on an analytic method based upon ANSYS: the aim was to obtain the output of the sensor under certain input of the actuators, as well as under certain input of the driving-point and MATLAB to get the system identification model. Based on this, the control was tuned further on. Aguirre et al. [21] presents a semi-active control strategy based on the same idea of “clipping” the voltage signal but using a simpler PI design to control a frame structure using MR dampers. Effectiveness of the control strategy is compared to some others techniques and passive cases as well. Simulation results showed that this simple strategy can effectively improve the structural responses and achieve performance index comparable to that of more complex algorithms.

Although PID controller presents great advantages, several disadvantages have limited the use of PID controller in civil structures. It can control only one variable as well as simple input simple output (SISO). It cannot control dynamic systems; it is inefficient to the variation of the structure parameters caused by the sensor and actuator embedded in the structure and necessary to know the system parameters for its tuning [22].

### 2.2.2. Positive position feedback

One of the trends in the control of civil structures is the use of positive position feedback (PPF) controller, due to the fact that it can tackle the target mode without disturbing other modes; it is insensitive to spillover and the transfer function of the single input and single-output (SISO) PPF controller is equal to the one of a simple low-pass filter circuit, allowing it to be easily realized by either an operational amplifier or a microprocessor [23, 24]. For the reasons above stated, the PPF controller has been widely used as the active vibration controller for smart civil structures [24-31]. In Figure 4 a general diagram of the PPF controller implementation is depicted, where  $\zeta$  is the damping of the structure,  $\zeta_f$  is the compensator damping,  $\omega_n$

is the structure natural frequency  $\omega_f$  is the compensator frequency and  $g$  is a positive gain. Concerning to the use of this control law, Kwak et al. [23] developed an algorithm, which can adaptively trace the optimal PPF filter frequency in real time. The experimental results displayed that the adaptive PPF controller is capable of tuning the PPF filter frequency to the optimal one in real time thus achieving vibration suppression of a beam in changing environments. Baillargeon et al. [25] reported experimental and numerical analysis of the use of PPF to control shear actuators for the reduction on the vibrations of a sandwich beam. They found that the reduction in steady-state tip acceleration at the fundamental frequency is 30.2 dB.

Adaptive approaches have been added to PPF to improve the efficiency of the controller [30]. A least mean square method has also been used to perform online system identification for updating the PPF gains [31]. A new method of modified positive position feedback (MPPF) is recently introduced by Mahmoodi and Ahmadian [27] as an alternative to PPF for vibration control using piezoelectric actuators and sensors. Another similar work is presented by Mahmoodi et al. [28]. They reported an adaptive mechanism, which consists of two main parts: (1) frequency adaptation and (2) adaptive controller. Frequency adaptation only tracks the frequency of vibrations using fast Fourier transforms. The obtained frequency is then fed to MPPF compensators and the adaptive controller. The adaptive controller mechanism consists of a reference model that is of the same order as the MPPF system and its compensators. The experimental results displayed that the frequency adaptation method that is derived has worked quite well and indicated that the MPPF can provide significant vibration reduction on a cantilever beam using piezoelectric actuators and sensor.

The major drawback of PPF is its small gain range. To overcome the last problem, a control method by combining PPF and PD is proposed by Qiu et al. [26].

### 2.2.3. Integral force control

Another method of classic control theory used in the control of civil structures is integral force control (IFC) [32, 33]. The advantage of the IFC is its inherent stability, easy implementation and high efficiency [34]. A diagram of this controller is presented in Figure 5; it consists of a integrator with a gain  $g$ . Such controller is used by Song et al. [33]; they present experimental analysis on active vibration suppression of a truss structure using a lead zirconate titanate (PZT) stack actuator. By using the force transducer as a sensor and the PZT stack as an actuator, an integral plus double-integral force controller was designed to suppress vibration of the structure using one active strut. The results showed a reduction of 14.81 dB in the vibration of the structure.

### 2.2.4. Pole placement control

One of the simplest but most effective methods for active vibration suppression is pole placement control (PPC). In this control strategy, the designer has the flexibility to place the poles at the desired location to achieve the desired performance. Figure 6 shows a general block diagram of PPC which is based on state space model; where  $A$  is the state matrix,  $B$  is the input matrix,  $C$  is the output matrix,  $D$  is the direct transmission matrix,  $x$  is the state variable vector,  $y$  is the output voltage (from the sensor),  $K$  is the feedback gain and  $u$  is the input voltage (pre-amplified voltage actuator). PPC has been successfully implemented by Bu et al. [35] and Scott et al. [36] for control of the first mode of flexible beams. Sethi and Song [37] reported an experimental analysis for vibration control of a scaled building model of three-floors using piezoceramic patches as actuator and sensor. The experimental results displayed substantial decibel reductions achieved in the first three modes of the structure.

Although PPC presents great advantages such as easy implantation and fast response [37], the major drawback of PPC is that, in most practical cases, the state vector is unknown [7].

### 2.2.5. Velocity feedback control

Velocity feedback control (VFC) is another kind of classic control used for vibration control in civil structures such as beam [38] and cable-stayed bridges [39]. This type of control presents several advantages: it can enhance the system damping and therefore, it can effectively control the oscillation amplitude. A block diagram of VFC is shown in Figure 7, it only consists of an amplified feedback with a gain  $g$ . This control is used by Narayanan et al. [38] which presents a numerical study concerning the active vibration control of smart structures. They showcased a comparison between LQR controller and constant-gain negative velocity feedback to investigate their effectiveness to suppress vibrations in beams, plates and shell structures with piezoelectric layers acting as sensors or actuators. The study revealed that the LQR control scheme is very effective in controlling the vibration as the optimal gain is obtained by minimizing the cost function. Classical control methods such as constant-gain negative velocity feedback are quite simple and less effective. Warnitchai et al. [39] proposed an experimental study on active tendon control of cable-stayed bridges using piezoelectric stack as actuators and non-collocated strain gauges as sensors. The result showed that active tendon control using velocity feedback control is very effective for global vertical (pylon) dominated mode. Currently, Pietrzakowski [40] studied the vibration of active rectangular plates using a velocity feedback control. The in-plane spatial variation of the potential is determined by solution of the coupled electromechanical governing equations with natural boundary conditions corresponding to both flexural and electric potential fields. Kirchhoff-type and Mindlin-type theories were employed.

VFC has been successfully applied to many civil engineering structures to dissipate vibration of the structures. Nevertheless, VFC has limitations. VFC is sensitive to spillover; it can introduce unstable oscillations due to sudden feedback voltage changes. It also reduces its effectiveness at low vibration levels for a given voltage limit [39, 41].

## 2.3. Modern control

This sort of control can be divided into three groups: optimal control, sliding mode control, adaptive control and intelligent control.

### 2.3.1. Optimal control

The main optimal controls for vibration control of civil structures are summarized in this section.

#### 2.3.1.1. Linear quadratic regulator (LQR) and linear quadratic gaussian (LQG) control

One of the commonly used methods of modern control theory in the control of civil structures is LQR and LQG [41-50]; as it can control multiple inputs and multiple outputs (MIMO) and attenuated all disturbances within the control bandwidth [43]. LQR and LQG calculate the feedback gain by the minimization of a cost function or performance index, which is proportional to the required measure of the systems response [44]. Vasques and Rodrigues [41] reported a comparison between LQR, LQG controller and classic control to investigate their effectiveness to suppress vibrations in beams with piezoelectric patches acting as sensors or actuators. They observed that the major limitation of the LQR is that all the states must be measured when generating the control. The LQG controller overcomes it by estimating the states using an observer (Figure 8), utilizing noisy partial output information, and some modifications in the LQR performance, which sometimes can improve the efficiency. Ze-bing et al. [42] proposed the use of LQG-clipped-optimal to control 26 MR dampers for effective vibration control on a cable-stayed bridge. The results indicated that union of LQG and MR fluid dampers could effectively be used to control cable-stayed bridges subjected to multiple-support seismic excitations. An iterative version of LQR was presented by Trindade [45]. They presented a numerical analysis of active vibration control using simultaneous extension and shear piezoelectric actuation for a clamped-clamped sandwich beam. The result showed that the computational cost of this iterative algorithm increases greatly with the dimension of the state-space system and the convergence is generally very fast. Zuo et al. [47] proposed the use of LQR to control a SMA damper for effective control of cable vibration under external excitations. The results showed that the cable vibration responses under both LQR active control and SMA damper optimum control are less than those without control.

LQG and LQR controllers have been successfully applied to many civil engineering structures for vibration control. However, LQG and LQR controllers present great disadvantages: they are applicable to structures with known system parameters, limited bandwidth and sensitive to spillover [51].

#### 2.3.1.2. $H_\infty$ and $H_2$ control

Another method of modern control theory used in the control of civil structures is  $H_2$  and  $H_\infty$  [52-55]. It is presented in Figure 9, and consists of finding a causal controller  $K(s)$  which stabilizes the plant  $G(s)$  and minimizes the quadratic performance index. Regarding to the use of this controller, Raja et al. [52] presented a theoretical analysis of vibration control of a tensegrity structure subjected to random excitation using control  $H_2$  and  $H_\infty$ . They showed that the control effectiveness in terms of the rms displacement with  $H_\infty$  control is better in comparison with the  $H_2$  control. Marinova [54] presented a mathematical analysis of  $H_\infty$  and  $H_2$  controllers for active control of vibrations of the composite beam with piezoelectric layers used as sensors and control devices. The numerical results showed that the robust  $H_2$  and  $H_\infty$  controllers are suitable for the suppression of disturbed vibrations of the composite beam with piezoelectric layers. Suzuki and Kagawa [55] presented a mathematical and experimental analysis of  $H_\infty$  to control the first four vibrational modes of a cantilever beam using shape memory alloy (SMA) actuators.

### 2.3.2. Sliding mode control

Currently, Sliding mode control (SMC) has emerged as another method of modern control theory used in the control of civil structures. SMC is an effective method of dealing with uncertainties in both linear and nonlinear dynamic systems. The advantages of this control algorithm is high efficiency, simplicity, and the fact that it does not require any knowledge of a mathematical model, only the control system's order and the ability to measure control disturbances [56]. Showcased in Figure 10, SMC consists of a proportional-derivative (PD) stage and a compensator (Comp).  $g_1$  is a proportional gain which is used to decrease steady-state error and to increase the actuator responsiveness, the derivative control increases the damping and stabilizes the actuators. The filter block, is used to avoid introducing undesired frequencies to the system. The compensator is used to compensate the systems uncertainties and to increase control accuracy and stability [56]. Song and Gu [56] use SMC for active vibration control of a flexible aluminum beam using piezoceramic patch as sensor and actuators. The experimental results demonstrated the efficiency of the proposed controller to varying model parameters and even higher modes dynamics. They observed that the SMC achieves a damping ratio increase of 830% in comparison with the free vibration case. A modified SMC called decentralized sliding mode control (DSMC) for vibration control on a frame using MR dampers was presented by Lu et al. [57]. Their discussion was focused on showing the differences among various control algorithms for the semi-active control studies, including the proposed DSMC, LQR control, and passive-on and passive-off control. Nguyen et al. [58] proposed an adaptive SMC for vibration control of a frame structure embedded with MR dampers. The results showed that an adaptive SMC presents better results than classic SMC.

Although SMC presents great advantages, the major drawback of SMC is its several high control activities, which is not useful for all types of control elements.

### 2.3.3. Adaptive control

Adaptive control (AC) is frequently used for controlling system of which the parameters are uncertain, unknown or slowly varying [59]. This controller is presented in Figure 11; the adaptive controller essentially consists of a real-time system identification technique integrated with a control algorithm. The controller updates the parameters of the plant model based on input and output data. In order to compute a new set of controller parameters is required to update the reference model, and then to compute the next control output. Many authors have investigated the implementation of adaptive control theory to vibration attenuation on civil structures [22, 51]. Yang et al. [22] reported an experimental analysis for vibration suppression on beam. They proposed an adaptive feedback controller design in which the reference signal is synthesized by the error sensor measurement and the system dynamics identification. An infinite impulse response (IIR) adaptive filter is proposed for system identification and the finite impulse response (FIR) adaptive filter for feedback controller. Experimental results showed that the controller performance is strongly influenced by the accuracy of system identification. Yang et al. [51] reported an experimental analysis for vibration suppression on beam. They proposed an adaptive controller based on two steps: an adaptive filter based on ARX model to find the dynamic of the system and an adaptive controller based on filtered-X LMS algorithm to control the vibration on beam. Experimental results showed that the performance of adaptive controller is superior to that of the active damping controller in suppressing transient, steady state, and random excitations.

### 2.3.4. Intelligent control

Intelligent control is based on control methods that emulate some important characteristics of human brain. Three methodologies related to intelligent control have been applied for vibration control on civil structures: Neural Network (NN), Fuzzy logic (FL) and Neuro-Fuzzy (NF).

#### 2.3.4.1. Neural networks

Neural Networks (NN) are simplified models of the biological structure found in human brains. These models consist of elementary processing units (also called neurons). It is the large amount of interconnections between these neurons and their capability to learn from data that makes neural networks a strong predicting and classification tool [60]. A general block diagram of a NN controller is shown in Figure 12; it consists of an input vector  $X$ , this vector is the feedback from the structure and it can contain several signals from multiple sensors. Such information is processed through a neural network trained to suppress the vibration modes of the structure;  $W$  is the weight matrix and  $f$  is the activation function of the NN. The use of neural networks for identification and controlling of smart civil structures has been investigated by several researchers [59, 61-69]; due to this, no rule-based knowledge is required. No mathematical process model is required. It has the capability to approximate non-linear systems [62, 63].

Valoor and Agarwal [61] proposed a hybrid system comprising a dynamic diagonal recurrent neural network (DRNN) and an adaptable feedforward neural network to control the beam vibration. Jha et al. [62] proposed a multilayer perceptron with a single hidden layer of neurons to control the vibrations on a cantilever plate using piezoelectric actuators. The results show that the neurocontroller learns quickly and reduces the RMS vibrations by 45–90%, depending on the type of external excitation. Xu et al. [64] presented a four-layer feedforward neural network trained on-line under the Levenberg–Marquardt (LM) method, for improving the problems of time delay presented in MR damper. The numerical results showed that the control proposed and the MR damper can reduce the seismic responses of a frame structure effectively. Liu et al. [65] proposed a novel neural network approach for the identification and control of a thin plate. Srivastava et al. [66] presented the vibration control of smart laminated fiber-reinforced plastic (FRP) composites beams/plates using backpropagation neural networks (BPNNs). Wang and Liao [67] presented an inverse neural network model for MR dampers to generate the control voltage when the MR damper is operating in a semi-active mode. Lee et al. [68] developed a semi active neuro-controller for base-isolation control with an MR damper, where the neural network was updated using a cost function and sensitivity evaluation. Laflamme and Connor [69] proposed an adaptive neural network composed of Gaussian radial functions for mapping the behavior of civil structures controlled with MR dampers. The structural response and the actual forces from the dampers are used to adapt the Gaussian network by tuning the radial function widths, centers, and weights. Results showed that the neural controller is effective for controlling a structure equipped with a MR damper, as it achieves a performance similar to the passive on strategy while requiring as low as half the voltage input.

#### 2.3.4.2. Fuzzy logic

In recent years, FL control theory has drawn considerable interest of researchers for active and semi-active control of smart structures subjected to earthquake excitations. The advantage of the FL control system is its inherent efficiency and ability to handle nonlinearities and uncertainties in structural and loading conditions, computations for driving the controller are quite simple, and can be easily implemented into a fuzzy chip [70, 71]. Fuzzy logic controller (FLC) is represented in Figure 13; it consists of four stages: fuzzyfication, this unit maps the measured inputs; knowledge base, it comprises knowledge of the application domain and the attendant control goals; decision making, this unit is the fuzzy reasoning mechanism that performs several fuzzy logic operations to infer the control actions for a given fuzzy input; finally, the defuzzyfication, in this stage the inferred fuzzy control action is converted into required crisp control value [71]. The use of FLC for vibration controlling of civil structures has been investigated by several researchers [71-75]. Wenzhong et al. [71] reported a numerical analysis of a non-linear FL adaptive control to solve two different problems presented in active vibration control of a smart beam. First they used FL control to approximate the above non-linear sensor path function. In the second, the fuzzy control method was used in active vibration control with a non-linear piezoelectric actuator. A decomposed parallel fuzzy control approach based on modal analysis of the dynamic system for vibration control of a plate is reported by Lin [72]. The results showed that parallel fuzzy method can reduce a computational resources and it is more efficient than fuzzy logic control classic. Kim and Roschke [73] presented an experimental and numerical analysis for vibration control of a base isolation system of a frame, a novel friction pendulum system (FPS) and an MR damper are employed as the isolator and supplemental damping device, respectively, of the smart base isolation system. They proposed the union of genetic algorithms and FLC to modulate a MR damper. A genetic algorithm (GA) was used for

optimization of the membership functions of the control. Zhang et al. [75] proposed the use of FLC for vibration control of a beam instrumented with piezoelectric sensors and actuator. FLC was designed using the displacement and the velocity of the cantilever beams tips as the inputs, the control force on cantilever beams as the output.

#### **2.3.4.3. Neuro-Fuzzy**

Neuro-fuzzy (NF) is a hybrid intelligent control (Figure 14); it consists of a FLC supported by an intelligent algorithm in charge of optimizing its response. This control is an efficient tool to deal with nonlinearly complicated systems, in which there are linguistic information and data information, simultaneously NF possesses the capabilities of adjusting adaptively and intelligent information processing [65]. Many researchers have investigated the hybrid intelligent control for vibration controlling in smart structures [76-81]. Song and Washington [76] designed a neural network to identify the shape of the dominant vibration mode by using properly located piezoelectric sensors. A fuzzy controller was employed to control the vibration of the beam. Lin et al. [77] presented the use of NN to optimize the fuzzy IF-THEN rules and the membership functions to derive a more efficient FLC of a smart plate. Kumagai et al. [78] proposed the use of a NF model and a feedback controller to control the motion of SMA actuator. Guo et al. [79] presents the development of a three-layer NN to predict dynamic responses of the controlled frame structure to resolve the time-delay problem and FLC is designed to determine control currents of MR dampers. They mentioned that the FLC proposed reduces seismic responses of structures equipped with MR dampers more effectively than the passive-on strategy, the passive off strategy, and the bi-state strategy. Xu and Guo [80] proposed NF control strategy for vibration control of a three-story reinforced concrete structure using MR dampers, in which the neural-network technique is adopted to solve time-delay problem and the fuzzy controller is used to determine the control current of MR dampers quickly and accurately. The results showed that NF control strategy can determine currents of MR dampers quickly and accurately, and the control effect of the NF control strategy is better than that of the bi-state control strategy.

#### **2.4 Passive control**

Another type of control used in civil structures is passive control (PC). Depicted in Figure 15, the forces generated through the PC are developed as a result of the structure motion. Han et al. [82] proposed a passive control of a frame structure according to vibration characteristics of structure. Eight SMA dampers were diagonally installed in a two-story steel frame. Experimental and numerical analysis displayed that the largest vibration response of the SMA dampers controlled frame is about 15% of that of the uncontrolled frame. Li et al. [83] studied the vibration mitigation of a combined cable-SMA damper. The dynamic responses of the SMA damped cable were simulated as it vibrated at its first mode or at its first few modes respectively. They stated that the proposed superelastic SMA damper can suppress the cable's vibration in both cases. Song et al. [9] mentioned that SMA devices for passive vibration control, martensite SMAs have a larger damping capacity; however, it requires external heat to cause a phase transformation to restore its original shape. On the other hand, superelastic SMAs have a smaller damping capacity, but they have a strong re-centering force to restore the structure's initial position and there will be little residual strain of the superelastic SMAs. Cho et al. [84] proposed a numerical analysis of a smart passive system based on an MR damper. The smart passive system consists of an MR damper and an electromagnetic induction (EMI) system that uses a permanent magnet and a coil. The produced energy for the EMI is applied to the MR damper to vary the damping characteristics of the damper. Thus, the smart passive system does not require any power at all. Furthermore, the output of electric energy is proportional to input loads such as earthquakes, which means the smart passive system has adaptability by itself without any controller or corresponding sensors. The numerical results showed that the smart passive system has comparable performance to the normal MR damper-based control system. Likewise, Choi et al. [85] proposed the use of EMI to control a MR damper. This smart passive control system is implemented to verify the effectiveness for seismic protection of benchmark structural control problem for the seismically excited highway bridge.

PC has been applied to many civil engineering structures successfully, due to its straightforward implementation, low cost and no requiring external force or energy. However, PC presents some disadvantages: it requires a calibration process in order to work properly and some disturbances cannot be compensated with this type of control.

#### **2.5 Advantages and disadvantages of the vibrations control techniques.**

In order to establish a comparative of the vibration control techniques presented in this section. The main advantages and disadvantages of these proposals are summarized in Table 1.

### **3. ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF SMART ACTUATORS USED TO CONTROL CIVIL STRUCTURES**

Actuators used to control a civil structure play a critical role in the structure performance and in many cases they constitute a limiting factor due to their weight or little space to place them within the structure [86]. The main smart actuators used to control a civil structure are Magneto-Rheological (MR) fluids dampers, Shape Memory Alloy (SMA), piezoceramics and piezopolymers [86].

In this section an overview of the main smart actuators used in civil structures is presented, as well as their advantages and disadvantages.

#### **3.1. Piezoelectric materials**

One of the most popular smart materials used for monitoring and suppressing vibrations on civil structures are piezoelectrics. They have been known as simple, low-cost, lightweight, and easy-to-implement materials [6]. Because of its piezoelectric nature, the material can transform mechanical-vibration energy of the structure into electrical energy (sensor) or vice versa (actuator) [88]. The application of piezoelectric material as actuators in vibration control is profitable as these actuators only excite the structure's elastic modes without exciting the rigid-body modes. This is important because only elastic motions are often needed to control the structures [87, 89]. A review of piezoelectric actuators to control civil structures is reported by Song et al. [90]. Although piezoelectric sensors and actuators have been successfully applied to control civil engineering structures, piezoelectrics materials have limitations as well. The current status of piezoceramic actuators provides small displacements. Another drawback when piezoceramics are used for active control is that they need a power source. During an earthquake or seismic activity, the power supply may be interrupted; in such event, the reliance of these structures on active control may prove catastrophic [90].

#### **3.2. Magneto-rheological fluid dampers**

In recent years, magnetorheological (MR) dampers are one of the most promising control devices for civil engineering applications such as frames/buildings [60, 64, 73, 91] and bridges [92-94] for earthquake hazard mitigation, because they have many advantages such as small power requirement, reliability, large force capacity and stability, which allow the development of these devices with a very high bandwidth. [95, 96]. Although MR dampers have been successfully applied to many civil engineering structures, they present several disadvantages like low life cycle and high costs. Additional to this the implementation of a effective control strategy is drawback for the application of intelligent dampers due by complexity of the system and also by the limitation of the damping force models which does not dependent of measured variables as displacement, velocity and acceleration [97, 98].

#### **3.3. Shape memory alloy**

SMAs are unique materials that have the ability to undergo large deformation and return to a predetermined shape upon unloading or by heating. The distinct and unique properties of SMAs have been used in a wide variety of applications in different fields and industries such as aviation, medical equipment and implants. SMAs are gradually gaining recognition and finding new applications in various engineering fields. Recent experimental and numerical investigations have also demonstrated numerous possibilities of utilizing SMAs in civil engineering structures to protect buildings and bridges against earthquakes [99]. Although SMA actuators have been successfully applied to control civil engineering structures, the SMAs present a major disadvantage: the response of the SMA actuators mainly depends upon the type of controllers incorporated and the way in which the heat is added and removed [100- 103]. Sreekumar et al. [101] presented several methods to solve this problem. Another method to solve this problem is the use of superelastic SMA. It has shown particular promise in engineering applications because of the ability to recover their shape without the need for an external heating source. These properties include repeatable recentering capability, loading plateaus which limit force transfer to other members of the structure at intermediate strain levels; supplemental damping attributed to the flag-shape hysteresis, stiffening at large strain levels due to the formation of stress-induced martensite, and excellent low and high-cycle fatigue properties. This unique behavior has led to the belief that SMAs can reliably be used to control the response of a structure during seismic events [102].

### **3.4. Analysis of control and actuator performance in smart structures**

Analyses of control and actuator performance in smart structures are summarized in Table 2, in order to establish a comparative.

Observed in table 2, beams and truss structures presents bigger vibration reduction. In most cases piezoelectric actuators are utilized. Conversely, frame, buildings and bridges structures present lower vibration reduction since their robustness makes difficult the control. They mostly utilize MR and SMA dampers. According to reported works PPF, LQR and VFC control techniques are the most efficient in beam and truss structures. Moreover, NN, NF and FL control techniques have been applied to frame, buildings and bridges demonstrating a better response than passive control.

### **3.5 Control amplifiers**

Depending of the actuator requirements a suitable control amplifier is required. Some of the most important characteristics to be analyzed are: Output voltage range, output current range, slew rate and signal bandwidth. Table 3 summarizes the characteristics of some of the utilized amplifiers in classic, modern and passive control. It can be observed that voltage and current are linked. A power amplifier with a high voltage range output leads to a low current range; this kind of amplifier is suitable for piezoelectric actuators. Conversely, MR dampers and shape memory alloy actuators requires a control amplifier with high current and low voltage capacity. The bandwidth of the amplifier allows to the controller to deal with de different vibration modes of the structure; bigger structures, such as buildings and bridges, presents low-frequency vibration modes. On the other hand, high-frequency vibrational modes are presented in beams and truss structures due to their low mass content. The slew rate requirements depend of the actuator characteristics; for example, the response of MR damper actuators are around milliseconds; therefore, the control amplifier needs to fulfill such requirement.

## **4. IMPLEMENTATION OF CONTROL STRATEGIES**

The controller implementation in civil structures requires to consider both the hardware-software, where the control strategy is implemented, and the instrumentation of the structure. In Table 4 is presented a summary of the different combination of control strategies and actuators used in previously published work. Concerning to the hardware-software most of the published works implements their control strategies in PC's and DSP. An alternative that has not been explored in published works is the use of field programmable gate arrays (FPGAs); they allow real-time operation, low cost, parallel processing, among others [109, 110]. The hardware-software cost is low compared with the instrumentation cost. Therefore, the overall cost of implementing a controller in civil structures is concentrated in the actuators and power amplifiers. Power amplifier cost is around 1000-4000 USD. The cost of piezoelectric and SMA actuators is around 5-500 USD; the cost of MR damper actuators is up to 400 USD and depends of the quantity of MR fluid utilized. Real applications in civil structures are summarized next: In Beams structures are used PPF controllers [27, 28], PID controllers [18], FLC [72], SMC [100] and NF [77]. In frame/buildings have been used PPC [37], LQG [50], and FL [73]. Integral force control is been successfully utilized in truss structures [33]. Finally, cable-stayed bridges are controlled using velocity feedback control [39].

## **5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS**

The subject of smart structures is developing fast because of the evolution of smart materials, actuators, control strategies and new designs as well as computational tools. This work presents an overview of the main control techniques used for energy dissipation in civil structures.

The study of smart structures is focused on piezoelectric, MR dampers and SMA actuators. Active and semi-active actuators have provided good results in laboratory; however, the real applications are limited because of the large required forces. Based on that, it is necessary to have actuators that can generate large forces and work with alternative energy in case of a blackout.

The algorithms commonly used for vibration control in smart structures are: LQG, LQR, PPF, NN, FL and combinations of some of these. PPF, PID, VFC and IFC are used in linear systems and can control a simple input simple output (SISO) arrays; nevertheless, they have a fast response and are easy to implement in platforms such as DSPs, microprocessors or microcontrollers. On the other hand, NN, FL, LQG, LQR, PPC and SMC are the most used for controlling systems with multiple inputs multiple outputs (MIMO), this kind of controls can be used in no-linear systems. NN and FL do not need a mathematical model for controlling the system. PC is another alternative to control structures but it requires a calibration process in order to work properly and some disturbances cannot be compensated with this type of control. In spite of the amount of work that represent the vibration controlling and the optimal location of sensors and actuators inside

structures, few works present an overall analysis of vibration control and optimal location of sensors and actuators inside the structure for an adequate energy dissipation. A possible approach for future research is the development of new methodologies or the combination of different algorithms for having a better vibration control in structures. In addition, new methodologies to be proposed should include all the benefits that some of the existing works individually meet, such as noise immunity, portability and online estimation and control.

## REFERENCES

1. Z. Wang, S. Chen, and W. Han, Integrated Structural and control Optimization of Intelligent Structures, *Engineering Structures*, vol. 21, pp. 183-191, 1999.
2. A.V. Srinivasan, and D.M. McFarland, *Smart Structures: Analysis and Design*. Cambridge University, Press Cambridge, United Kingdom, 2001
3. E.F. Crawley, Intelligent structures for aerospace: A Technology overview and assessment, *Journal AIAA*, vol. 32, pp. 1689-99, 1994.
4. S.S. Rao, and M. Sunar, 1994. Piezoelectricity and its use in distributed sensing and control of flexible structures: A survey, *Applied Mechanics Review*, vol. 47, pp. 113-23, 1994.
5. B. Sun and D. Huang, Vibration suppression of laminated composite beams with a piezo-electric damping layer, *Composite structures*, vol. 53, pp. 437-447, 2001.
6. Chopra, Review of state of art of smart structures and integrated systems, *Journal AIAA*, vol. 40, pp. 2145-2187, 2002.
7. Preumont, *Vibration control of active structures: an Introduction*, Kluwer Academic Publishers, USA, 2002.
8. D.J. Inman, *Vibration with Control*, John Wiley and Sons Ltd, England, 2006.
9. G. Song, N. Ma, and H.N. Li, Applications of shape memory alloy in Civil Structures, *Engineering Structures*, vol. 28, pp. 1266-1274, 2006.
10. R. Alkhatib, and M.F. Golnaraghi, Active structural vibration control: a Review, *Shock and Vibration Digest*, vol. 35, pp. 367-383, 2003.
11. D.F. Pilkey, Computation of damping Matrix for Finite Element model Updating. PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and state University, U. 1998.
12. M. Balas, Modal control of certain flexible dynamic systems, *Journal of Control and Optimization*, vol. 16, pp. 450-462, 1978.
13. H.S. Tzou, and J.J. Hollkamp, Collocated Independent Modal control with self sensing orthogonal Piezoelectric Actuators (Theory and Experiment), *Smart Materials and Structures*, vol. 3, pp. 277-284, 1994.
14. S.P. Nagarkatti, C.D. Rahn, D.M. Dawson, and E. Zengeroglu, Observer-based modal control of flexible systems using distributed sensing, *Proc. 40th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, Florida USA, pp. 4268-4273, 2001.
15. M.H. Kim, and D.J. Inman, Spillover Reduction in Vibration Control of Flexible structures using Sliding Mode Observer, *Journal of Vibration and Control*, vol. 7, pp. 1087-1105, 2001.
16. W. Chang, S.V. Gopinathan, V.K. Varadan, and V.V. Varadan, Design of robust vibration controller for a smart panel using finite element model, *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 124, pp. 265-276, 2002.
17. K.K. Ahn, and N.B. Kha, Position control of shape memory alloy Actuators using self tuning Fuzzy PID controller, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 4, pp. 756-762, 2006.
18. Suhariyono, N.S. Goo, and C.H. Park, Use of lightweight Piezo-Composite actuators to suppress the free vibration of an aluminum beam, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 19, pp. 101-112, 2008.
19. R. Russ, K. Ma, and M.N. Ghasemi-Nejhad, A Finite Element Analysis Approach with integrated PID control for simultaneous precision positioning and vibration suppression of smart structures, *Proc. SPIE*, San Diego, CA, USA, pp. 616617.1-616617.12, 2006.
20. Z. Xiaojin, G. Zhiyuan, H. Quanzhen, and Y. Jincong, 2009, ILC Based Active Vibration Control of Smart Structures, *IEEE. International conference ICIS*, Shanghai, pp. 236-240, 2009.
21. N. Aguirre F. Ikhouane and J. Rodellar, Proportional-plus-integral semiactive control using magnetorheological dampers, *Journal of Sound and Vibration Article in Press*, Corrected Proof, 2010.
22. S.M. Yang, G.J. Sheu, and C.C. LI, Synthesis of Reference signal in Adaptive Feedback Controller for Structure Vibration Suppression, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 19, pp.

727-734, 2008.

23. M.K. Kwak, S. Heo, and G.J. Jin, Adaptive Positive Position Feedback controller design for the vibration suppression of smart structures, *Proc. SPIE*, pp. 246-255, 2002.
24. M.K. Kwak, and S. Heo, Active Vibration Control of smart Grid structure by multiinput and multioutput Positive Position Feedback controller, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 304, pp. 230-245, 2007.
25. B.P. Baillargeon, and S.S. Vel, Active vibration suppression of sandwich beams using piezoelectric shear actuators: experiments and numerical simulations, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, pp. 517-530, 2005.
26. Z.C. Qiu, X.M. Zhang, H.X. Wu, and H.H. Zhang, Optimal placement and active vibration control for piezoelectric smart flexible cantilever plate, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 301, pp. 521-543, 2007.
27. S.N. Mahmoodi, and M. Ahmadian, Active Vibration Control with modified Positive Position Feedback, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol. 131, 2009.
28. S.N. Mahmoodi, M. Ahmadian, and D.J. Inman, Adaptive modified Positive Position Feedback for active vibration control of structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 21, pp. 571-580, 2010.
29. H.A. Sodano, G. Park, and D.J. Inman, An investigation into the performance of Macro-Fiber composites for sensing and structural vibration applications, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, pp. 683-697, 2004.
30. Q. Hu, L. Xie, and H. Gao, Adaptive Variable Structure and Active Vibration Reduction for Flexible Spacecraft under input Nonlinearity, *Journal of Vibration and Control*, vol. 13, pp. 1573-1602, 2007.
31. N. Malik, S. Neild, and D. Wagg, 2007. Vibration Control of composite Beams using Adaptive Positive Position Feedback. In: *Proc. International Design Engineering Technical Conference & Computers*, Las Vegas, NV, pp. 863-871, 2007.
32. R. McClelland, T.W. Lim, A.B. Bosse, and S. Fisher, Implementation of local feedback of controllers for vibration suppression of a truss using active strut, *Proc SPIE*, vol. 2717, pp. 452:461, 1996.
33. G. Song, J. Vlattas, S.E. Johnson, and B.N. Agrawal, 2001. Active vibration control of a Space truss using a Lead Zirconate Titanate Stack actuator, *Proc. The Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 215, pp. 355-361, 2001.
34. Preumont, J.P. Dufour, and C. Malikian, Active damping by local force feedback with piezoelectric actuators, *Journal AIAA*, vol. 15, pp. 390:395, 1992.
35. X. Bu, L. Ye, Z. Su, and C. Wang C 2003 Active control of a flexible smart beam using a system identification technique based on ARMAX, *Smart Matererials and Structures*, vol.12, pp. 845:850, 2003.
36. R.G. Scott, M.D. Brown, and M. Levesley, Pole placement control of a smart vibrating beam, *8th Int. Congr. on Sound and Vibration*, Hong Kong, pp 387-91, 2001.
37. V. Sethi and G. Song. Multimode vibration control of a smart model frame structure, *Smart Materials and Structures*, vol. 15, pp. 473:479, 2006.
38. S. Narayanan, and V. Balamurugan, Finite element modelling of piezolaminated smart structures for active vibration control with distributed sensors and actuators, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 262, pp.529-562, 2003.
39. P. Warnitchai, Y. Fujino, B.M. Pacheco, and R. Agret, An experimental study on active tendon control of cable-stayed bridges, *Earthq Engrg Struct Dyn*, vol. 22, pp. 93:111, 1993.
40. M. Pietrzakowski, Piezoelectric control of composite plate vibration: Effect of electric potential distribution, *Computers and Structures*, vol. 86, pp. 948:954, 2008.
41. C.M.A Vasques, and J.D. Rodrigues, Active Vibration Control of smart piezoelectric Beams: Comparison of Classical and Optimal Feedback Control strategies, *Computers and Structures*, vol. 84, pp. 1402-1414, 2006.
42. D. Ze-Bing, H. Jin-Zhi, and W. Hong-Xia, Semi-active Control of a Cable-Stayed Bridge under Multiple support Excitations, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, vol. 5, pp. 317-325, 2004.
43. S.R. Hong, and S.B. Choi, Vibration Control of a Structural System Using Magneto-Rheological Fluid Mount, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, pp. 931-936, 2005.
44. S.B. Choi, S.R. Hong, K.G. Sung, and J.W. Sohn, Optimal control of structural vibrations using a Mixed-Mode Magnetorheological fluid Mount, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 50, pp. 559-568, 2008.
45. M.A. Trindade, Simultaneous extension and shear piezoelectric actuation for active vibration control

- of Sandwich Beams, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 1, pp. 591-600, 2007.
46. V. Balamurugan, and S. Narayanan, 2009. Multilayer higher order piezolaminated smart composite Shell Finite Element and its application to active vibration control, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, pp. 425-441, 2009.
  47. X.B. Zuo, A.Q. Li, W. Sun, and X.H. Sun, Optimal Design of Shape Memory Alloy Damper for Cable Vibration control, *Journal of Vibration and Control*, vol. 15, pp. 897-921, 2009.
  48. T. Nestorovic-Trajkov, H. Koppe, and U. Gabbert, Active vibration Control using optimal LQ tracking system with additional dynamics, *International Journal of control*, vol. 78, pp. 1182-1197, 2005.
  49. C.C. Ho, and C.K. Ma, Active vibration control of structural systems by a combination of the linear quadratic gaussian and input estimation approaches, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 301, pp. 429-449, 2007.
  50. V. Sethi, and G. Song, Optimal Vibration Control of a model Frame structure using piezoceramic sensors and actuators, *Journal Vibration and Control*, vol. 11, pp. 671-684, 2005.
  51. S.M. Yang, G.J. Sheu, and K.C. Liu, Vibration Control of Composite Smart structures by Feedforward Adaptive Filter in Digital Signal Processor, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, pp. 773-779, 2005.
  52. M.G. Raja, and S. Narayanan, Active control of tensegrity Structures under Random Excitation, *Smart Materials and Structures*, vol. 16, pp. 809-817, 2007.
  53. M.G. Raja, and S. Narayanan, Simultaneous optimization of structure and control of smart tensegrity Structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, pp. 109-117, 2009.
  54. Marinova, D., 2009. Robust Control of Composite beams, *Automation and Remote Control*, vol. 70, pp. 982-996, 2009.
  55. Y. Suzuki, and Y. Kagawa, Active Vibration Control of a flexible cantilever Beam using shape memory alloy actuators, *Smart Materials and Structures*, vol. 19, pp. 14-25, 2010.
  56. G. Song, and H. Gu, Active Vibration Suppression of a Smart Flexible Beam Using a Sliding Mode Based Controller, *Journal of Vibration and Control*, vol. 13, pp. 1095-1107, 2007.
  57. K.C. Lu, C.H. Loh, J N Yang and P.Y. Lin, Decentralized sliding mode control of a building using MR dampers. *Smart Materials and Structures*, vol. 17, pp. 2008.
  58. T. H. Nguyen, N. M. Kwok, Q. P. Ha, J. Li, and B. Samali, Adaptive sliding mode control for civil structures using magnetorheological dampers, *Proc. International Symposium on Automation and Robotics in Constructions.Tokyo,Japan*, 2006.
  59. R. Kumar, S.P. Singh, and H.N. Chandrawat, MIMO Adaptive vibration control of smart structures with quickly varying parameters: Neural Networks vs Classical control approach, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 307, pp. 639-667, 2007.
  60. Z.D. Xu, Y.P. Shen and Y.Q. Guo, Semi-Active Control of Structures Incorporated With Magnetorheological Dampers Using Neural Networks, *Smart Materials and Structures*, vol. 12, pp. 80-87, 2003.
  61. M.T.C. Valoor, and S. Agarwal, Self-Adaptive Vibration Control of smart composite Beams using Recurrent Neural Architecture, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, pp. 7857-7874, 2001.
  62. R. Jha, and C. He, Design and experimental validation of an adaptive Neurocontroller for vibration suppression, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 14, pp. 497-506, 2003.
  63. R. Kumar, B. Mishra, and S. Jain, Vibration Control of smart composite laminated Spherical Shell using Neural Network, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 19, pp. 947-957, 2008.
  64. Z.D. Xu, and Y.P. Shen, Intelligent Bi-State Control for the structure with Magnetorheological Dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 14, pp. 35-42, 2003.
  65. V.T. Liu, C.L. Lin, and G.P. Lee, 2004. Neural Network based identification and control of a Thin Plate using piezoelectric actuators and sensors. *International Journal of Systems Science*, vol. 35, pp. 355-373, 2004.
  66. Srivastava, A. Agarwal, D. Chakraborty, and A. Dutta, Control of Smart Laminated FRP structures using Artificial Neural Networks, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 24, pp. 1353-1364, 2005.
  67. D.H. Wang, and W.H Liao, Modeling and control of Magnetorheological fluid dampers using neural networks, *Smart Materials and Structures*, vol. 14, pp. 111-126, 2005.
  68. H.J. Lee, G. Yang, H.J. Jung, B.F. Spencer, and I.W. Lee, Semi-Active neurocontrol of a base-isolated benchmark structure, *Structural Control Health Monitoring*, vol. 13, pp. 682-692, 2006.
  69. S. Laflamme, and J.J. Connor, Application of self-tuning Gaussian networks for control of civil

- structures equipped with magnetorheological dampers, Proc. SPIE, San Diego, CA, USA, 2009.
70. Q. Lu, Z. Peng, F. Chu, and J. Huang, Design of Fuzzy Controller for Smart Structures using Genetic Algorithms, *Smart Materials and Structures*, vol. 12, pp. 979-986, 2003.
  71. Q. Wenzhong, S. Jincai, and Q. Yang, Active Control of Vibration using a Fuzzy Control Method, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 275, pp. 917-930, 2004.
  72. J. Lin, An Active Vibration Absorber of Smart Panel by using a Decomposed Parallel Fuzzy Control Structure, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 18, pp. 985-998, 2005.
  73. H.S. Kim, and P.N. Roschke, Design of Fuzzy logic controller for smart base isolation System using Genetic algorithm, *Engineering Structures*, vol. 28, pp. 84-96, 2006.
  74. S.Y. Ok, D.S. Kim, K.S. Park, and H.M. Koh, Semiactive Fuzzy Control of cable-stayed Bridge using Magneto-rheological dampers, *Engineering structures*, vol. 29, pp. 776-788, 2007.
  75. J. Zhang, L. Cao, W. Yuan and R. Gao, Active Vibration Control for Smart Structure base on the Fuzzy Logic, *Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, pp. 47-51, 2008.
  76. J.K. Song, and G. Washington, Neural Network Discrimination in intelligent vibration control, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 11, pp. 234-242, 2000.
  77. J. Lin, Vibration Absorber of smart structures using Adaptive Networks in Hierarchical Fuzzy control, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 287, pp. 683-705, 2005.
  78. Kumagai, T. Liu, and P. Hozian, Control of shape memory alloy actuators with a Neuro-Fuzzy Feedforward model element, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 1, pp. 45-56, 2006.
  79. Y.Q. Guo, S.M. Fei, and Z.D. Xu, Simulation Analysis on Intelligent structures with Magnetorheological dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 19, pp. 715-726, 2008.
  80. Z.D. Xu, and Y.Q. Guo, Neuro-Fuzzy Control Strategy for Earthquake-Excited Nonlinear Magnetorheological structures, *Solid Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 28, pp. 717-727, 2008.
  81. J. Lin, and W.S. Chao, Vibration Suppression control of beam-cart system with piezoelectric transducers by decomposed Parallel Adaptive Neuro-fuzzy control, *SAGE Journal of Vibration and Control*, vol. 15, pp. 1885-1906, 2009.
  82. Y.L. Han, Q.S. Li, A.Q. Li, A.Y.T. Leung and P.H. Lin, Structural vibration control by shape memory alloy damper, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 32, pp. 483-494, 2003.
  83. H. Li, M. Liu, and J.P. Ou, Vibration mitigation of a stay cable with one shape memory alloy damper, *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 11, pp. 1-36, 2004.
  84. S.W. Cho, H.J. Jung and I.W. Lee, Smart passive system based on magnetorheological damper, *Smart Materials and Structures*, vol. 14, pp. 707-714, 2005.
  85. K. M. Cho, H.J. Jung, S.W. Chob, and I.W. Lee, Application of Smart Passive Damping System Using MR Damper to Highway Bridge Structure, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 21, pp. 870-874, 2007.
  86. A.R. Mehrabian, and A. Yousefi-Koma, A Novel Technique for optimal placement of piezoelectric actuators on smart structures, *Journal of the Franklin Institute*, 2009.
  87. J.S. Leng, and A. Asundi, NDE of Smart structures using multimode fiber optic vibration sensor, *NDT and E International*, vol. 35, pp. 45-51, 2002.
  88. L.S. Jang, and K.C. Kuo, K.C., Fabrication and Characterization of PZT thick Films for Sensing and Actuation, *Sensors*, vol. 7, pp. 493-507, 2007.
  89. D. Halim, and S.O. Reza, An Optimization Approach to Optimal Placement of Collocated Piezoelectric Actuators and Sensors on a thin Plate, *Mechatronics*, vol. 13, pp. 27-47, 2003.
  90. G. Song, V. Sethi, and H.N. Li, Vibration control of Civil structures using piezoceramic smart materials: a Review, *Engineering Structures*, vol. 28:1513-1524, 2006.
  91. C.H. Loh, P.Y. Lin, and L.L. Chang, Semi-active control of Buildings structures with semi-active Tuned Mass damper, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 20, pp. 35-51, 2004.
  92. J.M. Ko, Y.Q. Ni, Z.Q. Chen, and B.F. Spencer, Implementation of MR dampers to Dongting Lake Bridge for cable vibration mitigation, *Proc. of the 3rd World Conference on structural Control*, Como, Italy, 2002.
  93. J.P. Ou, *Structural Vibration Control-Active, Semi-Active and Smart control System*, Press of Science, Beijing, China, 2003.
  94. C.S. Cai, M. Pe, W.J. Wu, and M. Araujo, Cable vibration control with a TMD-MR damper system: Experimental exploration, *Journal of Structural Engineering*, vol. 133, pp. 629-637, 2007.

95. L.M. Jansen, and S.J. Dyke, Semi-active Control strategies for MR dampers: Comparative Study, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 126, pp. 795–803, 2000.
96. Domínguez, R. Sedaghati, and I Stiharu, Modeling the hysteresis phenomenon of Magnetorheological damper, *Smart Materials and Structures*, vol. 13, pp. 1351-1361, 2004.
97. Domínguez, R. Sedaghati, and I Stiharu, Semi-active Vibration control of adaptive structures using Magnetorheological dampers, *Journal AIAA*, vol. 44, pp. 1563-1571, 2006.
98. Domínguez, R. Sedaghati, and I Stiharu, Modeling and application of MR dampers in semi-adaptive structures, *Computers and Structures*, vol. 86, pp. 407-415, 2007.
99. M. Indirli, M.G. Castellano, P. Clemente, and A Martelli, Demo application of shape memory alloy devices: the rehabilitation of S. Georgio Church Bell Tower, *Proc. SPIE*, Newport Beach, CA, USA, pp. 262–72, 2001.
100. G. Song, B. Kelly, and B.N. Agrawal, Active Position Control of a shape memory alloy wire actuated composite Beam, *Smart Materials and Structures*, vol. 9, pp. 711-716, 2000.
101. M. Sreekumar, M. Singaperumal, T. Nagarajan, M. Zoppi and R. Molfino, Recent advances in nonlinear control technologies for shape memory alloy actuators, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, vol. 8, pp. 818-829, 2007.
102. J. McCormick, R. DesRoches, D. Fugazza, and F. Auricchio, Seismic Assessment of Concentrically Braced Steel Frames with Shape Memory Alloy Braces, *Journal of structural Engineering*, vol. 133, pp. 862-870, 2007.
103. G. McGavin, and G. Guerin, Real-time seismic damping and frequency control of steel structures using Nitinol wire. *Proc. SPIE*, vol. 4696, pp. 176–84, 2002.
104. N.S. Manoharan, G. Uma, M. Umopathy, S. Meenatchisundaram, Structural Vibration Control using Quantitative Feedback Theory, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 1816-1822, 2006.
105. C.S. Cai, W.J. Wu; and M. Araujo, Cable Vibration Control with a TMD-MR Damper System: Experimental Exploration, *Journal of Structural Engineering*, vol. 133, pp. 629-637, 2007.
106. G. Gilardi, B.J. Buckham and E.J. Park, Finite Element Modeling of a Slewing Non-linear Flexible Beam for Active Vibration Control with Arrays of Sensors and Actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, pp. 1941-1958, 2009.
107. F. Peng, A. Ng and Y.R. Hu, Actuator placement optimization and adaptive vibration control of plate smart structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, pp. 263-271, 2005.
108. R. Jha and C. He, Adaptive Neurocontrollers for Vibration Suppression of Nonlinear and Time Varying Structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 15, pp. 771-781, 2004.
109. C. Rodriguez-Donate, R.A. Osornio-Rios, J.R. Rivera-Guillen, R.J. Romero-Troncoso, Fused Smart Sensor Network for Multi-Axis Forward Kinematics Estimation in Industrial Robots. *Sensors*, vol. 11, pp. 4335-4357, 2011.
110. J. J. de Santiago-Perez, R. A. Osornio-Rios, R. J. Romero-Troncoso, E. Cabal Yopez and R. G. Guevara-Gonzalez, Feedrate optimization by polynomial interpolation for CNC machines based on a reconfigurable FPGA controller, *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 69, pp. 342-349, 2010.
111. Hp model 6545A datasheet; Agilent Technologies: Santa Clara CA, USA, 2002-2003
112. Matsusada AMS-0.6B100 datasheet; Matsusada Precision: New York, NY, 2003-2010



## Hardware-software system for simulating and analyzing earthquakes applied to civil structures

J. P. Amezcua-Sanchez, R. A. Osornio-Rios, R. J. Romero-Troncoso, and A. Dominguez-Gonzalez

HSPdigital Research Group, C. A. Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Campus San Juan del Río, Universidad Autónoma de Querétaro, Moctezuma 249, Col. San Cayetano, 76807 San Juan del Río, Querétaro, México

Correspondence to: R. A. Osornio-Rios (raosornio@hspdigital.org)

Received: 11 October 2011 – Revised: 17 November 2011 – Accepted: 27 November 2011 – Published: 6 January 2012

**Abstract.** The occurrence of recent strong earthquakes, the incessant worldwide movements of tectonic plates and the continuous ambient vibrations caused by traffic and wind have increased the interest of researchers in improving the capacity of energy dissipation to avoid damages to civil structures. Experimental testing of structural systems is essential for the understanding of physical behaviors and the building of appropriate analytic models in order to expose difficulties that may not have been considered in analytical studies. This paper presents a hardware-software system for exciting, monitoring and analyzing simultaneously a structure under earthquake signals and other types of signals in real-time. Effectiveness of the proposed system has been validated by experimental case studies and has been found to be a useful tool in the analysis of earthquake effects on structures.

### 1 Introduction

Recent strong earthquakes (e.g. Japan, Chile, and México), the incessant worldwide movements of tectonic plates and the continuous ambient vibrations caused by traffic and wind have increased the interest of researchers in improving the capacity of energy dissipation to avoid damages to civil structures (Dyke, 1998). In order to achieve this task, it is necessary to perform the simulation of structures under vibration loads. This is usually performed either experimentally or analytically. Experimental testing of structural systems is essential to understand physical behaviors and build appropriate analytic models in order to expose difficulties that may not have been considered in analytical studies (Jeyasehara et al., 2009).

Recently, structural simulators have gained importance, particularly in countries vulnerable to destructive

earthquakes. A structural simulator is defined as a system capable of providing the most direct experimental pattern for the performance assessment of structures subject to earthquakes or to any ground motion (Nakata, 2010). The general block diagram of a structural simulator is shown in Fig. 1. The exciter, typically a shaker, actuates on the structure, producing vibrations which are measured by sensors – generally accelerometers. Then, the monitored signal is analyzed by means of processing techniques such as FFT, wavelet, and others, in order to get the response of the structure in detail.

In order to excite a structure, several kinds of signals have been used as inputs for the shaker such as: recorded earthquakes, synthetic signals, and ambient vibrations. Different works have proposed the use of earthquake signals to excite civil structures, due to the fact that it permits analysis of the structure behavior under real conditions (San Bartolome et al., 2004; Dolce and Cardone, 2006; Johnson et al., 2008; Van de Lindt and Potts, 2008; Kamanli and Balik, 2010). Synthetic signals are mainly used to obtain the modal parameters of a structure and to determine its fatigue life; sinusoidal sweep or pure sinusoidal are the most widely used (Zivanović et al., 2006; Dominguez et al., 2007; Ibrahim and Reynolds, 2008; Ersubasi and Korkmaz, 2010). Another kind of signal frequently used to excite a structure is ambient vibration such as traffic and wind. As well as synthetic signals, ambient vibration is used to obtain the modal parameters of a structure (Brownjohn et al., 2003; Ren et al., 2004). From the above stated, it is necessary to have a simulator capable of synthesizing or generating the three types of signals, so as to excite any kind of structure under different conditions.

Regarding structure sensing, current literature points out that accelerometers (Ren et al., 2004; Dolce and Cardone, 2006; Zivanović et al., 2006; Ibrahim and Reynolds, 2008) and string potentiometers (Van de Lindt et al., 2008) are two

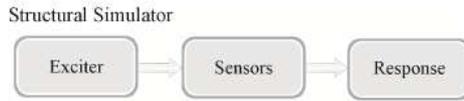


Fig. 1. Structural simulator.

of the most widely used sensors for monitoring a structure during an excitation. An existing problem in several works is the quantity of test points that are simultaneously monitored. For instance, Zivanović et al., 2006 proposed the monitoring of a lively steel box girder footbridge. The structure was tested in several points; however, the monitoring of the structural response was only done by one accelerometer. This is considered unsuitable to know the behavior of the structure in detail. Conversely, aiming at observing the behavior of the structure in detail, simultaneous monitoring of several points is necessary. Therefore, the development of a system capable of monitoring concurrently several test points is considered essential.

Concerning the signal processing techniques used for analyzing the response of a structure, several works are based on the fast Fourier transform (FFT) (Chen et al., 2005; Dolce and Cardone, 2006; Dominguez et al., 2007); the short time Fourier transform (STFT) (Dolce and Cardone, 2006; Nagarajaiah, 2009; Nagarajaiah and Basu, 2009); discrete wavelet transform (DWT) (Ovanesova and Suárez, 2004), and the wavelet packet transform (WPT) (Sun and Chang, 2002; Han et al., 2005). Nevertheless, all these works present several disadvantages. First, they use two software programs, one for generating the signal that excites the structure and another for the analysis of the measured signal, which limits the software portability and the comparison between both signals. In addition, the lack of online processing and portability of their systems is also observed. For these reasons, it would be desirable to have a versatile and portable system capable of simultaneously generating, modifying, reproducing, and analyzing any kind of signal so as to be used in real-time structural analysis.

The contribution of this work is the design, development and implementation of a hardware-software system for exciting, monitoring, and analyzing civil structures simultaneously. The proposed system is capable of synthesizing, generating, modifying and controlling the three most common used signals such as earthquakes, ambient vibrations and synthetic signals to excite a structure. Moreover, the system has the ability to adapt the monitored signal to most of the commercial electrodynamic shakers. Additionally, the system has the potential for continuous and online monitoring to observe the real structure performance during an earthquake or any other excitation, as well as the signal analysis in one or several test points, concurrently. Another contribution of

this work is that the software is capable of analyzing the measured signals through several techniques such as FFT, STFT, DWT, WPT, and their combination. The effectiveness of the proposed system is validated through different experimental cases, where earthquake signals, traffic effects, and synthetic signals are used to stimulate a truss-type scaled structure.

## 2 Theoretical background

This section presents the theoretical background of the proposed techniques for vibration analysis of structures.

### 2.1 FFT analysis

FFT is an optimized algorithm for performing the discrete Fourier transform (DFT), which is considered an efficient technique for analyzing stationary signals. DFT is defined by Eq. (1) (Proakis, 2006), where  $x(n)$  is the discrete time signal,  $N$  is the sampling period,  $n$  and  $k$  are the discrete time and frequency indexes, respectively, and the transformation kernel  $W_N^{nk}$  is given by Eq. (2).

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

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

### 2.2 STFT analysis

STFT is a technique capable of analyzing non-stationary signals. The basic idea of STFT is to apply FFT in sequence during short sampling periods. For each different time a different spectrum is obtained and the totality of such spectra indicates the time-frequency distribution (Gurley and Kareem, 1999).

STFT is defined by Eq. (3), where  $x(t)$  and  $h(t)$  are the signal to analyze and the window function, respectively, centered at time  $\tau$ .

$$A_\tau(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) h(t - \tau) e^{-j\omega\tau} dt \quad (3)$$

The energy density spectrum at time  $\tau$  is therefore

$$P_{SP}(t, \omega) = |A_\tau(\omega)|^2 \quad (4)$$

### 2.3 DWT analysis

DWT is considered an efficient tool for non-stationary signal analysis, providing significant characteristics of time and frequency (Chavez et al., 2010). DWT is described by Eq. (5), where  $n$  represents the discrete time index,  $x(n)$  is the discrete time original signal,  $h(n)$  is the discrete time wavelet basis function,  $N$  is the total number of  $x(n)$  samples,  $j$  is

the time scaling, and  $k$  is the shifting of the discrete wavelet function  $h(n)$  through the input signal  $x(n)$ .

$$DWT_{j,k} = \sum_N x(n)h_{j,k}(n) \quad (5)$$

DWT is based on the Mallat algorithm (Mallat, 1999), which consists of high pass filter (HPF) and low pass filter (LPF) banks. According to the Mallat algorithm, the convolution of signal  $x(n)$  with the LPF is known as the approximation level  $L(AC_L)$ , and with the HPF is known as the detail level  $L(DC_L)$ ; the first decomposition of  $x(n)$  is known as level 1, and it is made of  $DC_1$  and  $AC_1$  that corresponds to the high-frequency and low-frequency components of the signal. The decomposition process continues on  $AC_1$ , obtaining the level 2 made of  $DC_2$  and  $AC_2$  that corresponds to the high-frequency and low-frequency components of  $AC_1$ , respectively. Once the discrete input signal  $x(n)$  has been decomposed into the  $L$  desired levels, the signal reconstruction is done by applying the decomposition process in an inverse way that is known as the inverse discrete wavelet transform (IDWT).

According to the DWT filter bank properties, the frequency band for an approximation  $AC_L$  and a detail  $DC_L$  is given by Eqs. (6) and (7), respectively, where  $f_s$  is the sampling frequency.

$$AC_L \Rightarrow \left[ 0, \frac{f_s}{2^{L+1}} \right] \quad (6)$$

$$DC_L \Rightarrow \left[ \frac{f_s}{2^{L+1}}, \frac{f_s}{2^L} \right] \quad (7)$$

#### 2.4 WPT analysis

WPT, like DWT, is a technique to decompose a signal repeatedly into successive low-frequency and high-frequency components. Yet, in WPT both the detail and the approximation coefficients are decomposed to create the full binary tree of band decomposition. The main advantage of using WPT over DWT is that it can provide uniform frequency bands; therefore, identifying more frequency components especially at high frequency is possible.

WPT is defined by Eq. (8), where  $i$ ,  $j$  and  $k$  are the modulation, scale and translation parameters, respectively (Reda et al., 2006).

$$\psi_{j,k}^i(t) = 2^{j/2} \psi^i(2^j t - k), \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

WPT is obtained through the next recursive equations, where  $h(k)$ ,  $g(k)$  and  $\psi^i$  are low-pass filter coefficients and high-pass filter coefficients associated with the scaling function and the mother wavelet, respectively.

$$\psi^{2i}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \psi^i(2t - k) \quad (9)$$

$$\psi^{2i+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i(2t - k) \quad (10)$$

#### 2.5 DWT/WPT combined with FFT analysis

Two promising techniques that have not been employed to analyze civil structures are the combination of DWT with FFT, and WPT with FFT. These techniques have provided good results on analyzing motors (Amezcua-Sanchez et al., 2010) and CNC machine tools (Rangel-Magdaleno et al., 2010); nonetheless, these techniques can be useful tools to analyze civil structures, earthquakes, etc.

The combination of these analysis techniques allows observing the behavior of the signal throughout time and identifying a characteristic frequency related to the reconstruction of either DWT or WPT, without increasing the FFT frequency resolution (Rangel-Magdaleno et al., 2010). A specific frequency band of interest is isolated by means of DWT or WPT, and the FFT is applied on the reconstruction level to identify the characteristic frequencies within this band.

### 3 Methodology

This section shows the methodology followed for the development of the hardware-software system, as well as its characteristics and capabilities. The general system, software methodology, and control system methodology are described.

#### 3.1 Hardware-software system

The schematic diagram of the hardware-software system is shown in Fig. 2, in which the implemented system consists of six units: earthquake simulator software (ESS), control system (CS), primary actuator (PA), primary sensor (PS), signal conditioner (SC), and data acquisition system (DAS). The ESS unit generates and modifies the signal that will be used to excite the structure. In addition, this unit allows analyzing either the generated signal or the acquired signal. The CS unit stores and reproduces the generated signal by ESS unit. The PA unit includes a commercial linear amplifier, which receives and conditions the generated signal by the CS, and an electrodynamic shaker, which is fed by the conditioned signal to excite the structure. The system uses multiple accelerometers as PS for measuring the acceleration simultaneously in one or several test points of the structure. Finally, the DAS unit acquires and stores all the measured signals by the sensors, conditioned and amplified by the SC unit; then, these signals are sent to the ESS unit for their analysis.

#### 3.2 ESS methodology

The central part in the proposed methodology is the ESS unit. This unit is in charge of simultaneously generating the signal that will excite the structure and monitor it. EES has a graphical user interface (GUI) to load the data and to present the output. Depicted in Fig. 3, the ESS unit is divided into two main modules: simulator and analyzer modules.

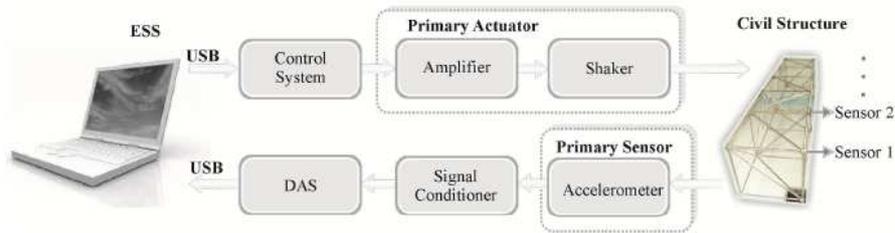


Fig. 2. Proposed methodology flow diagram.

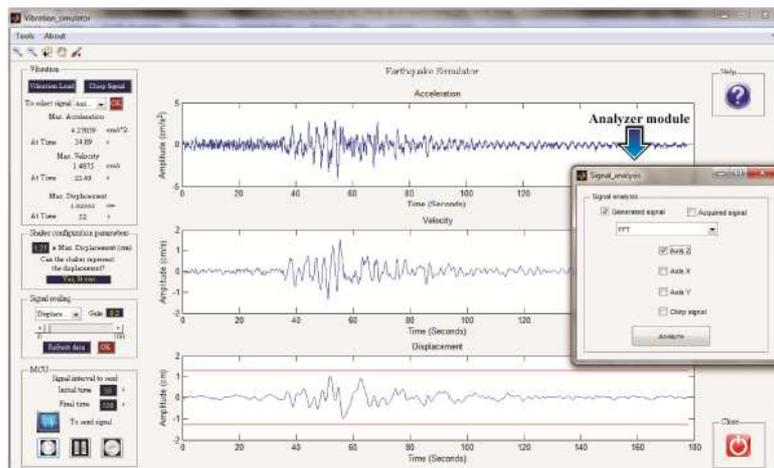


Fig. 3. ESS unit.

The simulator module is the main window, which appears when the program starts. The module is based on four stages: vibration, shaker configuration parameters, signal scaling, and master control unit (MCU). Figure 4 shows the overall process, depicted as follows:

- Vibration.** This stage generates or loads a signal that will be reproduced by the shaker. Earthquakes, synthetic signals, and ambient vibrations can be synthesized or generated by this stage. First, the push button "Vibration load" is used to load the data from either earthquake accelerations or ambient vibrations such as traffic, wind, etc. In addition, a synthetic signal with certain characteristics can be generated by the push button "Chirp Signal". Next, by means of a popup menu, the desired signal is selected. This popup menu was developed because in several cases the data loaded from
- a text file contains horizontal (axes X and Y) and vertical (axis Z) accelerations. Then, the parameters of the shaker are set, this with the purpose of comparing the maximum displacement generated by the signal and the "max displacement" that can be represented by shaker. Finally, the push button "OK" is used to show the generated or loaded signal in the interface. Simultaneously, some characteristics of the signal such as "max acceleration", "max velocity" and "max displacement" are displayed (Fig. 4a).
- Shaker configuration parameters.** This stage sets the parameters to use any electrodynamic shaker (Fig. 4b). This stage is essential because it sets the signal that will feed the shaker according to displacement parameter of it. Moreover, this stage allows observing if the signal can be represented by the shaker. In all experimental

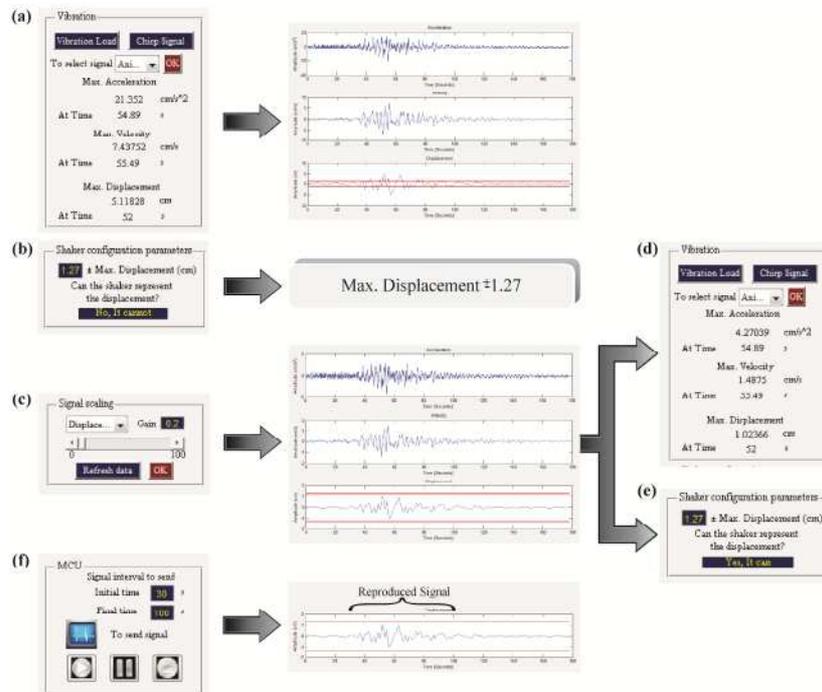


Fig. 4. Simulator module.

cases of this research, the displacement parameter was set to  $\pm 1.27$  cm.

- c. Signal scaling. This stage scales the signal in amplitude (Fig. 4c). First, the signal to be scaled is selected by means of a popup menu (acceleration, velocity or displacement). Next, a gain is established, which is multiplied by original signal to obtain the scaled signal. In order to display the scaled signal in the interface, it is necessary to press the push button "Refresh data". Simultaneously, "max acceleration", "max velocity" and "max displacement" are updated in the first stage (Vibration) (Fig. 4d). The Shaker configuration parameter (second stage) is updated (Fig. 4e) as well. This process is repeated until the user obtains the desired scaled signal. Finally, when the user observes a desired scaled signal, the push button "OK" has to be pressed to update the signal that will be sent to control system.

- d. MCU. This stage sends and controls the signal that will be reproduced by the shaker. First, the range of signal that will be reproduced is selected. After, when the user selects a desired region of the signal, the push button "To send signal" is used to send the signal to control system unit (Fig. 4f). In order to easily control the signal that will be reproduced by the control system unit, three push buttons "Play", "Pause", and "Stop" are used. The push button "Play" allows the reproduction of the generated signal in the interface. The push button "Pause" allows the user to pause the reproduction of the signal. Finally, the push button "Stop" allows the user to stop the reproduced signal.

The second module "Analyzer module", located in the menu "Tools", is used to analyze either the generated signal in the first module or the acquired signal by accelerometers through FFT, STFT, DWT, WPT, WPT-FFT and DWT-FFT analyses. Currently, an existing limitation in the commercial software for signal analysis by means of WPT is the difficulty in determining the frequency range of the reconstructed signal from

various nodes (Zeng et al., 2008). Thus, it is necessary to determine the corresponding relationship between nodes of decomposition tree and frequency bands of signal subspace. A simple methodology to solve this problem was proposed by Zeng et al. (2008), which is implemented in the "Analyzer module". When the user chooses either WPT or WPT-FFT, the software automatically selects the appropriate node according to the chosen scale and frequency. The use of this module, by selecting WPT-FFT, is shown in Fig. 5. The selected options for this example in the "analyzer module" are: Earthquake of México 1985 as generated signal, WPT-FFT analysis, vertical acceleration (Axis Z), and 10 and 0.5 Hz for scale and frequency, respectively.

### 3.3 Control system methodology

The control system (CS) unit is based on the digital direct synthesis (DDS) technique (Romero-Troncoso and Espinosa-Flores, 1999). Depicted in Fig. 6, the CS unit is composed of five modules: communication interface (CI), dynamic memory, phase accumulator (PA), digital-analog-converter (DAC), and signal conditioner (SC). The CI receives the generated data from the EES unit by means of USB interface. Concurrently, the received data is stored in dynamic memories to form a look-up table (LUT). PA includes two stages, an adder and a register, which are in charge of reproducing the stored data to a desired frequency. Finally, the reproduced data is sent to DAC to generate the analog signal, which in turn is conditioned to feed the linear amplifier.

The output frequency of the phase accumulator is given by Eq. (10), in which  $f_o$  is the output frequency,  $f_{clk}$  the clock frequency,  $n$  the number of bits and  $N$  varies from 0 to  $2^{n-1}$  to set the desired frequency.

$$f_o = \frac{N}{2^n} f_{clk} \quad (11)$$

## 4 Experimentation

In this section, the experimental setup and the cases of study for validating the proposed system are presented.

### 4.1 Experimental setup

The experimental setup is shown in Fig. 7a; it consists of a five-bay space truss structure made of aluminum. Each assembled bay is a 707 mm cube-shaped structure. The test benches were performed using a Labworks Model ET-127 electrodynamic shaker as an excitation source, which can reproduce maximum  $\pm 1.27$  cm of displacement, powered by a Labworks Model PA-141 linear power amplifier. The amplifier is fed by a proprietary control system, which has a high-speed 14-bit digital-to-analog converter DAC2904 from Texas Instruments (Fig. 7b). Depicted in Fig. 7a, structural acceleration responses were measured using three tri-axial accelerometers LIS3L02AS4 from STMicroelectronics

mounted on top of first-bay (Sensor 1) third-bay (Sensor 2) and fifth-bay (Sensor 3), which aims at concurrently monitoring its behavior at different parts. The used accelerometers have a bandwidth of 750 Hz, a user-selectable full scale of  $\pm 2g/\pm 6g$  ( $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$ ) and a  $5 \times 10^{-4}$  resolution over a 100 Hz bandwidth. Accelerometer information is digitalized using 12-bit 4-channel ADS7841 ADC from Texas Instruments, with a maximum sampling rate of 200 kHz for the four channels (Fig. 7c). Digital data acquisition was performed using a portable proprietary DAS; this system has eight input channels (Fig. 7b). The sampling frequency of the DAS system is set to 3.2 kHz. A proprietary Spartan 3E XC3S1600E FPGA platform running at 48 MHz as the control system and DAS unit is used.

### 4.2 Case studies

The experimentation has three main objectives: firstly, to show the usefulness of ESS software to synthesize, generate and modify earthquake signals or any other excitation; secondly, to show that the system has the ability to concurrently monitor several test points of the structure; and thirdly, to show that the system is capable of analyzing the monitored signals by means of different techniques proposed in the EES software such as FFT, STFT, DWT, WPT, WPT-FFT and DWT-FFT.

In order to validate the effectiveness of the proposed hardware-software methodology, three experiments were performed. The first case of study focuses on the use of earthquakes signals. The next two cases of study allow observing the efficiency of the proposed system to generate or synthesize other types of signals such as ambient vibrations and synthetic waveforms. All experiments were carried out in a healthy truss structure.

In the first experiment, the earthquakes of México 1985 and Loma Prieta, California 1989, are used for exciting and analyzing the behavior of the structure during these excitations.

In the second experiment, an ambient vibration caused by traffic is used for exciting the structure. The used vibration was on-line monitored through two tri-axial accelerometers mounted onto a rigid bridge (Fig. 10a). The replication of these types of events in scaled structures is essential because it allows the user to observe the structural behavior during everyday situations.

Finally, in the last experiment, the efficiency of the system to generate a sinusoidal sweep with a frequency range of 22 to 26 Hz is displayed, aiming at finding the first natural frequency of the structure.

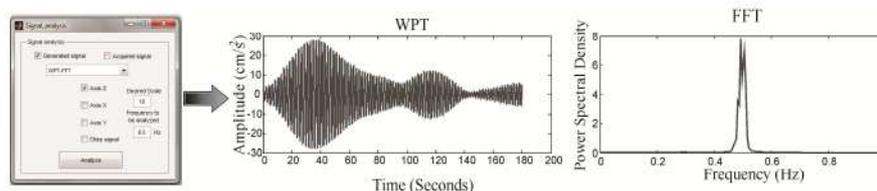


Fig. 5. Analyzer module.

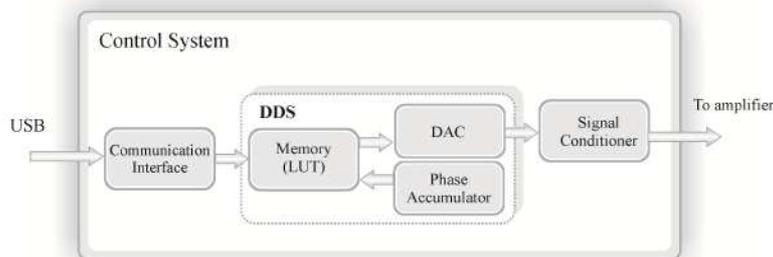


Fig. 6. Control system unit.

## 5 Results

In this section, the results of the proposed experimentation are presented. Also, the main advantages of the proposed system are discussed.

### 5.1 Earthquakes

Following the proposed methodology, the recorded acceleration of the earthquake in Mexico 1985 is loaded in the ESS (Fig. 8a). Then, the loaded signal is scaled to  $0.97 \text{ cm s}^{-2}$  maximum acceleration,  $0.3836 \text{ cm s}^{-1}$  maximum velocity and  $0.18 \text{ cm}$  maximum displacement. Additionally, the region with the maximum accelerations, 22 to 80 s (Fig. 8b), is selected to be reproduced by the shaker. The structural response of the first-, third- and fifth-bays are concurrently sensed (Fig. 8c–e). With the purpose to show the behavior of the structure during the excitation, FFT is selected for analyzing the measured vertical acceleration. Depicted in Fig. 8f–h, the measured time-domain signals are processed to obtain the FFT of the signals. The results show a static analysis of the structural response, where it is possible to identify the induced frequencies by the earthquake.

Like the previous case, the recorded acceleration of the earthquake in Loma Prieta, California 1989, is loaded in the ESS (Fig. 9a). The loaded signal is scaled to  $5.395 \text{ cm s}^{-2}$  maximum acceleration,  $0.7461 \text{ cm s}^{-1}$  maximum velocity

and  $0.15 \text{ cm}$  maximum displacement. Furthermore, the region with the maximum accelerations, 9 to 19 s (Fig. 9b), is selected to be reproduced by the shaker. As in the previous case, the structural response of the first-, third- and fifth-bays are concurrently sensed (Fig. 9c–e). STFT with a window of time duration 0.7 s is selected to analyze the measured vertical acceleration. Depicted in Fig. 9f–h, STFT allows observing the structural response throughout time, where a main frequency component, caused by the earthquake, is clearly observed.

In both case studies, the reproduced signal is compared with the experimental signal, demonstrating that the system is capable of exciting the structure with same characteristics of the generated signal by the ESS unit (Fig. 8c, f and Fig. 9a).

### 5.2 Ambient vibration

In the same way as in the previous test, the recorded acceleration produced by traffic on a bridge is loaded in the ESS (Fig. 10b). For this experiment, the signal is not scaled because it does not present long displacements. The loaded signal has the next characteristics:  $52.2 \text{ cm s}^{-2}$  maximum acceleration,  $2.48 \text{ cm s}^{-1}$  maximum velocity, and  $0.15 \text{ cm}$  maximum displacement. In addition, the reproduced signal is zoomed, where the maximum accelerations are from 505 to 525 s. As in the previous test, the structural response of the

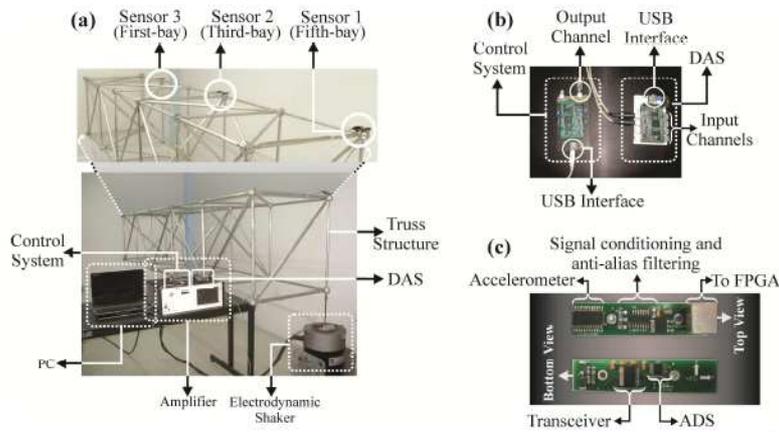


Fig. 7. Experimental setup.

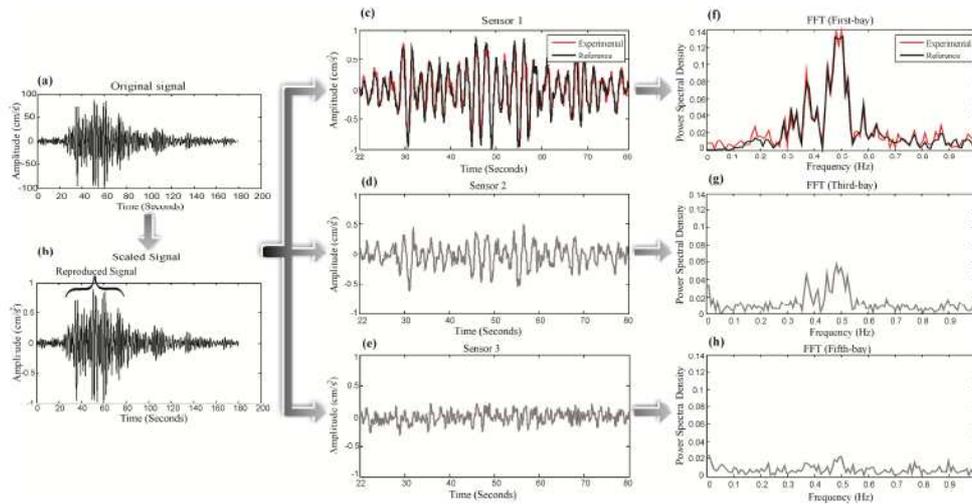


Fig. 8. Earthquake in México 1985.

first-, third- and fifth-bays are concurrently sensed (Fig. 10c–e). DWT and WPT are selected for analyzing the monitored vertical accelerations. In addition, Daubechies (db4) is used as mother wavelet; due to that, db4 is the most suitable wavelet mother to decompose acceleration signals (Taha, 2010).

For this experiment, the region of interest lies below 3 Hz, owing to the fact that the caused frequencies by traffic are low; therefore, the recommended decomposition level for DWT is DC10 with an active frequency band from 1.56 to 3.25 Hz, and the recommended node for WPT is [10 1] with an active frequency band from 1.5625 to 3.125 Hz. Depicted in Fig. 10f–k, DWT and WPT are applied to the time-domain

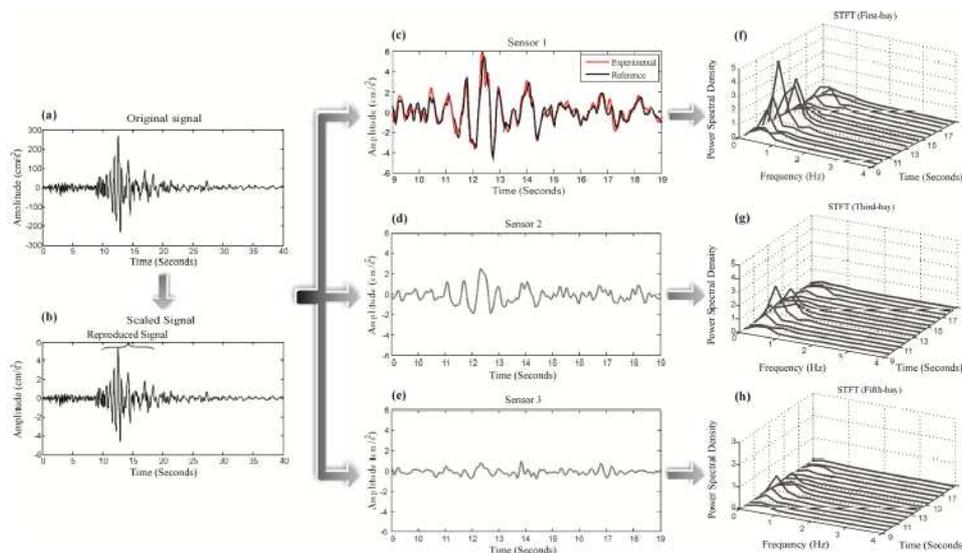


Fig. 9. Earthquake in Loma Prieta, California 1989.

signal to obtain the decomposition and reconstruction of the signal. The reconstructed wavelet signals allow observing the structural response throughout time, where the caused frequencies by traffic are clearly identified in this frequency band. Like in the previous test, the reproduced signal is compared with the experimental signal (Fig. 10c), where it is possible to observe that the system is capable of reproducing the signal generated by the ESS unit with great accuracy.

### 5.3 Synthetic signal

Unlike the two previous experiments, the tool “Chirp signal” was used to generate the exciter signal. The generated signal has the following characteristics: 10 KHz sampling frequency, 10 s running time for the experiment,  $3900 \text{ cm s}^{-2}$  maximum acceleration,  $20.72 \text{ cm s}^{-1}$  maximum velocity and 0.11 cm maximum displacement; therefore, the scaling is not necessary. Like the previous test, the structural response of the first-, third- and fifth-bays are concurrently sensed (Fig. 11b–d). To analyze the behavior of the structure, WPT-FFT and DWT-FFT are selected for analyzing the measured vertical acceleration. Similar to previous experiment, db4 is used as mother wavelet in both DWT-FFT and WPT-FFT analysis.

For this experiment, the region of interest lies below 26 Hz; therefore, the recommended decomposition level for DWT is DC7 with an active frequency band from 12.5 to

25 Hz, and for WPT is [9 4] with an active frequency band from 21.875 to 25 Hz. Once the decomposition level for DWT and the node for WPT have been established, the time-domain signal is processed to obtain the decomposition and reconstruction of the signal, which are shown in Fig. 11e–j. In both cases, the result wavelet contains the time evolution of the natural frequency of the structure, and to locate this frequency, the FFT is applied to obtain the spectrum, where a natural frequency is clearly appreciated (Fig. 11k–p).

### 5.4 Methodology comparative

In order to validate the main advantages of the proposed system to other similar used systems, a comparison of the main features is shown in Table 1.

Of the works shown in Table 1, only Dominguez et al. (2007) used proprietary software, while the others used commercial software. Dominguez et al. (2007) reported the use of a system capable of exciting a structure under several types of signals, in addition to monitoring several test points concurrently in order to analyze the behavior of a truss structure. On the other hand, Reynolds and Pavic (2002), Zivanović et al. (2006) and Ibrahim and Reynolds (2008) reported the use of a portable system capable of simultaneously exciting, monitoring and analyzing a structure. However, all these works present several disadvantages. Firstly, the used systems are unable to analyze the monitored signals

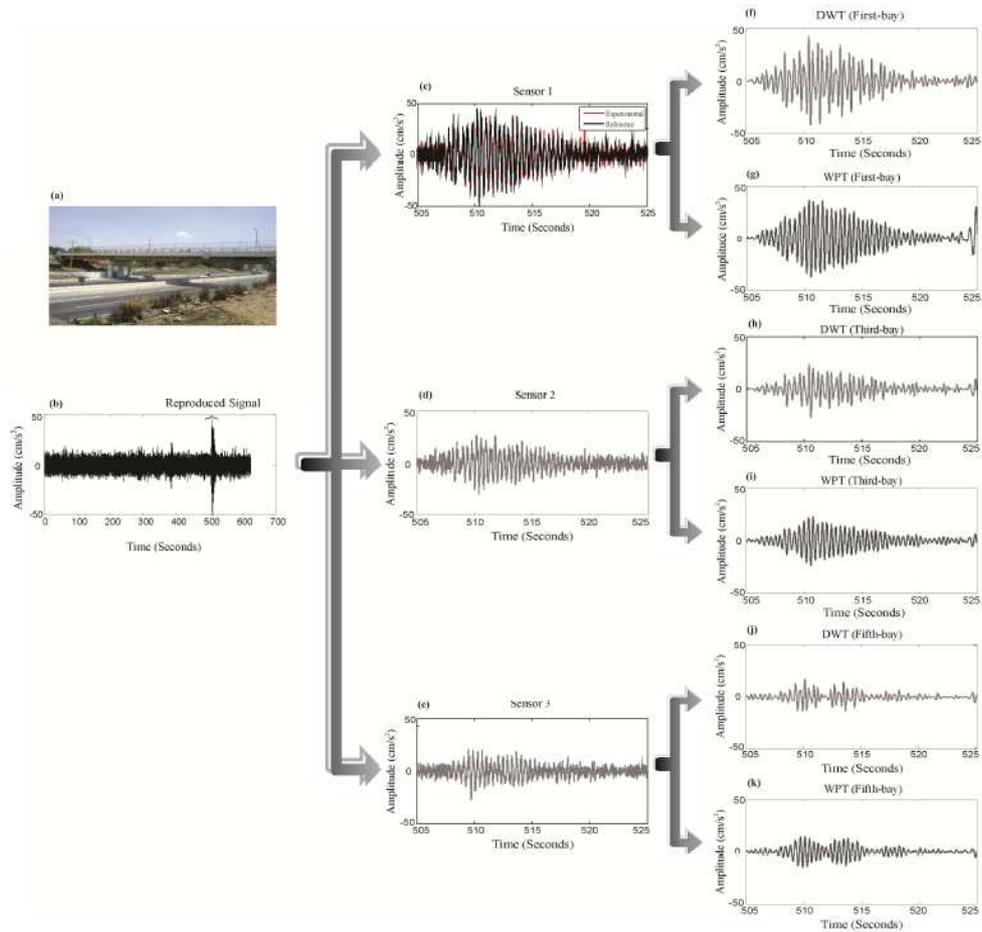


Fig. 10. Ambient vibration.

by means of different analysis techniques. In addition, they do not allow introducing or synthesizing a signal; thus, earthquake signals and ambient vibrations cannot be reproduced (Reynolds and Pavic, 2002; Zivanović et al., 2006 and Ibrahim and Reynolds, 2008). Secondly, the monitoring of several test points concurrently is not performed (Zivanović et al., 2006). Third, the use of two software programs, one for generating the signal that excites the structure and another for the analysis of the measured signal, means portability of the system is not possible (Dominguez et al., 2007).

In this work, three experiments demonstrate that the proposed single system is capable of either generating or synthesizing, and both modifying and analyzing, several types of signals as well as monitoring several test points concurrently to evaluate the behavior of the structure by means of several analysis techniques, being also a portable system.

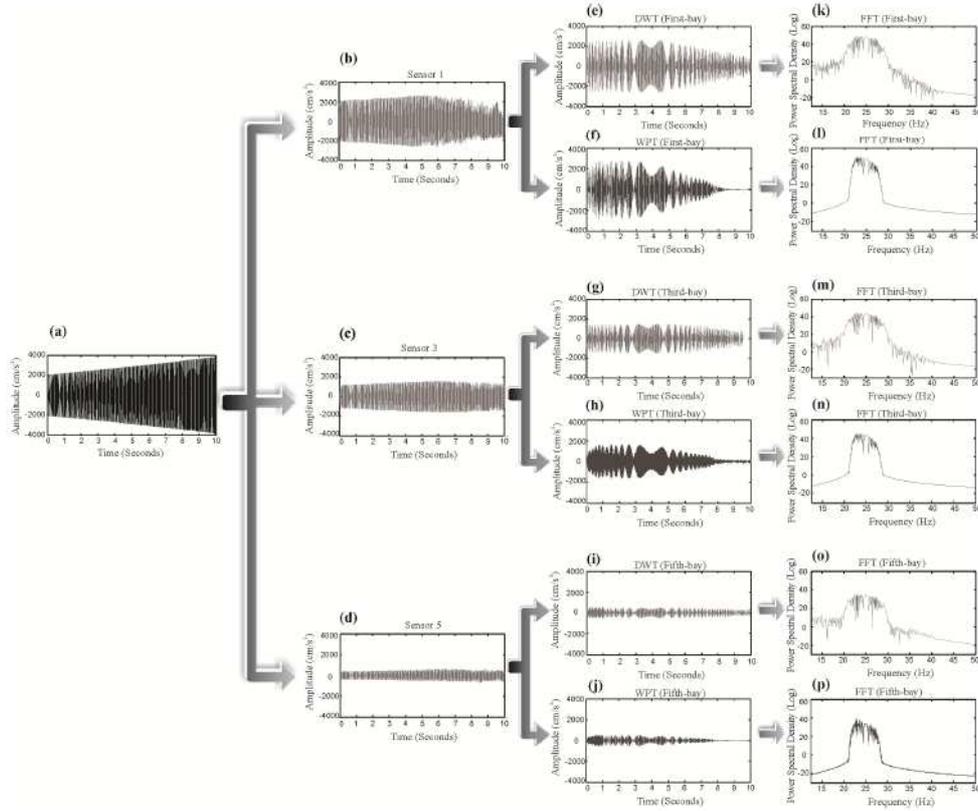


Fig. 11. Synthetic signal.

Table 1. Features comparison between the proposal and reported works.

Work	Generate multiple signals	Modify signals	Monitor multiple test points	Multiple techniques of analyzing	One system for generating, monitoring and analyzing	Portability
Reynolds and Pavic (2002)	YES	NO	YES	NO	YES	YES
Zivanović et al. (2006)	YES	NO	NO	NO	YES	YES
Dominguez et al. (2007)	YES	NO	YES	NO	NO	NO
Ibrahim and Reynolds (2008)	YES	NO	YES	NO	YES	YES
This work	YES	YES	YES	YES	YES	YES

## 6 Conclusions

Earthquakes are seismic waves that cause the greatest catastrophes: human, economic and structural. Therefore, it is necessary to have a system capable of analyzing, monitoring and reproducing them. Seismic hazard analysis is one of the most important processes for earthquake safety assessment of structures and the designing of earthquake resistant structures.

This paper proposes a hardware-software system for exciting, monitoring and analyzing simultaneously a structure under earthquakes, ambient vibrations and synthetic signals in real-time. The proposed system has different tools to generate and to modify the different signals either generated or acquired, as well as their analysis by means of several analysis techniques such as FFT, STFT, DWT, WPT, DWT-FFT and WPT-FFT. Three experiments have been presented in this work. In the first experiment, the system proves to be a useful tool to synthesize, modify and reproduce real earthquake signals with great accuracy, which is fundamental in the analysis and design of structures. The second and the third experiment are carried out to show the efficiency of the system to generate or to synthesize other types of signals such as ambient vibration and synthetic signals, aiming at knowing other characteristics like natural frequencies.

The proposed system is a useful tool in the analysis of earthquake effects on structures in order to help the improvement of its performance, resistance, design, and life service. In addition, it has tools to generate other types of signals for calculating other structure characteristics, showcased in the developed experiments. Furthermore, the feature comparison between the proposed system and other reported works highlights the advantages of using the proposed system.

*Acknowledgements.* This project was partially supported by CONACyT scholarship 213849 and SEP-CONACyT 84723 project.

Edited by: M. E. Contadakis

Reviewed by: A. Garcia-Perez and another anonymous referee

## References

- Amezcuita-Sanchez, J. P., Cabal-Yepez, E., Romero-Troncoso, R. J., Osornio-Rios, R. A., and Garcia-Perez, A.: Determination of system frequencies in mechanical systems during shutdown transient, *J. Sci. Ind. Res.*, 69, 415–421, 2010.
- Brownjohn, J. M. W., Moyo, P., Omenzetter, P., and Lu, Y.: Assessment of highway bridge upgrading by dynamic testing and finite-element model updating, *J. Bridge Eng.*, 8, 162–172, 2003.
- Chavez, O., Millan-Almaraz, J. R., Pérez-Enriquez, R., Arzate-Flores, J. A., Kotsarenko, A., Cruz-Abeyro, J. A., and Rojas, E.: Detection of ULF geomagnetic signals associated with seismic events in Central Mexico using Discrete Wavelet Transform, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 2557–2564, doi:10.5194/nhess-10-2557-2010, 2010.
- Chen, B., Xu, Y. L., and Qu, W. L.: Evaluation of atmospheric corrosion damage to steel space structures in coastal areas, *Int. J. Solids Struct.*, 42, 4673–4694, 2005.
- Dolce, M. and Cardone, D.: Theoretical and experimental studies for the application of shape memory alloys in civil engineering, *J. Eng. Mater. Technol.*, 128, 302–311, 2006.
- Dominguez, A., Sedaghati, R., and Stiharu, I.: Modeling and application of MR dampers in semi-adaptive structures, *Comput. Struct.*, 86, 407–415, 2007.
- Dyke, S. J.: Design and development of the Washington University seismic simulator facility, in: *Proc. 12th Eng. Mech. ASCE, San Diego*, 762–765, 1998.
- Ersubasi, F. and Korkmaz, H. H.: Shaking table tests on strengthening of masonry structures against earthquake hazard, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1209–1220, doi:10.5194/nhess-10-1209-2010, 2010.
- Gurley, K. and Kareem, A.: Applications of wavelet transforms in earthquake, wind and ocean engineering, *Eng. Struct.*, 21, 149–167, 1999.
- Han, J. G., Wei-Xin Ren, W. X., and Sun, Z. S.: Wavelet packet based damage identification of beam structures, *Int. J. Solids Struct.*, 42, 6610–6627, 2005.
- Ibrahim, Z. and Reynolds, P.: Modal testing of a cantilever grandstand, in: *International conference on construction and building technology (ICCBT2008)*, 16–20, Kuala Lumpur, Malaysia, 2008.
- Jeyasehara, C. A., Kumarb, K. S., Muthumanib, K., and Lakshmananb, N.: Seismic performance evaluation methodologies for civil engineering structures, *Indian J. Eng. Mater. Sci.*, 16, 220–228, 2009.
- Johnson, R., Padgett, J. E., Maragakis, M. E., DesRoches, R., and Saitti, M. S.: Large scale testing of nitinol shape memory alloy devices for retrofitting of bridges, *Smart Mater. Struct.*, 17, 1–10, 2008.
- Kamanli, M. and Balik, F. S.: The behaviour of roof gable walls under the effect of earthquake load, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 251–263, doi:10.5194/nhess-10-251-2010, 2010.
- Mallat, S.: *A Wavelet tour of signal processing*, 2nd Edn., Academic Press, 1999.
- Nagarajaiah, S.: Adaptive passive, semiactive, smart tuned mass dampers: identification and control using empirical mode decomposition, hilbert transform, and short-term fourier transform, *Struct Contr Health Monit.*, 16, 800–841, 2009.
- Nagarajalah, S. and Basu, B.: Output only modal identification and structural damage detection using time frequency and wavelet techniques, *Earthq. Eng. Eng. Vib.*, 8, 583–605, 2009.
- Nakata, N.: Acceleration trajectory tracking control for earthquake simulators, *Eng. Struct.*, 32, 2229–2236, 2010.
- Ovanesova, A. V. and Suárez, L. E.: Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures, *Eng. Struct.*, 26, 39–49, 2004.
- Proakis, J. G. and Manolakis, D. K.: *Digital Signal Processing, Principles and Applications*, Fourth Edition, Prentice-Hall, New Jersey, USA, 2006.
- Rangel-Magdaleno, J. J., Romero-Troncoso, R. J., Osornio-Rios, R. A., Cabal-Yepez, E., and Dominguez-Gonzalez, A.: FPGA-based vibration analyzer for continuous CNC machinery monitoring with fused FFT-DWT signal processing, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 59, 3184–3194, 2010.

- Reda, M. M., Noureldin, A., Lucero, J. L., and Baca, T. J.: Wavelet transform for structural health monitoring: A compendium of uses and features, *Struct. Health. Monit.*, 5, 267–295, 2006.
- Ren, W. X., Tong Zhao, T., and Harik, I. E.: Experimental and analytical modal analysis of steel arch bridge, *J. Struct. Eng.*, 130, 1022–1031, 2004.
- Ren, W. X., Peng, X. L., and Lin, Y. Q.: Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable-stayed bridge, *Eng. Struct.*, 27, 535–548, 2005.
- Reynolds, P. and Pavic, A.: Modal testing of a sport stadium, in: *Proc. of the 20th. International Modal Analysis Conference (IMAC XX)*, Los Angeles, California, USA, 1037–1043, 2002.
- Romero-Troncoso, R. J. and Espinosa-Flores, G.: Phase accumulator synthesis algorithm for DDS applications, *Electron. Lett.*, 35, 770–772, 1999.
- San Bartolome, A., Qulun, D., and Zegarra, L.: Effective system for seismic reinforcement of adobe houses, in: *13th World conference on Earthquake Engineering*, 3321, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- Sun, Z. and Chang, C. C.: Structural damage assessment based on wavelet packet transform, *J. Struct. Eng.*, 128, 1354–1361, 2002.
- Taha, M. M. R.: A neural-wavelet technique for damage identification in the ASCE benchmark structure using phase II experimental data, *Adv. Civ. Eng.*, doi:10.1155/2010/675927, 2010.
- Van de Lindt, J. W. and Potts, A.: Shake table testing of a Superelastic Shape Memory Alloy response modification device in a wood shearwall, *J. Struct. Eng.*, 134, 1343–1352, 2008.
- Zeng, X., Zhao, W., and Sheng, J.: Corresponding relationships between nodes of decomposition tree of wavelet packet and frequency bands of signal subspace, *Acta Seismol. Sin.*, 21, 91–97, 2008.
- Zivanović, S., Pavic, A., and Reynolds, P.: Modal testing and FE model tuning of a lively footbridge structure, *Eng. Struct.*, 28, 857–868, 2006.

## **ANEXO B**



## 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 Amaya<sup>1</sup>, Juan Pablo Amézquita Sánchez<sup>2</sup>, Roque Alfredo Osornio Ríos<sup>3</sup>, Aurelio Domínguez Gozalez<sup>3</sup>, René de Jesús Romero Troncoso<sup>3, 4</sup>, Arturo García Perez<sup>4</sup>.**

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

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

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

<sup>4</sup>Profesor-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 término 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 de 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).

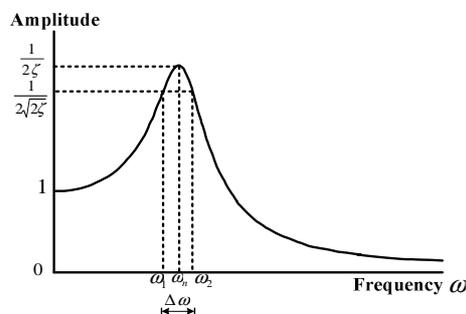
$$\omega_r = \sqrt{1 - 2\zeta^2} \omega_n \quad (3)$$

donde  $\omega_n$  es la frecuencia natural del sistema y  $\zeta$  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).



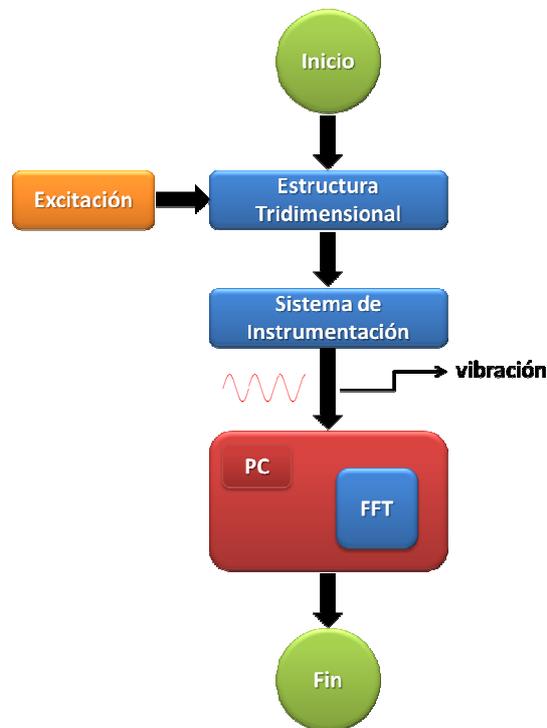
**Figura 1.** Método factor-Q para la medición del amortiguamiento.

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.

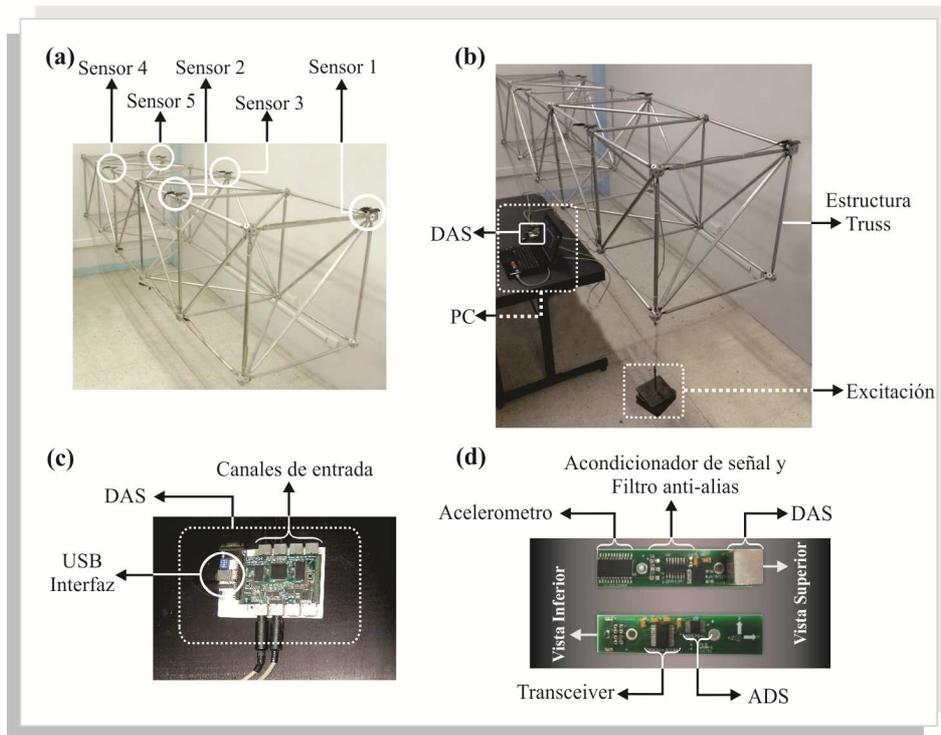


**Figura 2.** Diagrama a bloques de la metodología empleada

### 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 acelerómetro usados, tiene una escala de  $\pm 2g/\pm 6g$  ( $g = 9.81m/s^2$ ) y una resolución de  $5 \times 10^{-4}$  sobre un ancho

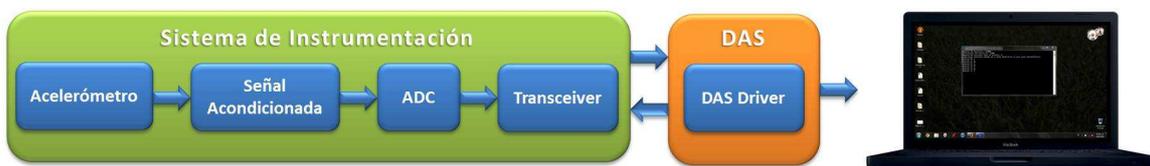
de banda de 100Hz. La información adquirida por los acelerómetros es digitalizada usando un ADS7841 de 12 bits y cuatro canales, con una máxima frecuencia de muestreo de 200 KHz en cada canal. Las señales obtenidas por el acelerómetro son almacenadas en el Sistema de Adquisición de Datos (DAS), (Figura 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

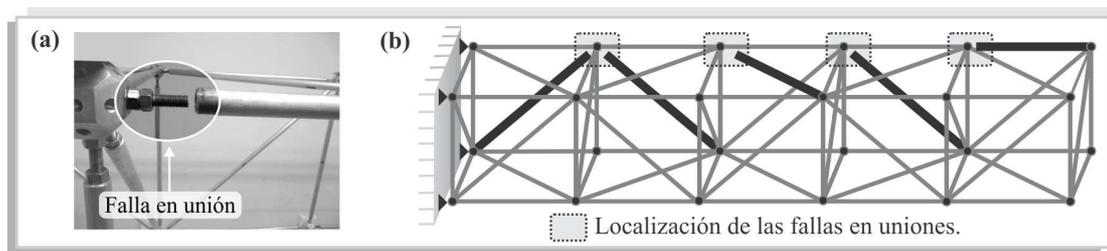
La señal de vibración es adquirida utilizando el sistema de instrumentación mostrado en la Figura 4, el cual consta de un acelerómetro del tipo MEMS tri-axial (LIS3LV02). La señal es acondicionada y digitalizada utilizando un convertidor analógico a digital ADS7841 y finalmente la etapa del transceiver que permite la comunicación con el DAS, una vez que termina el DAS de capturar todo 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 las 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.

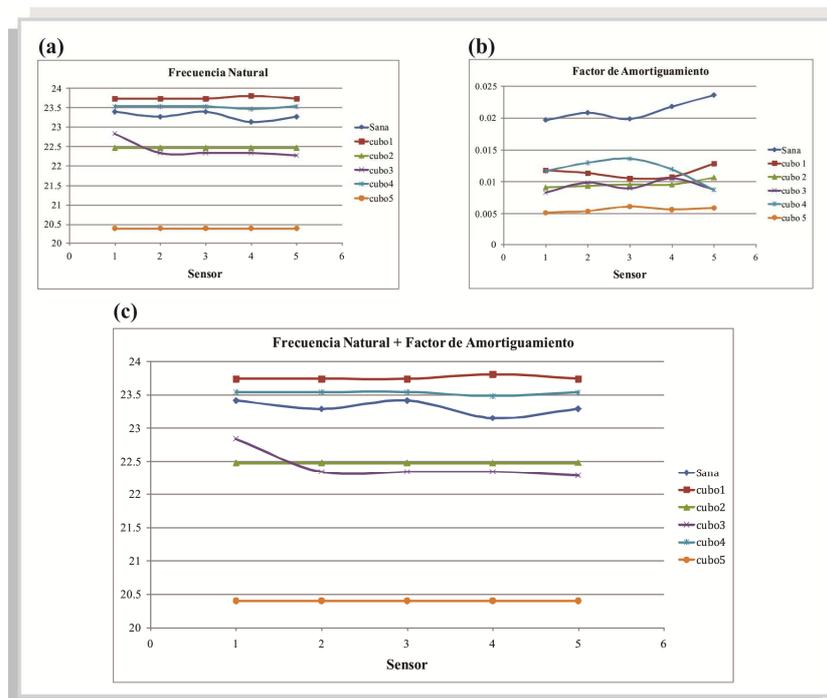


Figura 6. a) Frecuencia Natural, b) Factor de amortiguamiento, c) Suma de parámetros modales.

### 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.

**Tabla1.** Primera frecuencia natural (Hz) y su factor de amortiguamiento ( $\zeta$ ) de la estructura en buen estado y con falla.

Condición	Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3		Sensor 4		Sensor 5	
	$f$	$\zeta$								
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.