



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil

“EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE
CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS CON MÉTODOS
DE IDENTIFICACIÓN MODAL – 2019”

Trabajo de investigación para optar al grado de:

Bachiller en Ingeniería Civil

Autor:

JUAN LUIS CRUZ VENTURA

Asesor:

Mg. Gonzalo Hugo Díaz García

Trujillo - Perú

2019



DEDICATORIA

A mi Padre Celestial y mis Padres Terrenales.

Por haberme apoyado en todo momento, por la inspiración, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A mi Esposa e hijos Susana y Ricardo

Que son lo más valioso que aún tengo.



AGRADECIMIENTO

Ante todo agradezco a Nuestro Padre Celestial.

Especialmente también, agradezco a mis familiares, colegas de mi primera y segunda carrera, amigos y a mis profesores por los experiencias y conocimientos impartidos todos estos años.

Tabla de contenido

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	10
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA.	10
1.2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION	12
1.2.1. ANTECEDENTES	12
1.2.2. JUSTIFICACIÓN	20
1.3. BASES TEORICAS	21
1.3.1. DINÁMICA ESTRUCTURAL Y MÉTODOS EXPERIMENTALES DE IDENTIFICACIÓN MODAL	21
1.3.2. ANÁLISIS DE VIBRACIONES CON MÉTODOS ANALÍTICOS	21
1.3.2.1. Sistemas con un grado de libertad (1gdl)	21
1.3.2.1.1 Método Clásico	23
1.3.2.1.2 Método de Duhamet	26
1.3.2.1.3 Método de Newmark	27
1.3.2.1.4 Método de Fourier	28
1.3.2.2. Sistemas de múltiples grados de libertad (mgdl)	29
1.3.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES CON MÉTODOS EXPERIMENTALES	31
1.3.3.1. Análisis de vibraciones mediante Excitaciones Forzadas.	32



1.3.3.2. Análisis de vibraciones con Excitaciones Ambientales	33
1.3.3.3. Métodos de Procesamiento de Datos de Ensayos Modales Operacionales	35
1.4. FORMULACION DEL PROBLEMA	39
1.5. OBJETIVOS	39
1.5.1. OBJETIVO GENERAL	39
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	39
1.6. HIPOTESIS.	39
1.6.1. HIPÓTESIS GENERAL	39
1.6.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA	40
<u>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA</u>	<u>41</u>
2.1. TIPO DE INVESTIGACION.	41
2.1.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	41
2.2. POBLACION Y MUESTRA.	41
2.3. TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS.	41
2.4. PROCEDIMIENTOS ESTANDARES BÁSICOS.	42
<u>CAPÍTULO III. RESULTADOS</u>	<u>51</u>
<u>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</u>	<u>60</u>
<u>REFERENCIAS</u>	<u>64</u>
<u>ANEXOS</u>	<u>66</u>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Resultados Experimentales (Devin y Fannin 2012)</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2. Solución empleando el método clásico.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3. Solución analítica para sistemas de mgdl (Ramos 2007).....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4. Métodos Output-Only</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 5. Métodos de procesamiento de datos investigados.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 6. Resumen de propiedades mecánicas del adobe.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 7. Módulo de Elasticidad de paneles de quincha.</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 8. Objetivos generales y específicos de la investigación.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 9. Total de revisiones según objetivos</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 10. Análisis de vibraciones con métodos experimentales.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 11. Revisión Bibliográfica</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 11. Fuentes de información revisadas</i>	<i>61</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Una Vista Del Antiguo Jirón Pizarro</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. Una Vista Actual Del Jirón Pizarro.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3. Resultados: diagrama de estabilización (Aguilar et al. 2012a).</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4. Resultados: el primer modo de vibración (Aguilar et al. 2012a).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5. Torres de iglesias que realizaron ensayos experimentales.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6. Domo de Guglia Maggiore: Vista en elevación.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7. Domo de Guglia Maggiore:.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 8. Iglesia San Biagio</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9. Iglesia San Giuseppe.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10. Sistema de 1gdl</i>	<i>22</i>
<i>Figura 11. Respuesta de un sistema de 1gdl.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12. Fuerza Arbitraria P(t).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 13. Sistema de 2 grados de libertad.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 14. Mecanismos de Excitación.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 15. Función de densidad espectral para el método Peak Picking</i>	<i>35</i>
<i>Figura 16. Algoritmo del método de descomposición.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 17. Algoritmo SSI.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 18. Diagrama de estabilización del método SSI (Alaboz 2009)</i>	<i>38</i>
<i>Figura 19. Instalación de acelerómetro.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 20. Ubicación correcta del acelerómetro.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 21. Instalación final con la unidad de toma de datos.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22. Preparación de la Geometría</i>	<i>45</i>
<i>Figura 23. Geometría para exportar desde Autocad.....</i>	<i>45</i>



<i>Figura 24. Manejo de Mediciones.</i>	46
<i>Figura 25. Elegimos Una Nueva Medición.</i>	46
<i>Figura 26. Aceleraciones por cada canal.</i>	47
<i>Figura 27. Asignar Canales Creados a la Geometría.</i>	47
<i>Figura 28. Ubicación del Canal en la Gráfica.</i>	48
<i>Figura 29. Sistema de Monitoreo Dinámico de Estructuras (Elab. Propia)</i>	50

RESUMEN

La conservación de construcciones históricas es de gran importancia para los países por motivos culturales y económicos. Este tipo de construcciones no solo forman parte del patrimonio cultural del mundo sino que también son una fuente de ingreso debido a la atracción turística que generan. En el Perú se desarrollaron grandes culturas que dejaron un país plagado de vestigios y construcciones históricas. Lamentablemente, en el país no se desarrollan programas para la conservación, monitoreo o intervención de este tipo de estructuras. Su falta de práctica, acompañada con la ocurrencia de movimientos sísmicos y otros fenómenos naturales, está generando la desaparición de nuestro legado histórico. Este trabajo presenta una descripción de los diversos métodos para aplicación de ensayos de identificación modal para la evaluación estructural de construcciones históricas que se conocen como ensayos de identificación modal. Este tipo de ensayos encajan en las filosofías modernas de conservación ya que son no destructivos. Mediante la aplicación de este tipo de ensayos se podría estimar el estado real de las estructuras así como la identificación del daño y la variación de sus propiedades a través del tiempo.

PALABRAS CLAVES: Identificación modal, ruido ambiental, vibraciones, acelerómetro, evaluación estructural

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA.

Las construcciones históricas y su conservación es de gran importancia tanto en aspectos culturales, turísticos así como también económicos, estas construcciones forman parte del patrimonio cultural del mundo y son una fuente de ingreso debido a la actividad turística. Las culturas que se desarrollaron siglos atrás en el Perú dejaron como legado una gran cantidad de construcciones históricas. Actualmente hay una falta de mantenimiento y monitoreo permanente en este tipo de construcciones, además de que tenemos frecuente ocurrencia de movimientos sísmicos y otros fenómenos naturales como lluvias e inundaciones, por lo que ponen en riesgo su estabilidad y podrían ocasionar su desaparición.

En la costa peruana tenemos construcciones del siglo XVI – XIX las cuales son de muros de adobe y quincha, este se impulsó con la llegada de los españoles en el siglo XVI y se decidió construir la ciudad empleando principalmente adobe como material de construcción; pasado el terremoto de 1746, el uso de adobe cambió debido a los efectos devastadores y pérdida de vidas que se produjeron. En el siglo XVIII, se inicia con un sistema de construcción mixto en base a madera, caña y barro. En ese mismo siglo, se limitó el uso de adobe solo para el primer nivel y se comenzó a usar quincha para los niveles superiores.

El centro histórico de Trujillo ocupa aproximadamente un área de 333.5 ha. Y está conformado por un total de 5,783 lotes, que agrupados en 72 manzanas, se ubican dentro de la zona que también se le conoce como el “Cercado de Trujillo” y que originalmente

estuvo delimitada por la muralla de la ciudad. Según datos del censo del año 2005 el centro histórico de Trujillo contaba para entonces con una población aproximada de 12.000 habitantes y está poblado de diversos monumentos entre los que predominan las edificaciones producto de la arquitectura colonial y religiosa imperante durante la época virreinal, además de casonas que datan de la misma época y de los albores de la república entre cuyos distintivos están sus balcones y ventanales enrejados a manera de encaje. Es conocida como la Ciudad de la Primavera por su agradable clima. Esto ha llevado a la creación de un histórico y muy alegre festival que se realiza entre los días finales de septiembre y los primeros días de octubre de cada año, lo cual atrae el turismo internacional.



Figura 1. Una Vista Del Antiguo Jirón Pizarro



Figura 2. Una Vista Actual Del Jirón Pizarro

Arquitectura colonial y republicana del Paseo Pizarro una de las calles de más alto tránsito en el centro histórico de Trujillo figura 2, al fondo se observa la histórica y tradicional Plazuela el Recreo y su alta alameda.

1.2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION

1.2.1. Antecedentes

Según, Schmidt (2011) Indica y menciona que las aplicaciones de análisis modal se realizaron primero en la Ingeniería Mecánica y Aeronáutica en la década de los 80 así como también en el estudio de estructuras en alta mar. Utilizando los ensayos modales se pudo también evaluar mejor el comportamiento dinámico de los autos convertibles. Se comprendió que cuando estos carros son sometidos a fenómenos vibratorios, la rigidez reducida del cuerpo genera vibraciones en su primera frecuencia natural, lo cual se manifiesta como incómodas vibraciones en el marco del parabrisas y en el volante.

En el caso de un auto convertible abierto, debido a la baja rigidez torsional, el cuerpo de este vehículo experimenta severos movimientos torsionales en un bajo rango de frecuencia. Y para el caso de un convertible cerrado, la cubierta textil no contribuye significativamente a la rigidez torsional del vehículo, por lo que los movimientos torsionales se manifiestan nuevamente (Mahinzaeim et al. 2006).

Los métodos de identificación modal también se aplicaron en turbinas eólicas y fue una tarea difícil debido a los componentes armónicas de la rotación del rotor y al amortiguamiento aerodinámico (Tcherniak et al. 2011).

Debemos entender el comportamiento dinámico de las turbinas eólicas para poder producir componentes mecánicos ligeros y estructuralmente confiables (Rodríguez-Tsouroukdissian, et al. 2011).

Para poder diseñar sistemas de control que aseguren la eficiencia y la operación de la turbina (Rossetti, 2010).

Una de las grandes ventajas de las técnicas de identificación modal aplicada a generadores de turbinas eólicas es proporcionar un modelo dinámico de la estructura bajo condiciones operacionales y con condiciones de frontera reales. En el caso de una turbina eólica presentada en Tcherniak et al. (2011).

Se registraron 65 señales. El método empleado para la identificación de sus propiedades dinámicas fue el SSI (Brincker & Anderson 2006).

Los resultados experimentales se dividieron en modos en el plano de la estructura y modos fuera del plano de la estructura. La identificación de los modos en el plano presenta gran confiabilidad. En el caso de los modos fuera del plano, debido a los efectos aerodinámicos, los tres primeros modos no pudieron ser identificados.

En la Ingeniería Civil - Aplicaciones

Actualmente, la infraestructura importante, como los puentes, es instrumentada con sensores para poder monitorear su comportamiento y el estado en el que se encuentra. Al mismo tiempo edificios modernos y construcciones históricas están siendo evaluados con métodos experimentales para determinar sus propiedades dinámicas y detectar posibles daños en etapas iniciales. En países desarrollados, las normas han implementado la exigencia de la instrumentación y monitoreo permanente de estructuras importantes porque los resultados son útiles para la correcta programación de los procedimientos de control y reparación Chácara (2013).

Aguilar et al. (2012a) realizaron ensayos en un edificio de concreto armado de diecisiete pisos ubicado en Viña del mar en Chile. Este edificio fue analizado empleando técnicas experimentales de identificación modal para entender el comportamiento de su estructura frente a movimientos sísmicos. Para este caso de estudio se emplearon doce acelerómetros uniaxiales para la medición de la respuesta dinámica y se realizaron ensayos de excitación forzada (fuente de excitación: el sismo) y vibraciones ambientales. La identificación modal se realizó empleando el método SSI para las vibraciones ambientales y técnicas MIMO para las señales sísmicas. Utilizando del diagrama de estabilización mostrado en la Figura 3, se identificaron seis modos de vibración. El primer modo de vibración de este edificio de concreto armado se muestra en la Figura 4. Las frecuencias obtenidas con vibraciones ambientales son mayores que las frecuencias obtenidas con las señales sísmicas, teniendo una diferencia máxima de 20%. Asimismo, la estimación del amortiguamiento presentó una variación del 60%.

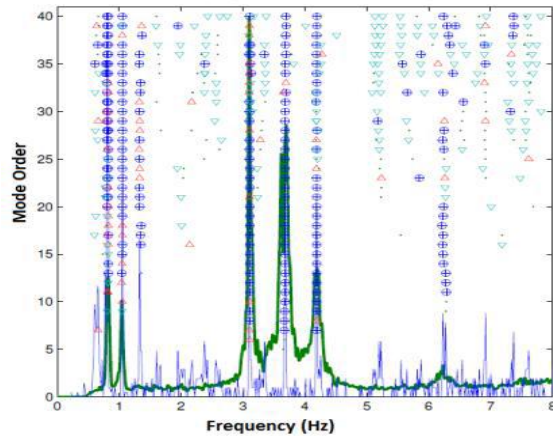


Figura 3. Resultados: diagrama de estabilización (Aguilar et al. 2012a).

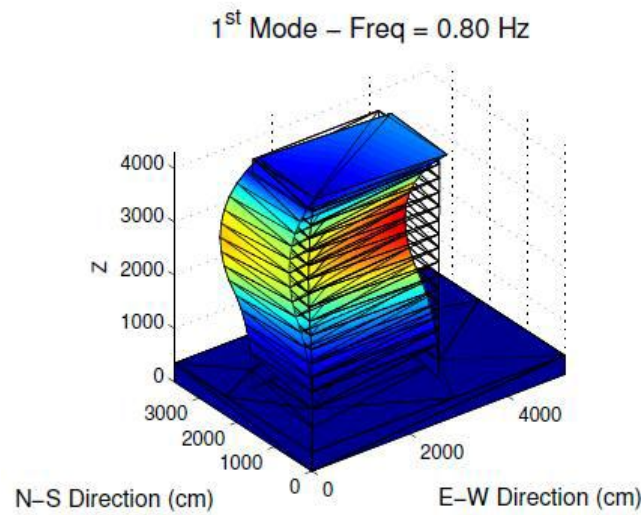


Figura 4. Resultados: el primer modo de vibración (Aguilar et al. 2012a)

Devin y Fanning (2012) estudiaron el comportamiento de las estructuras considerando la influencia que tienen los elementos no estructurales en el amortiguamiento. En este caso se realizaron ensayos de identificación modal en un edificio de concreto armado de cuatro pisos. Este edificio contaba con elementos estructurales de materiales ligeros. La fuente de excitación fue artificial y ambiental. Los métodos

empleados el cálculo del amortiguamiento fueron decremento logarítmico, half-power bandwidth y el método EFDD. Los resultados obtenidos de cada uno de los métodos no son parecidos, lo cual indica la poca precisión del cálculo lo cual se puede apreciar en la Tabla 1. Asimismo, en Satake et al. (2003) se concluyó que las construcciones con mayor cantidad de elementos no estructurales presentaron mayores valores de amortiguamiento que en otro tipo de estructuras.

Tabla 1 *Resultados Experimentales (Devin y Fannin 2012)*

	EFDD		Half power bandwidth		
	Frecuencia	Amortiguamiento	Frecuencia	Amortiguamiento	% Error
TV1	13.4	2.6	13.4	3.3	27
	14.1	2.4	14.1	2.3	4
TV2	15.3	1.3	15.3	1.5	15
	16.0	1.5	16.0	1.3	15
TV3	10.4	5.9	10.4	6.9	17
	16.5	4.0	16.5	10.2	155

Construcciones Históricas

Chácara (2013) concluye que en la actualidad la aplicación de ensayos no destructivos es importante para estudiar las construcciones históricas porque proveen datos precisos sobre propiedades de los materiales y condiciones de frontera sin necesidad de dañar su estructura. En particular, los ensayos experimentales de identificación modal han

demostrado ser útiles porque brindan información cuantitativa del comportamiento real y del estado de daño de las estructuras (p. 32).

Rainieri & Fabbrocino (2011) realizaron en Molise, al sur de Italia, ensayos de identificación modal en las torres de varias iglesias con la finalidad de conocer el estado de las mismas después del terremoto que ocurrió en el 2002. La fuente de excitación fueron vibraciones ambientales y para la medición de la respuesta dinámica se emplearon acelerómetros de fuerza balanceada con un rango de ± 0.5 g y una sensibilidad de 20 V/g. Las propiedades dinámicas de cada torre fueron estimadas mediante el método FDD. El objetivo de este estudio fue la comparación de los periodos experimentales con los periodos obtenidos mediante ecuaciones empíricas. Se llegó a la conclusión de que se necesita mayor investigación sobre la veracidad de estas ecuaciones. Asimismo, se presentó una fórmula para la determinación de la frecuencia de las estructuras que se obtuvo a partir de los datos experimentales. En la Figura 5 se pueden apreciar las diversas torres que fueron analizadas.



Figura 5. Torres de iglesias que realizaron ensayos experimentales.

(Rainieri y Fabbrocino 2011).

Busca et al. (2011) realizaron en la ciudad de Milano, ensayos experimentales en el domo de Guglia Maggiore, catedral que se considera como una de las construcciones más

impresionantes de Italia. En esta construcción se emplearon acelerómetros piezoeléctricos con un rango de ± 0.5 g y una sensibilidad de 10 V/g. La Figura 6 muestra una elevación de la catedral así como la ubicación de los sensores empleados Figura 7. En el estudio se identificaron seis modos de vibración empleando varios métodos en el dominio de la frecuencia. A partir de los resultados de estos métodos se pudo apreciar que las frecuencias guardaban una relación cercana.

Casarin et al. (2011) realizaron ensayos de identificación modal en la iglesia San Biagio y San Giuseppe, ubicadas en Italia. Estas iglesias presentan daños ocasionados por el terremoto del 2009. En la iglesia de San Biagio (Figura 8) se definieron veinticinco puntos de medición, se identificaron cinco modos de vibración. Para la iglesia de San Giuseppe (Figura 9) se definieron doce puntos y se identificaron seis modos de vibración. Con estos datos se procedió a calibrar exitosamente el modelo numérico en elementos finitos de la iglesia de San Biagio. En este proceso, el parámetro modificado fue el módulo de elasticidad del material con el que se construyó la iglesia.

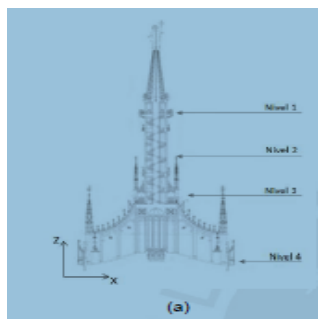


Figura 6. Domo de Guglia Maggiore: Vista en elevación

(Busca et al. 2011).

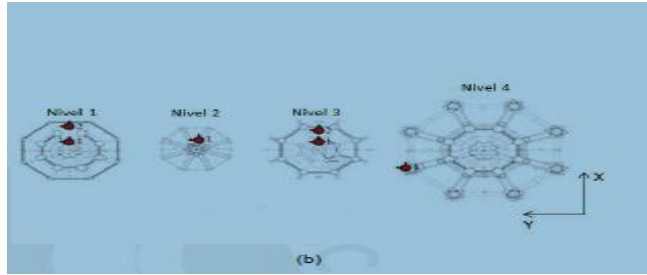


Figura 7. Domo de Guglia Maggiore:

Vista en planta con ubicación de los sensores (Busca et al. 2011).



Figura 8. Iglesia San Biagio

<http://www.scenebylaurie.com/page/31/>



Figura 9. Iglesia San Giuseppe

<http://www.fotopaises.com/foto/Italia/Taormina/337529.html>

1.2.2. Justificación

El presente tema de investigación surge de la necesidad de realizar un estudio del impacto de las condiciones sísmicas que son permanentes en nuestra zona costera a fin de determinar si las estructuras de las construcciones históricas pueden soportar, sin daños mayores en el tiempo ante cualquier evento extremo, realizando evaluaciones periódicas basados en el uso de tecnología moderna juntamente con métodos de identificación modal.

Para que se desarrollen programas para la conservación, monitoreo o intervención de tal manera de prevenir daños mayores y no se genere la desaparición de nuestro legado histórico.

La conveniencia de este estudio radica en que, siendo Perú un centro turístico internacional con construcciones históricas que conecta lo maravilloso de las culturas antiguas a todo el esplendor del conocimiento de las culturas universales, su operatividad es de vital importancia para el normal desarrollo económico y social.

En este proyecto propondremos el uso de los más adecuados métodos de identificación modal como una herramienta para la evaluación estructural de este tipo de construcciones; los cuales tienen como finalidad de estimar el comportamiento real de las estructuras mediante la identificación de sus propiedades dinámicas (frecuencias, amortiguamiento y modos de vibración) también son muy útiles para el estudio porque van de acuerdo con las filosofías modernas de conservación ya que son métodos no destructivos en los cuales se usa solo el ruido ambiental como fuente de excitación de la estructura (Caetano, 2000).

1.3. BASES TEORICAS

1.3.1. Dinámica estructural y métodos experimentales de identificación modal

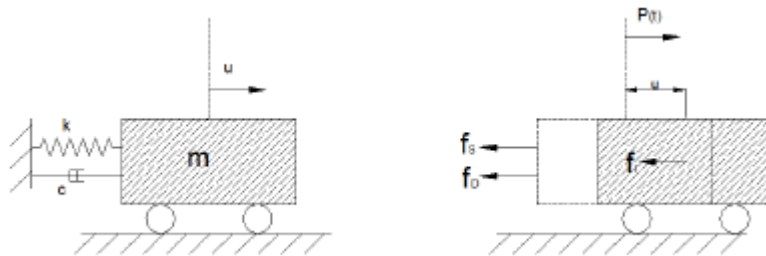
El tipo de análisis de estructuras depende de las cargas a las que esté sometida. Si las cargas no varían en el tiempo se realiza en análisis estático como por ejemplo los esfuerzos producidos por el peso propio de la estructura. El análisis dinámico se caracteriza por que las cargas actuantes varían con el tiempo. En este tipo de análisis, la participación de las fuerzas de inercia se incluye en la estimación de la respuesta de la estructura. Existen dos métodos para la evaluación de la respuesta dinámica de la estructura. El primero es el método analítico que se basa en soluciones numéricas y el segundo es el método experimental que se basa en la medición de vibraciones.

1.3.2. Análisis de vibraciones con métodos analíticos

1.3.2.1. Sistemas con un grado de libertad (1gdl)

El comportamiento de sistemas de un grado de libertad (1gdl) bajo diversas excitaciones está relacionado con la rigidez, la disipación de energía y la inercia del sistema. Estos factores son proporcionales a las magnitudes del desplazamiento, velocidad y aceleración, respectivamente. Una forma usada para representar sistemas de 1gdl se indica en la Figura 10a, la cual muestra una masa m que puede desplazarse u respecto del suelo. El movimiento del sistema está limitado por un resorte de rigidez k y un amortiguador viscoso c , los cuales están conectados directamente a la masa m . Una vez la fuerza $p(t)$ aplicada al sistema sea retirada, el sistema comenzará a oscilar bajo una frecuencia determinada. En este tipo de sistemas, la velocidad con la que el sistema oscila así como su desplazamiento disminuirán con el transcurso del tiempo hasta que regrese a su posición inicial. En los sistemas con amortiguamiento, la energía se disipa mediante

diversos mecanismos como la transformación de energía cinética en energía térmica, la formación de grietas. El diagrama de cuerpo libre de un sistema de 1gdl se muestra en la Figura 10b, donde la fuerza f_s es la fuerza restitutiva o elástica, la fuerza f_d es la fuerza de amortiguamiento y la fuerza f_i es la fuerza de inercia. Estas fuerzas están relacionadas proporcionalmente a la rigidez, amortiguamiento y masa del sistema respectivamente. De esta forma se obtiene la ecuación del equilibrio dinámico y la ecuación fundamental del movimiento para sistemas de 1gdl, Ecuación 1 o Ecuación 2, respectivamente.



(a) Representación gráfica

(b) diagrama del cuerpo libre (DCL)

Figura 10. Sistema de 1gdl

$$f_s + f_d + f_i = p(t) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$ku + c\dot{u} + c\ddot{u} = p(t) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$c = \xi C_{cr} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$C_{cr} = 2km \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde k es la rigidez, c el factor de amortiguamiento, m la masa del sistema, $p(t)$ es la fuerza actuante en función del tiempo, u es el desplazamiento, \dot{u} es la velocidad y \ddot{u} es la aceleración del sistema. Asimismo, ξ es el amortiguamiento del sistema y C_{cr} es el coeficiente de amortiguamiento crítico. La ecuación fundamental del movimiento para

sistemas de 1gdl puede resolverse de cuatro formas: Método clásico que plantea una solución matemática del problema, la integral de Duhamel, la transformada de Fourier y métodos numéricos paso a paso como el método de Newmark. A continuación se presenta un resumen de los métodos. Información detallada se encuentra en Chopra (1995).

1.3.2.1.1 Método Clásico

La solución de la ecuación del movimiento mediante el método clásico se puede dividir en dos tipos, vibración libre (sin amortiguamiento, con amortiguamiento) y vibración forzada. La Tabla 2 Muestra las diversas formas como se puede presentar y desarrollar la ecuación del movimiento.

Tabla 2. Solución empleando el método clásico.

Tipo de Vibración	Desarrollo de la Ecuación del Movimiento	En donde	Leyenda
Vibración Libre $\xi = 0$	$u(t) = \rho_0 \cos(\omega t - \phi)$ Ecuación 5	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ Ecuación 6 $\rho_0 = \left[u_0^2 + \left(\frac{\dot{u}_0}{\omega} \right)^2 \right]^{1/2}$ Ecuación 7 $\phi = \arctan \left(\frac{u_0}{\omega u_0} \right)$ Ecuación 8	$\omega =$ Frecuencia angular $k =$ Rigidez $m =$ masa $u_0 =$ Desplazamiento inicial
Vibración Libre $\xi \neq 0$	$u(t) = e^{-\xi \omega t} \rho_0 \cos(\omega t - \phi)$ Ecuación 9	$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2}$ Ecuación 10 $\rho_0 = \left[u_0^2 + \left(\frac{\dot{u}_0 + \xi \omega u_0}{\omega_D} \right)^2 \right]^{1/2}$ Ecuación 11 $\phi = \arctan \left(\frac{\dot{u}_0 + \xi \omega u_0}{\omega_D u_0} \right)$ Ecuación 12	$u_0 =$ Velocidad Inicial $\rho_0 =$ Amplitud de las oscilaciones $\phi =$ Angulo fase
Vibración Forzada $\xi = 0$	$u(t) = \frac{\rho_0}{k} \left(\frac{1}{1 - \beta^2} \right) (\sin(\omega t) - \beta \sin(\omega t))$ Ecuación 13	$\beta = \frac{\omega}{\omega}$ Ecuación 14	$\omega_D =$ Frecuencia angular amortiguada $\zeta =$ Amortiguamiento $\beta =$ Relación entre frecuencia circulares

El amortiguamiento de una estructura se puede deducir utilizando el método de decremento logarítmico. Este método se conoce como el logaritmo natural de la relación que hay entre los dos picos como se aprecia en la Figura 11. La expresión para el decremento logarítmico está dada por la Ecuación 15, en la cual se puede reemplazar el valor de TD en función de la frecuencia angular amortiguada (Ecuación 16). Esta frecuencia está relacionada con la frecuencia angular natural y el amortiguamiento del sistema.

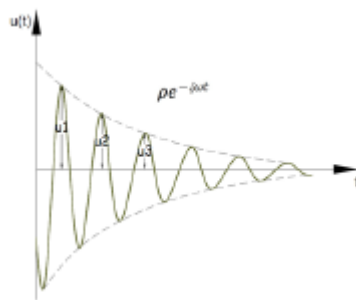


Figura 11. Respuesta de un sistema de 1gdl

(Bajo vibración libre con amortiguamiento)

$$\delta = \ln \frac{u_i}{u_{i+m}} = \xi \omega (mT_D) \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\xi \omega (mT_D) = \xi \omega \left(m \frac{2\pi}{\omega_D} \right) = \xi \omega \left(m \frac{2\pi}{\omega \sqrt{1-\xi^2}} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

Para sistemas con amortiguamiento bajo, como es el caso de la mayoría de las estructuras en ingeniería civil, el valor de $\sqrt{1-\xi^2}$ se asume 1 por motivos de simplificación. De esta forma, despejando el amortiguamiento se obtiene la siguiente expresión.

$$\xi = \frac{\ln \frac{u_i}{u_{i+m}}}{2\pi m} \quad \text{Ecuación 17}$$

1.3.2.1.2 Método de Duhamet

Esta solución se emplea para analizar la respuesta $u(t)$ de un sistema simple sometido a una excitación arbitraria $P(t)$ la cual se considera como la superposición de impulsos infinitesimales como se muestra en Figura 12. La respuesta será igual a la suma de los efectos producidos por los impulsos $P(\tau).d(\tau)$ aplicados en un determinado instante.

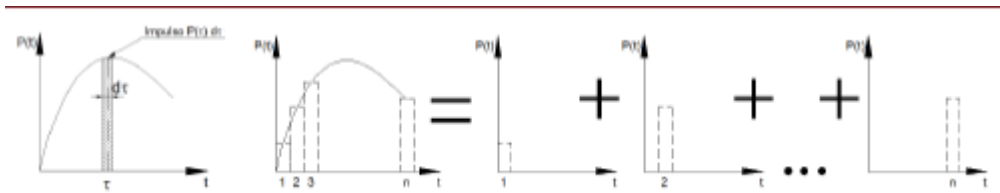


Figura 12. Fuerza Arbitraria $P(t)$

Por motivos de simplificación, se adoptan condiciones iniciales de velocidad y desplazamiento nulos y se reemplazan en la Ecuación 2, reduciendo la expresión de la siguiente forma:

$$m\ddot{u} = p \quad \text{Ecuación 18}$$

De donde despejamos la aceleración

$$\ddot{u} = \frac{p}{m} \quad \text{Ecuación 19}$$

Si se considera un tiempo infinitésimo $d\tau$, la solución de la ecuación del movimiento para carga arbitraria se expresa de la siguiente forma

$$du(t) = e^{-\xi\omega(t-\tau)} \left[\frac{p(\tau)}{m\omega_D} d\tau \sin(\omega_D(t-\tau)) \right] \quad \text{Ecuación 20}$$

La respuesta para una carga arbitraria se obtiene como la integral de las respuestas correspondientes a una sucesión de impulsos infinitesimales y está dada por la Ecuación 21. A esta expresión se le tiene que añadir las condiciones iniciales y cuanto $t=0$ ya que son

independientes de $P(t)$. Esta ecuación se conoce como la integral de Duhamel puede ser aplicada a cualquier tipo de carga.

$$u(t) = \frac{1}{\omega_D m} \int_0^t e^{-\xi \omega(t-\tau)} p(\tau) \sin(\omega_D(t-\tau)) d\tau \quad \text{Ecuación 21}$$

1.3.2.1.3 Método de Newmark

El método de Newmark se basa en la suposición de que la aceleración varía linealmente entre dos instantes de tiempo. En este método, el desplazamiento y la velocidad pueden expresarse mediante la Ecuación 22 y la Ecuación 23 respectivamente.

Formula

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{u}_i + \alpha \ddot{u}_{i+1} \right] \Delta t^2 \quad \text{Ecuación 22}$$

Formula

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \beta)\ddot{u}_i + \beta\ddot{u}_{i+1}]\Delta t \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde α y β son constantes y Δt es el intervalo de tiempo.

Los valores u_i y \dot{u}_{i+1} y se reemplazan en la ecuación del movimiento para obtener la expresión dada por Ecuación 24.

Formula

$$u_{i+1} = \left[\frac{1}{\alpha \Delta t^2} m + \frac{\beta}{\alpha \beta \Delta t} c + k \right]^{-1} \left\{ \begin{aligned} & p_{(i+1)} + m \left(\frac{1}{\alpha \Delta t^2} u_i + \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{u}_i + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{u}_i \right) \\ & + c \left(\frac{\beta}{\alpha \beta \Delta t} u_i + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) \dot{u}_i + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 2 \right) \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_i \right) \end{aligned} \right. \quad \text{Ecuación 24}$$

Por el método de Newmark calculamos el valor de \ddot{u}_0 empleando u_0 y \dot{u}_0 de las condiciones iniciales del problema y se seleccionan valores adecuados para α y β y Δt . el valor de β tiene que ser mayor que $\frac{1}{2}$ y el valor de α tiene que ser mayor que $\frac{1}{4} \left(\beta + \frac{1}{2} \right)^2$.

Luego se calcula u_{i+1} con $i=0$. Finalmente se calculan la aceleración y la velocidad del tiempo t_{i+1} expresados mediante la ecuación 25 y la ecuación 26 respectivamente.

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{\alpha(\Delta t)^2}(u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\alpha\Delta t}\dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1\right)\ddot{u}_i \quad \text{Ecuación 25}$$

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + (1 - \beta)\Delta t\ddot{u}_i + \beta\Delta t\ddot{u}_{i+1} \quad \text{Ecuación 26}$$

1.3.2.1.4 Método de Fourier

La ecuación del movimiento puede resolverse mediante una ecuación diferencial lineal en el dominio de la frecuencia aplicando la transformada de Fourier. La transformada de Fourier de una función $x(t)$ se expresa mediante la Ecuación 27.

Formula

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde j es el numero imaginario ($j^2 = -1$).

Durante el proceso, la transformada de Fourier de los vectores $u(t)$ y $p(t)$ se representarán mediante $Q(\omega)$ y $P(\omega)$ y la ecuación del movimiento se puede reformular mediante la siguiente expresión

$$-m\omega^2 Q(\omega) + c j\omega Q(\omega) + k_e Q(\omega) = P(\omega) \quad \text{Ecuación 28}$$

Despejando $Q(\omega)$ de la Ecuación 28, podemos decir que la transformada de Fourier de la excitación depende de la excitación $P(\omega)$ y de $H(\omega)$ como se aprecia en la Ecuación 29.

$$Q(\omega) = \frac{P(\omega)}{-m\omega^2 + cj\omega + k_e} = H(\omega)P(\omega) \quad \text{Ecuación 29}$$

$H(\omega)$ se conoce también como una función de respuesta en frecuencia y relaciona las transformadas de Fourier de la respuesta y de la excitación, la cual está representada mediante la Ecuación 30. La solución de esta función compleja se realiza obteniendo la raíz cuadrada de la sumatoria de los cuadrados de las partes imaginarias y se expresa mediante la Ecuación 31.

$$H(\omega) = \frac{Q(\omega)}{P(\omega)} = \frac{1}{k_e} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_D}\right)^2 + j\left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_D}\right)\right]} \quad \text{Ecuación 30}$$

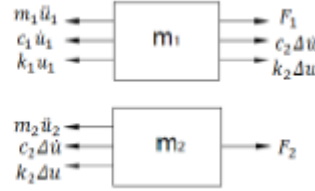
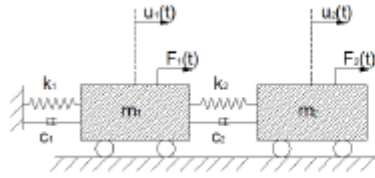
$$H(\omega) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_D}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_D}\right)\right]^2}} \quad \text{Ecuación 31}$$

Finalmente, la solución de $u(t)$ está dada por la transformada de Fourier inversa de la función $Q(\omega)$ y está dada por

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega)P(\omega)e^{j\omega t} dt \quad \text{Ecuación 32}$$

1.3.2.2. Sistemas de múltiples grados de libertad (mgdl)

En la Figura 13a se representa un sistema de 2gdl sometidos a dos fuerzas distintas. Estos sistemas poseen características propias como rigidez, amortiguamiento y masa.



(a) Representación gráfica

(b) Diagrama del cuerpo libre (DCL)

Figura 13. Sistema de 2 grados de libertad

A partir del diagrama de cuerpo libre representado en la Figura 13b obtenemos las fuerzas que se generan en cada uno de los sistemas. Basándonos en la ecuación de equilibrio $\sum F_x = 0$ obtendremos una ecuación para cada uno de los sistemas.

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 + c_2 (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) + k_2 (u_1 - u_2) = F_1 \quad \text{Ecuación 33}$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + c_2 (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + k_2 (u_2 - u_1) = F_2 \quad \text{Ecuación 34}$$

Ordenando estas dos ecuaciones obtenemos

$$\ddot{u}_1 m_1 + \dot{u}_1 (c_1 + c_2) + \dot{u}_2 (-c_2) + u_1 (k_1 + k_2) + u_2 (-k_2) = F_1 \quad \text{Ecuación 35}$$

$$\ddot{u}_2 m_2 + \dot{u}_1 (-c_2) + \dot{u}_2 (c_2) + u_1 (-k_2) + u_2 (k_2) = F_2$$

Las expresiones descritas anteriormente pueden escribirse en forma de matriz, llegando a la ecuación fundamental del movimiento para sistemas de mgdl dada por la Ecuación 37.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 36}$$

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = \bar{F}$$

Ecuación 37

Donde M es la matriz de masa que en este caso es diagonal, es la matriz de coeficientes de amortiguamiento, es la matriz de rigidez, es el vector de aceleración, es el vector de velocidad, es el vector de desplazamiento y es el vector de fuerzas externas. La Tabla 3 muestra un resumen de la solución analítica para sistemas de mgdl, asumiendo amortiguamiento tipo viscoso.

Tabla 3. Solución analítica para sistemas de mgdl (Ramos 2007).

Solución Analítica	$\zeta = 0$	$q(t) = \varphi_i e^{\lambda_i t}$	$[K - (-\lambda_i^2)M]\varphi_i = 0$ Ecuación 2-38 $K\Phi = M\Phi\Lambda$ Ecuación 2-39 $\Phi^T K \Phi = [k_1]$ Ecuación 2-40 $\Phi_m^T K \Phi_m = \Lambda^2$ Ecuación 2-41 $\Phi^T M \Phi = [m_1]$ Ecuación 2-42 $\Phi_m^T M \Phi_m = I$ Ecuación 2-43 $\omega_i^2 = \frac{k_{e,i}}{m_i}$ Ecuación 2-44	$q(t)$ =Solución de la ecuación diferencial de la respuesta dinámica λ_i =Valores propios de frecuencias naturales Φ =Matriz modal Φ_m = Matriz modal normalizada Λ =Matriz diagonal de frecuencias
	$\zeta \neq 0$		$\Phi^T C \Phi = [c_i] = [2\xi_i \omega_i m_i] = \Gamma [m_i]$ Ecuación 2-45 $\Gamma = [2\xi_i \omega_i]$ Ecuación 2-46 $I\ddot{q}_m(t) + \Gamma\dot{q}_m(t) + \Lambda^2 q_m(t) = \left[\frac{1}{m_i}\right] \Phi^T p(t)$ Ecuación 2-47 $\lambda_i^2 + 2\xi_i \omega_i \lambda_i + \omega_i^2 = 0$ Ecuación 2-48 $\lambda_i = -\xi_i \omega_i \pm j\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}$ Ecuación 2-49 $\omega_i = \lambda_i $ Ecuación 2-50 $\xi_i = -Re(\lambda_i)/ \lambda_i $ Ecuación 2-51	$[k_1]$ =Matriz diagonal de rigidez $[m_1]$ =Matriz diagonal de masa I =Matriz identidad Γ =Matriz diagonal de amortiguamiento

1.3.3. Análisis de vibraciones con métodos experimentales

El análisis de vibraciones con métodos Experimentales se puede realizar mediante Excitaciones forzadas o con excitaciones ambientales

1.3.3.1. Análisis de vibraciones mediante Excitaciones Forzadas.

El análisis de vibraciones mediante excitaciones forzadas es una herramienta que se emplea en diversas ramas de la ingeniería y tiene como objetivo identificar las propiedades dinámicas de una estructura. Este tipo de análisis requiere de entradas (inputs) conocidas, las cuales son aplicadas en un sistema para poder registrar las salidas (outputs) respectivas. A partir de las funciones de entrada y salida se obtiene la respuesta FRF (Función de Respuesta en Frecuencia) con la cual es posible estimar las propiedades dinámicas de una estructura (Cunha, Caetano, Magalhaes, & Mouinho, 2006b).

Existe una gran variedad de métodos de identificación modal con excitaciones forzadas, los cuales se pueden clasificar según el dominio de la aplicación (tiempo o frecuencia), el tipo de formulación (indirecta o directa), el número de modos analizados (1gdl o mgdl) y el número de estimaciones de entrada o de salida (SISO, SIMO, MISO, MIMO) (Cunha, Caetano, Magalhaes, & Mouinho, 2006b). Más detalles de este tipo de métodos se encuentra en (Caetano, 2000) y (Cunha, Caetano, Magalhaes, & Mouinho, 2006b).

En este tipo de ensayos, la excitación del sistema estructural que se evalúa se logra con martillos de impacto o vibradores electrodinámicos para estructuras pequeñas. Los vibradores de masa excéntrica, así como vibradores servo-hidráulicos y electrohidráulicos se emplean para la excitación de estructuras más grandes. Estos equipos se muestran en la Figura 14 (Cunha, Caetano, Magalhaes, & Mouinho, 2006b).



Figura 14. Mecanismos de Excitación.

a) martillo de impacto (b) vibrador electro dinámico (c) vibrador de masa excéntrica (d) vibrador servo hidráulico y (e) vibrador electrohidráulico.

1.3.3.2. Análisis de vibraciones con Excitaciones Ambientales

Análisis de Vibraciones con Excitaciones Ambientales.- Cuando se emplean métodos experimentales con vibraciones forzadas para el estudio de estructuras de Ingeniería Civil, existen problemas de aplicación debido a su gran tamaño. Los equipos empleados para la excitación de la estructura no poseen la energía suficiente para la estimulación de modos de vibración importante (Cunha, Caetano, Magalhaes, & Mouinho, 2006b).

Por ejemplo, el análisis de vibraciones con excitaciones ambientales, conocido también como análisis de identificación modal operacional-OMA, es una nueva herramienta que se emplea para la identificación de las propiedades dinámicas de las estructuras. En este tipo de análisis no se conocen las entradas ya que son vibraciones ambientales las que originan la excitación (Cunha, Caetano, Magalhaes, & Mouinho, 2006b). En este tipo de técnicas, las excitaciones ambientales se consideran como un proceso estocástico estacionario de ruido blanco Gaussiano que excitan a las estructuras en todo el rango de frecuencia de interés. Debido a la naturaleza de los datos, la respuesta estructural incluye las contribuciones de las vibraciones ambientales y señales de ruido

proveniente de fuentes no deseadas. Por esta razón, las técnicas empleadas para el procesamiento de datos deben ser capaces de separarlas. Estas técnicas se pueden clasificar en dos grupos dependiendo del dominio donde se las analiza: en tiempo o en frecuencia. Las técnicas en el dominio de la frecuencia se basan en un análisis de las funciones de densidad espectral determinada por diferentes métodos. Este tipo de métodos presentan tiempos de procesamiento cortos, pero poseen dificultades al momento de identificar modos/frecuencias cercanos. Por otro lado, las técnicas en el dominio del tiempo se basan en el ajuste de modelos numéricos y se les conoce como métodos paramétricos. La Tabla 4 muestra los métodos más empleados para analizar los datos en el dominio del tiempo y la frecuencia. Mayor información sobre los métodos se encuentra en (Caetano, 2000) y (Cunha, Caetano, Magalhaes, & Mouinho, 2006b).

Tabla 4. Métodos Output-Only

Dominio de la Frecuencia	Dominio del Tiempo
Peak Picking (Felber 1993)	Random Decrement (Asmussen 1997)
Frequency Domain Decomposition (Brinckekr et al.2000)	Maximun Likelihood Methods (Guillaume et al. 1998)
Enhanced Frequency Domian Decomposition (Brincker et al. 2001)	Stocastic Subspace Identification Methods (Van Overschee y de Moor 1991)
Polimax (Peeters y Vanhallebeke 2005)	Recursive Techniques (Mrad 1988)

1.3.3.3. Métodos de Procesamiento de Datos de Ensayos Modales Operacionales

Selección de Picos

El método de Selección de Picos o Peak Picking (Felber 1993) es el método más simple y práctico y consiste en la selección de los picos más altos del promedio normalizado de las funciones de densidad espectral (Braun et al. 2002). Para la obtención de estas funciones se emplea el método Welch (Welch 1967). Este método se encarga de transformar las señales del dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia y se encarga de la estimación de la función de densidad espectral de las mismas. El cálculo de amortiguamiento se realiza utilizando la fórmula de decremento logarítmico que se muestra en la sección 1.3.2.1. Un ejemplo de la función de densidad espectral obtenida mediante el método Welch se muestra en la Figura 13. Así también se muestran los picos que corresponden a las primeras frecuencias naturales de la estructura que se estudia.

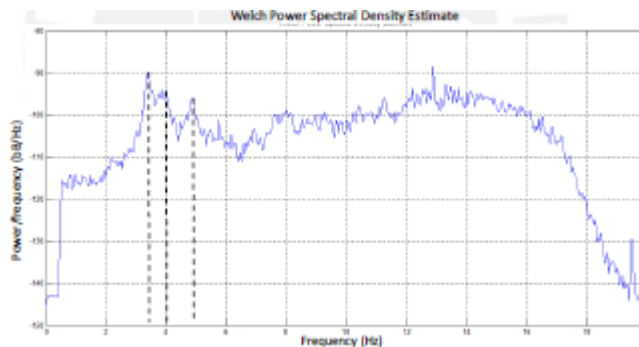


Figura 15. Función de densidad espectral para el método Peak Picking

Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD)

FDD o Descomposición en el Dominio de la frecuencia (Brincker et al. 2000) es un método mediante el cual, la matriz de las funciones de densidad espectral se descompone en valores y vectores singulares para obtener gráficos más claros y con menos ruido. Para

esto se emplea el algoritmo de descomposición de valores singulares SVD a partir de los cuales se identifica la auto-correlación de las funciones de densidad espectral. Los picos de las funciones de valores singulares representan las frecuencias naturales de la estructura. El desarrollo del algoritmo del método FDD se muestra en la Figura 15.

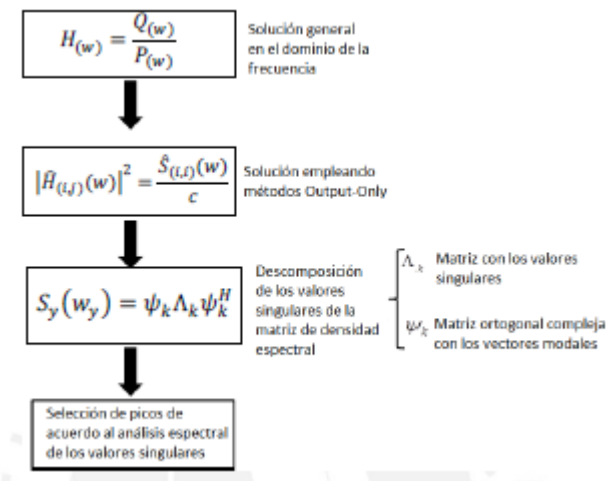


Figura 16. Algoritmo del método de descomposición.

En el dominio de la frecuencia-FDD (Aguilar 2010).

El método FDD se ha optimizado con la presentación del método EFDD (Brincker et al. 2001) por sus siglas en inglés Enhanced Frequency Domain Decomposition. Para el EFDD se aplica la transformada de Fourier inversa de cada función de densidad espectral. La función de respuesta obtenida es la respuesta de un sistema de 1gdl bajo vibración libre. La frecuencia natural de cada sistema está representada por la intersección de la respuesta con el valor cero y el coeficiente de amortiguamiento se calcula mediante el decremento logarítmico.

Identificación de Sub espacios Estocásticos (SSI)

El método de Identificación de Sub espacios Estocásticos (Van Overschee & De Moor 1991) se desarrolla en el dominio del tiempo y permite la estimación de las propiedades dinámicas con una alta resolución. El método SSI tiene como objetivo principal la identificación de la matriz A y la matriz C (ver Figura 16) que contienen información sobre frecuencias, modos de vibración y coeficientes de amortiguamiento (Ramos 2007).

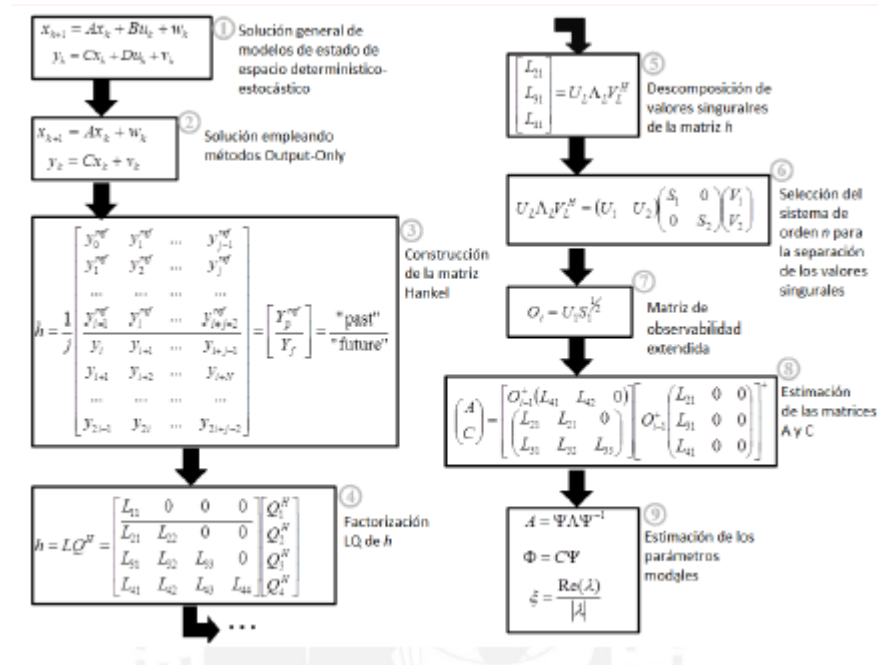


Figura 17. Algoritmo SSI

Del método de identificación de sub espacios estocásticos SSI (Aguilar 2010)

Los resultados de este método se suelen representar en diagramas de estabilización que contienen polos estables, inestables y de ruido. Estos diagramas consisten en un sistema de coordenadas en las cuales el eje de las abscisas corresponde a las frecuencias y las ordenadas al orden del modelo donde se determina la respuesta dinámica del sistema. A partir de este diagrama (Figura 17), es posible identificar las propiedades dinámicas de la estructura mediante la selección de polos estables. Cada configuración definida tendrá su propio diagrama de estabilización mediante los cuales se seleccionará un orden de modelo en común. Cuando todas las configuraciones tengan el mismo orden de modelo, la identificación modal se realiza mediante la selección de columnas de polos estables. Mientras más vertical sea la columna de polos estables, mayor precisión presenta la frecuencia estimada. Más detalle de este método en Aguilar (2010).

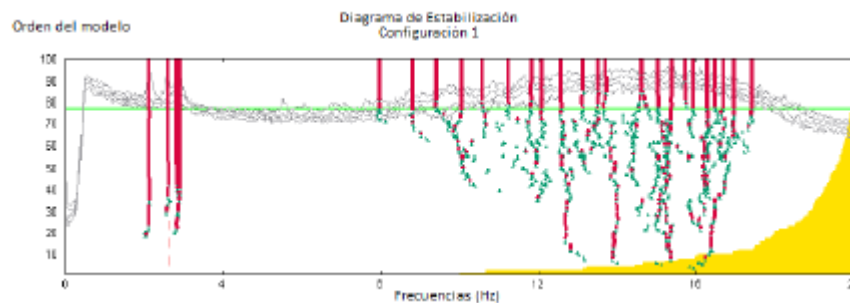


Figura 18. Diagrama de estabilización del método SSI (Alaboz 2009)

1.4. FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Son los métodos de identificación modal adecuados para la evaluación estructural de construcciones históricas 2019?

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

O1 - Describir los métodos de identificación modal para la evaluación estructural de construcciones histórica.

1.5.2. Objetivos Específicos

O2 - Estudiar los conceptos básicos sobre métodos de identificación modal y dinámica estructural.

O3 - Realizar una investigación bibliográfica sobre métodos de identificación modal y sus aplicaciones para el estudio de construcciones modernas e históricas.

O3 - Describir las características, materiales y sistemas estructurales típicos de la construcción colonial en la costa del Perú.

1.6. HIPOTESIS.

La aplicación de métodos de identificación modal nos permite evaluar estructuras en construcciones históricas.

1.6.1. Hipótesis General

Se determina los métodos de identificación modal para la evaluación estructural de construcciones históricas – 2019.



1.6.2. Hipótesis Específica

Se determina los métodos de identificación modal para la evaluación estructural de construcciones históricas – 2019.

Se determina las propiedades, características, materiales y sistema estructural para la evaluación estructural de construcciones históricas – 2019.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. TIPO DE INVESTIGACION.

La investigación es tipo teórica o sistémica.

2.1.1. Diseño de la investigación

En el presente trabajo el diseño de investigación viene a ser de tipo revisión sistema porque consiste en la revisión bibliográfica.

2.2. POBLACION Y MUESTRA.

Recorrido por las construcciones histórica de la ciudad de Trujillo.

Se revisó al menos 25 estudios sobre métodos de identificación modal.

Se identificó los tipos de dispositivos electrónicos para aplicaciones de métodos de identificación modal.

2.3. TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS.

Revisión bibliográfica sobre transductores de alta sensibilidad (sensores triaxiales) para medir desplazamiento, velocidad y/o aceleración. El sistema de adquisición de datos y el de almacenamiento de datos son un aspecto importante para la medición de las señales ambientales (Aguilar, Ramos, Torrealva, & Chácara, 2013).

Revisión bibliográfica sobre vibro metros o acelerómetros de alta resolución que tenga una interface a un computador de escritorio (Cunha, Caetano, Magalhaes, & Mouinho, 2006b).

Los métodos de procesamiento de señales para el análisis operacional modal se dividen según el dominio de análisis en frecuencia o tiempo. Para la evaluación estructural,

los métodos más empleados en el dominio de la frecuencia son el método de selección de picos (PP), descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD) y descomposición en el dominio de la frecuencia mejorado (EFDD). Uno de los métodos más utilizados en el dominio del tiempo es la identificación de sub espacios estocásticos (SSI). Los métodos en el dominio del tiempo no dependen de la respuesta en frecuencia y en algunos casos brindan mejores resultados que los métodos en el dominio de la frecuencia (Rainieri & Fabbrocino, 2011).

2.4. PROCEDIMIENTOS ESTANDARES BÁSICOS.

- a) Instalación de los equipos de medición
- Colocar los equipos, necesarios para nuestras mediciones, en un lugar adecuado.
 - Colocar los imanes (magnetos) a los respectivos acelerómetros.
 - Colocar los cables, a los respectivos acelerómetros, estos pueden ser axiales como triaxiales.
 - Colocar son sumo cuidado los acelerómetros a la estructura a analizar de la siguiente manera:



Figura 19. Instalación de acelerómetro.



Figura 20. Ubicación correcta del acelerómetro.

- Colocar los otros extremos de los cables a sus respectivos canales en el cDAQ, en las posiciones ya establecidas.



Figura 21. Instalación final con la unidad de toma de datos.

- Conectar el cDAQ a la computadora a utilizar.
- Energizar el cDAQ y dejarlo listo para la toma de datos.

b) Actividades de toma de datos

Para poder procesar nuestros datos nos apoyaremos del software ARTeiMIS Modal Pro 5.3, los pasos necesarios para poder procesar los datos obtenidos son:

- Preparación de la geometría:

(Prepare Geometry) Abrimos el software ARTeMIS Modal Pro 5.3 y nos muestra la siguiente interface: Seleccionamos la opción Create New Project, luego damos check en la opción Blank Project y luego hacemos click en Finish.

Luego hacemos click en Setup y damos check en Prepare Geometry, Es en esta ventana donde se preparará la geometría de la estructura que queremos analizar.

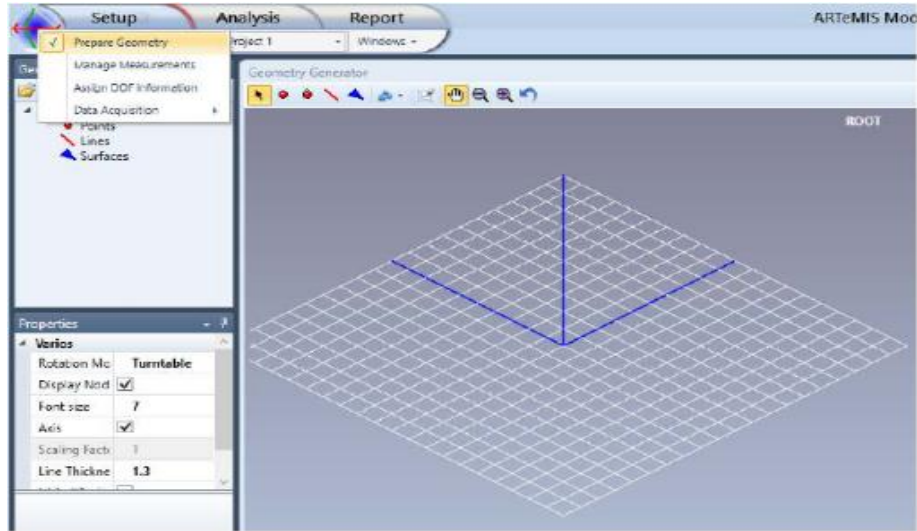


Figura 22. Preparación de la Geometría

También hay una forma más fácil de importar la geometría deseada mediante AUTOCAD y EXCEL, para lo cual se dibuja la geometría que quieras analizar, en este caso, realice dicha geometría.

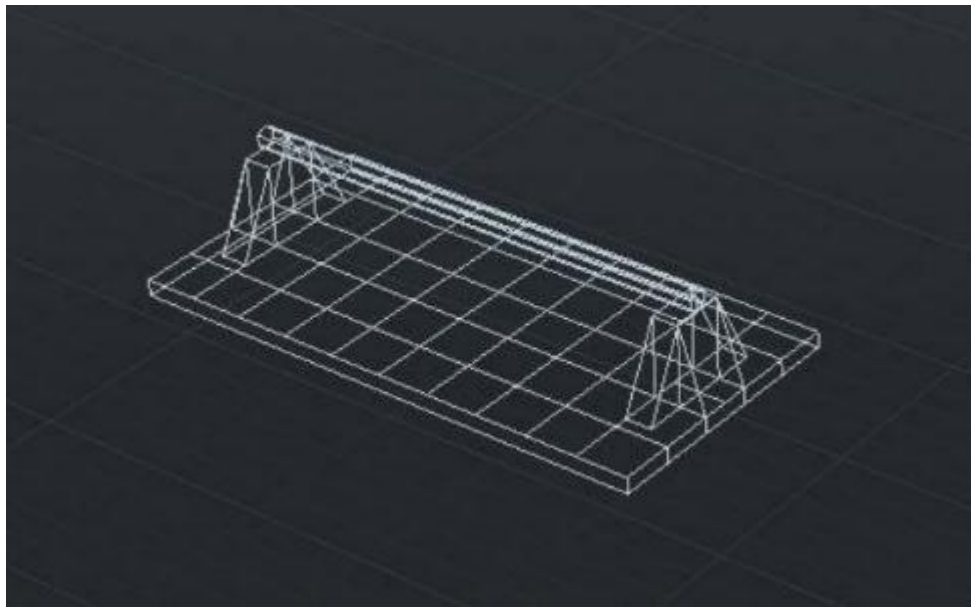


Figura 23. Geometría para exportar desde Autocad

c) Manejo de las mediciones (Manage Measurements)

- Hacemos click en Setup y le damos a Check Manage Measurements.

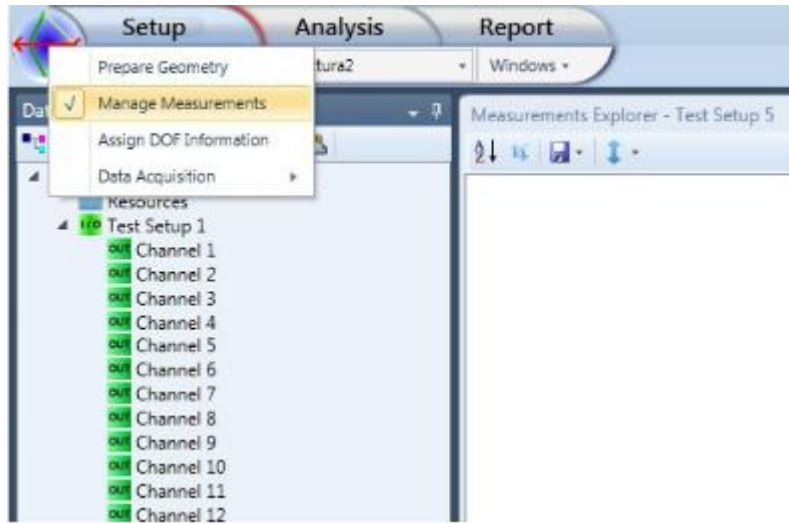


Figura 24. Manejo de Mediciones.

- Una vez hecho el paso anterior seleccionamos el New Measurement Project ubicado en la ventana de Data Organizer y luego damos click en Insert Object , entonces automáticamente se creara un Test Setup, luego abrimos la data obtenida en el LABView

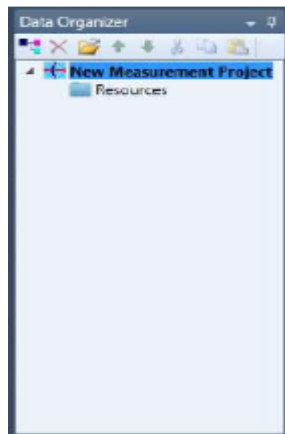


Figura 25. Elegimos Una Nueva Medición.

- Al abrir la data medida con el LABView nos dará las series de tiempo de aceleración para cada canal.

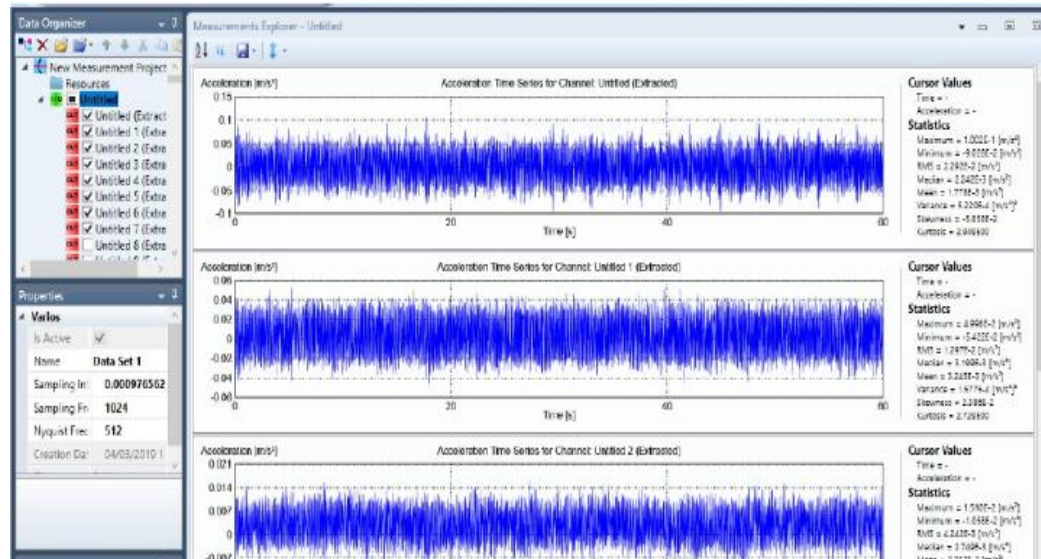


Figura 26. Aceleraciones por cada canal.

- d) Asignación de los canales creados a la geometría de ARTEMIS MODAL PRO.

Para ello damos click en Setup y luego le damos Check a Assing DOF Information

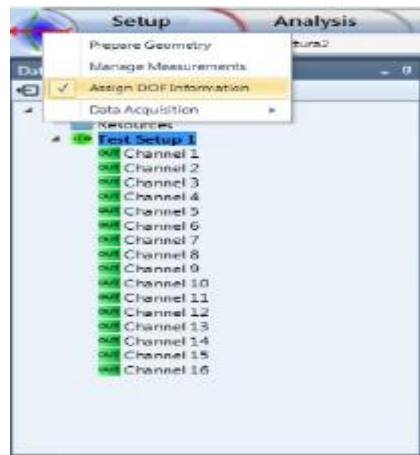


Figura 27. Asignar Canales Creados a la Geometría.

- Nos mostrara la siguiente interfaz, en donde seleccionaremos cada canal y la llevaremos a su respectiva ubicación en la gráfica.

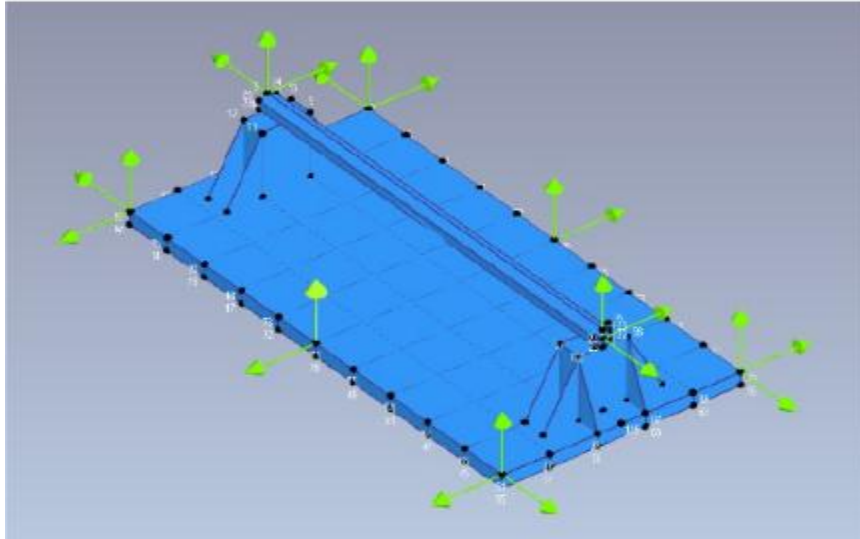


Figura 28. Ubicación del Canal en la Gráfica.

- e) Actividades de desinstalación de los equipos de medición y excitación de la estructura
 - Extraer los acelerómetros, de los puntos de medición, uno por uno con sumo cuidado, como también extraer los imanes (magnetos) de cada uno de los acelerómetros y guardarlos en su respectiva maleta sin producir golpe alguno entre ellos.
 - Desinstalar los cables tanto de los acelerómetros y del dispositivo de adquisición de datos (cDAQ) y guardarlos en su respectiva caja de almacenaje.
 - Desinstalar la fuente de energía del dispositivo de adquisición de datos (cDAQ) con su respectivo destornillador, como también el cable que conecta el cDAQ con la computadora.

- Desinstalar la fuente de voltaje variable con su respectivo destornillador, para poder desmontarlos motores instalados

Los ensayos de identificación modal componen una herramienta que sirve para determinar las propiedades dinámicas de una estructura (frecuencia natural, amortiguamiento y modos de vibración). Estos ensayos se pueden integrar en un esquema de monitoreo continuo para determinar el cambio de las propiedades dinámicas en el tiempo, detección de daño, (Aguilar, Dynamic Structural Identification using Wireless Sensor Networks. Tesis de Doctorado, 2010).

Para obtener la respuesta de la estructura se necesitan transductores o sensores de medición y unidades de adquisición que se encargan de convertir señales analógicas en digitales así como de la filtración de datos. Este tipo de ensayos tuvo sus primeras aplicaciones en la década de los 80's donde se estudiaron aeronaves y estructuras en alta mar. Con el pasar de los años y los avances tecnológicos, los diferentes métodos se están aplicando en otras ramas de la ingeniería. En la Ingeniería Civil es muy usual que se empleen estas técnicas para evaluar el comportamiento de puentes o edificios.

Las construcciones históricas también son evaluadas con la ayuda de estos métodos, especialmente empleando el ruido ambiental como fuente de excitación, ya que son técnicas no destructivas que encajan en las filosofías modernas de estudio y conservación de monumentos.

Sistemas de Medición para Ensayos Experimentales de Identificación Modal.- Los ensayos experimentales se realizan midiendo en la estructura algún parámetro que varía en el tiempo. Este parámetro puede ser la aceleración, velocidad o desplazamiento de algunos

puntos de la estructura. Los sistemas de medición de estos parámetros están compuestos por una unidad de adquisición ligada a una estación central y un transductor de medida. En algunos casos, se utiliza conexiones remotas para controlar el sistema y/o visualizar los resultados. El esquema de funcionamiento de este sistema se muestra en la Figura 30



Figura 29. Sistema de Monitoreo Dinámico de Estructuras (Elab. Propia)

CAPÍTULO III. RESULTADOS

Se ha mencionado los diversos métodos analíticos que se emplean para el desarrollo de la ecuación del movimiento de sistemas de 1gdl y mgdl. Se introduce también la dinámica experimental la cual se divide en métodos con excitaciones forzadas o con excitaciones ambientales. En los últimos años, para el estudio de estructuras de Ingeniería Civil, se está empleando los métodos de vibraciones ambientales porque son más fáciles y menos costosos de aplicar. Los métodos de procesamiento de datos disponibles para estas técnicas son diversos y los más usados son el FDD, EFDD y SSI. Los dos primeros que se emplean en el dominio de la frecuencia mientras que el último en el dominio del tiempo. Por otro lado, se ha visto que la calibración de los modelos numéricos se realiza mediante criterios que consisten en la comparación de frecuencias y modos de vibración (Chácara, 2013).

Tabla 5. Métodos de procesamiento de datos investigados

Técnica	Descripción	Dominio	Autor
FDD	Descomposición en el dominio de la frecuencia	Frecuencia	Brincker et al. 2000
EFDD	Enhanced Frequency Domain Decomposition	Frecuencia	Brincker et al. 2000
SSI	Identificación de Sub espacios Estocásticos	Tiempo	Van Overschee & De Moor 1991

Datos obtenidos de la revisión sistémica (Elaboración propia)

En la actualidad la aplicación métodos de identificación modal o de ensayos no destructivos es importante para estudiar las construcciones históricas porque proveen datos

precisos sobre propiedades de los materiales y condiciones de frontera sin necesidad de dañar su estructura. En particular, los ensayos experimentales de identificación modal han demostrado ser útiles porque brindan información cuantitativa del comportamiento real y del estado de daño de las estructuras.

Según (Ramos, Casarin, Algeri, Lourenco, & Modena, 2006) se realizaron ensayos experimentales en la iglesia de San Torcato, ubicada en Guimarães, al norte de Portugal. En este caso, se emplearon 10 acelerómetros piezoeléctricos de alta sensibilidad. Se definieron 35 puntos de medición y 9 configuraciones para el análisis modal en la iglesia de San Torcato así como la distribución de los puntos de medición en planta. El procesamiento de las señales se realizó empleando cuatro métodos, tres de ellos en el dominio de la frecuencia y uno en el dominio del tiempo. Se identificaron los primeros cuatro modos de vibración y con estos resultados se calibró exitosamente el modelo numérico.

En Turquía se estudió el campanario de Hagia Sofia cuya evaluación estructural se realizó después de su restauración. La estructura se excitó con vibraciones ambientales y vibraciones generadas con un martillo de impacto para asegurar la excitación del sistema. El registro de señales se realizó empleando acelerómetros uniaxiales con una sensibilidad de 10 V/g, con un rango de $\pm 0.5g$. Los métodos empleados para la identificación modal fueron el EFDD y el SSI con los cuales se obtuvieron cinco modos de vibración. Estos resultados se compararon con los resultados obtenidos antes de su restauración y se observó una disminución en las frecuencias y en el amortiguamiento (Turker & Bayraktar, 2011).

El Qutub Minar ubicado en Nueva Delhi, India, es otra construcción histórica en la que se ha realizado ensayos de identificación modal. Esta construcción es una de las torres de albañilería de arcilla cocida más altas del mundo y es el monumento más alto de la localidad. Para la medición de la respuesta dinámica se emplearon ocho acelerómetros uniaxiales con un rango de ± 0.5 g y una sensibilidad de 10 V/g. Para la identificación de sus propiedades dinámicas se empleó un método en el dominio del tiempo (SSI) con el cual se definieron catorce modos de vibración, con sus respectivas frecuencias y valores de amortiguamiento (Ramos, Casarin, Algeri, Lourenco, & Modena, 2006).

La palabra “Quincha” proviene etimológicamente de la palabra quechua “kencha” que significa cerramiento formado por palos, cañas o cerramientos entretejidos cubiertos de barro (Rodríguez, 2003). La quincha es un sistema constructivo típico cuyo uso remonta a la época prehispánica. Las culturas de aquella época aprovecharon los medios y materiales que abundaban en la naturaleza y en la costa, la construcción con este sistema tuvo una gran acogida. Con la llegada de los españoles, la construcción con quincha se paralizó y se decidió construir una nueva ciudad empleando materiales más “resistentes” para dar prestigio a sus construcciones. En la época, se instalaron fábricas de ladrillo y adobe que fueron los materiales más empleados en diversos tipos de estructuras. Sin embargo, en la costa del Perú ocurrieron movimientos sísmicos de gran intensidad los cuales afectaron gravemente a las estructuras de adobe y ladrillo e hicieron modificar su sistema constructivo. Así fue como la construcción con quincha es nuevamente empleada pero únicamente en bóvedas, ya que era un material más ligero, trabajable, económico y con la ventaja de que se le puede dar la textura deseada con un buen revestimiento. No fue hasta después del terremoto de 1746 que se decidió implementar el uso de la quincha en

todas las construcciones ya que éstas fueron las menos afectadas en comparación con otras construcciones tradicionales de la época. A partir de ese momento, las construcciones con el primer nivel de adobe y los niveles superiores de quincha proliferaron hasta los inicios de la República (Schilder, 2000).

El proceso constructivo de los muros de quincha comienza con el asentado de la solera inferior que usualmente se ubica sobre los muros de adobe. Mediante conexiones de caja y espiga se colocan los pies derechos o postes que son piezas de madera de sección rectangular. Estos elementos tienen un espaciamiento que varía desde 0.60 m hasta 1.00 m. Luego se coloca la solera superior empleando el mismo tipo de conexión. Elementos diagonales llamados tornapuntas o cítaras son empleados para brindarle rigidez a la armadura. Estos rigidizadores se clavan a la armadura, uniendo la solera inferior con los pies derechos y llegan hasta una altura que varía desde 0.70 m a 0.90 m desde la solera inferior. El muro de quincha necesita una sección de transición, para lo cual se colocan adobes hasta una altura que las tornapuntas. Esta transición hace que el muro de quincha del segundo piso presente una mejor estabilidad debido al peso que se concentra en la parte inferior del mismo. En cada uno de los postes se realizan perforaciones para poder colocar caña horizontal, la cual se entrelazará con la caña vertical que se coloca entre los pies derechos. Finalizando la construcción, se rellena el muro con una o dos capas de mortero de tierra. En el caso de tener un tercer piso, la construcción de estos muros requiere de postes o pies derechos que se unen a la solera inferior y superior mediante conexiones caja y espiga. La sección de transición y las cítaras desaparecen. Para rigidizar a la estructura se colocan diagonales de madera. Entre los pies derechos se coloca caña horizontal y vertical, Finalmente, el muro se recubre con barro (Torrealva & Vicente, 2012).

Los muros de quincha son elementos livianos y flexibles. Debido a las fibras de la madera, los muros de quincha tienen buena resistencia a la flexión, y bajo solicitaciones de compresión admiten esfuerzos de 8MPa a 10MPa. Los paneles de quincha presentan un comportamiento linealmente elástico (Blondet et al. 1986). El revestimiento de barro es el componente que soporta las cargas horizontales, y su resistencia depende del revestimiento que se emplee. La rigidez del marco de madera aumenta considerablemente al considerar tanto el revestimiento de madera como la caña. Las fallas por corte se originan por tracción diagonal y se generan comúnmente en el revestimiento de barro y en las conexiones (Gutierrez & Manco, 2006).

Tabla 6. Resumen de propiedades mecánicas del adobe.

Tipo de construcción	Peso Especifico kN/m ³	Esfuerzo a la compresión (MPa)	Esfuerzo a la tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Referencia
Antiguas	-	0.66 – 2.15	0.13 – 0.4	51 – 448	(Silveira et al. 2012)
	14.1 – 18.8	0.24 – 1.33	0.12 – 0.32	55 - 289	(Adomi et al. 2013)
	14.7 – 18.7	0.6 – 1.12	-	-	(Vásquez 2008)
	15.9 – 18.6	0.15 – 0.75	-	-	(Vásquez 2010)
	-	0.77 – 1.2	0.31 – 0.36	26 – 40	(Quagliarini et al. 2009)
	19.4	-	-	200	(Fonseca & D' Ayala 2012)
Modernas	-	2.08	0.29	-	(Velosa et al. 2010)
	-	5.15	-	94	(Piattoni et al. 2011)
	-	0.53 – 1.72	0.106 – 0.344	-	(Varum et al. 2011)
	-	1.57	-	-700	(Matos et al. 1997)
	14.6 – 18.7	0.71 – 4.5	-	-	(Ribeiro et al. 2005)

Datos obtenidos de la revisión sistémica (Elaboración propia)

Tabla 7. Módulo de Elasticidad de paneles de quincha.

Material	Módulo de Elasticidad (Gpa)	Referencia
Madera tipo B	10	NTE 010
Caña	19.5	CYTED (2002)
Adobe	0.30	Adomi et al. (2013)
Mortero de barro	2.1	Taylor et al. (2005)

Datos obtenidos de la revisión sistémica (Elaboración propia)

Se han revisado al menos 24 artículos que cumplen con los objetivos los cuales se muestran en la tabla 8, se puede observar también en el anexo 1.

Tabla 8. Objetivos generales y específicos de la investigación

Objetivo	Detalle del objetivo de la investigación
O1	Describir los métodos de identificación modal para la evaluación estructural de construcciones histórica.
O2	Estudiar los conceptos básicos sobre métodos de identificación modal y dinámica estructural.
O3	Realizar una investigación bibliográfica sobre métodos de identificación modal y sus aplicaciones para el estudio de construcciones modernas e históricas.
O4	Describir las características, materiales y sistemas estructurales típicos de las construcciones históricas.

Datos obtenidos de la revisión sistémica (Elaboración propia)

Tabla 9. Total de revisiones según objetivos

Objetivo	Total de revisiones bibliográficas por objetivo de estudio
O1	24
O2	7
O3	11
O4	6

Datos obtenidos de la revisión sistémica (Elaboración propia)

Tabla 10. Análisis de vibraciones con métodos experimentales

(Dinámica experimental)

Métodos	Tipos de ensayos	Herramientas requeridas
Métodos con excitaciones forzadas	Ensayos destructivos	Excitaciones físicas con martillos de impacto, vibradores servo-hidráulicos y electrohidráulicos
Métodos con excitaciones ambientales (Vibraciones ambientales)	Ensayos No destructivos	Acelerómetros electrodinámicos, Acelerómetros piezoeléctricos, métodos de procesamiento de datos

Datos obtenidos de la revisión sistémica (Elaboración propia)

En la tabla 11 resaltamos los principales estudios revisados que fueron incluidos.

Tabla 11. Revisión Bibliográfica

Universidad o IES	Nombre del Trabajo de Investigación	Autor	País de la universidad o IES	Tipo Investigación	Año
Copyright Military University of New Granada	Estimación de los periodos naturales de vibración de viviendas de baja altura con muros de concreto/estimation of the natural vibration periods in traditional housing with concrete walls	León et al.	Bogotá Colombia	Reporte	2009
Copyright Universidad Nacional de Colombia	Analysis of constructive damage on single-family homes produced by vibrations induced by soil impacts in their surroundings	Villa et al.	Bogotá Colombia	Artículo Científico	2017
Copyright Military University of New Granada	sistemas automáticos para la adquisición de datos enfocados a examinar pavimentos flexibles/automated systems for data acquisition oriented to examine flexible pavements	Díaz et al	Bogotá Colombia	Reporte	2014
© EFE 2010. Agencia EFE S.A.	Cuba moderniza equipos para detectar sismos con tecnología donada por China	Agencia EFE S.A.	Miami EEUU	WIRE FEED	2010
Copyright (c) 2009 La Nación	Médicos de edificios	La Nación	Santiago Chile	Periódico	2009
Copyright Universidad de Antioquia	Desarrollo e implementación de un sistema láser para caracterización dinámica y medición de desplazamientos en estructuras civiles/Development and implementation of a laser system for dynamic characterization and displacement measurement of civil structures	Franco et al.	Medellín Colombia	Reporte	2011
Copyright Universidad EAFIT	Tratamiento de outliers para el estudio de transmisión de vibraciones del ferrocarril	González et al.	Medellín Colombia	Reporte	2012

Copyright Pontificia Universidad Javeriana	Conservación del patrimonio arqueológico construido con tierra en Iberoamérica	Guerrero et al.	Bogotá Colombia	Reporte	2012
Copyright Consejo Superior de Investigaciones Científicas University of Minho, Portugal	Recalce en condiciones de emergencia: 40 viviendas cercanas al río Guadalquivir, España	A Ferreira et al.	Barcelona España	Articulo Científico	2016
5th International Operational Modal Analysis Conference	Experimental Modal Identification of an Existing Earthen Residential Building	Aguilar, R	Portugal	Informe	2013
4th International Operational Modal Analysis	Operational modal Analysis of the "Guglia Maggiore" of the "Duomo" in Milano. Estambul: 4th International Operational Modal Analysis, Turquia	Busca et al.	Estambul Turquía	Informe	2011
University of Porto	Dynamic of Cable-stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction. Porto:	Caetano, E. (2000).	Portugal	General Information	2000
EVACES 2011 – Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures University of Porto	Dynamic identification and monitoring of the churches of St. Biagio and St. Giuseppe in L'Aquila. Varenna, Italia	Casarín, et al.	Italia	General Information	2011
University of Porto	From Input-Output to Output only Modal Identification of Civil Engineering Structures. Final Report 2006. Samco.	Cunha, et al.	Portugal	General Information Report	2006
Copyright Military University of New Granada	Obtenido de Sistemas Automáticos para la adquisición de datos enfocados a examinar pavimentos flexibles / Automated systems for data acquisition oriented to examine flexible pavements	Díaz, H.	Colombia	General Information Report	2014
Consejo superior de investigaciones científicas	Rehabilitación sísmica de edificaciones históricas en tapia pisada: estudio de caso de capillas doctrineras reforzadas con malla de acero y madera de confinamiento. Barcelona, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas 2016	Gómez, V.	España	Articulo Científico	2016
Pontificia Universidad Católica del Perú	Características sísmicas de las construcciones de tierra en el Perú. Lima, Perú: Tesis de Licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú.	Gutiérrez, L., & Manco, M	Perú	Tesis	2006
4th International Operation Modal Analysis.	Output-only modal identification for prediction of the elastic period of masonry towers. Estambul, Turquia:	Rainieri, E., & Fabbrocino, G.	Turquía	Report	2011

University of minho	Dynamic estructural health monitoring of Saint Torcato Church. Torcato: Mechanical System and Signal Processing.	Ramos, L., Aguilar, R., Lourenco, P., & Moreira, S.	Portugal	General Information	2012
Proceeding of the 1st International Congress on Construction History.	Quincha Architecture: The Development of an antiseismic estructural system in seceteenth century Lima. Madrid, España:	Rodríguez, H.	España	Report	2003
Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla 26-28 octubre 2000: 1019-1026.	La herencia española: las bóvedas y cúpulas de quincha en el Perú. Sevilla, España	Schilder, C.	España	Reporte	2000
Pontificia Universidad Católica del Perú	Proyecto de Reforzamiento Sísmico: Evaluación experimental del comportamiento sísmico de muros de quincha del centro histórico de Lima, Perú. Lima, Perú.	Torrealva, D., & Vicente, E.	Perú	Información general	2012
Karadeniz Technical University	Full-Scale Ambient Vibration Test of Hagia Sophia Bell-tower After Restoration. Estambul, Turquía: 4th International Operational Modal Analysis Conference.	Turker, T., & Bayraktar, A.	Turquía	Report	2011

Datos obtenidos de la revisión sistémica (Elaboración propia)

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los ensayos experimentales como herramienta de evaluación estructural de construcciones históricas antiguas y modernas de Ingeniería Civil se han popularizado en los últimos años. La orientación al uso de las técnicas experimentales de vibración con ruido ambiental en estructuras de Ingeniería Civil es porque sus resultados son útiles para entender el comportamiento de las mismas y para realizar procesos de calibración de modelos numéricos y procesos de detección de daño.

Los métodos de procesamiento de señales para el análisis modal se dividen según el dominio de análisis en frecuencia o tiempo.

Para la evaluación estructural, los métodos más empleados en el dominio de la frecuencia son el método de selección de picos (PP), descomposición en el dominio de la frecuencia (FDD) y descomposición en el dominio de la frecuencia mejorado (EFDD). Uno de los métodos más utilizados en el dominio del tiempo es la identificación de sub espacios estocásticos (SSI). Los métodos en el dominio del tiempo no dependen de la respuesta en frecuencia y en algunos casos brindan mejores resultados que los métodos en el dominio de la frecuencia. En general, no existe un método que pueda ser aplicado en todos los casos.

Para este tipo de estudio de revisión sistémica se realizaron las búsquedas por palabras claves en las bibliotecas virtuales indicadas en la tabla 5, como resultado obtuvimos un Excel con los datos de los títulos, resúmenes, autores, año de producción de la literatura, y el link para descarga de los artículos y temas relacionados.

Tabla 12. Fuentes de información revisadas

Fuentes de Información	Tipo	Total de revisiones
Biblioteca virtual	ProQuest Central, SciTech Premium Collection	20
WebSite	Google Statistic	09
Biblioteca Virtual	EBSCO	12

Datos obtenidos de la revisión sistémica (Elaboración propia)

Ante la pregunta de investigación ¿Son los métodos de identificación modal adecuados para la evaluación estructural de construcciones históricas.?.

Se ha encontrado estudios en Análisis del daño constructivo en viviendas unifamiliares producido por vibraciones inducidas por los impactos del suelo en su entorno, Actualmente no existe una legislación específica que aborde el tema de los impactos inducidos en las vibraciones del suelo debido al trabajo industrial, ni un consenso general con respecto a los niveles permisibles de estándares de vibración que abordan problemas (manejo de pilotes, trenes de pasos, etc.). Por lo tanto, y teniendo en cuenta la naturaleza impulsiva de la fuente de excitación (es decir, los impactos de alto nivel, a corto plazo), el empleo se justifica como un indicador de mediciones de vibración, el valor máximo de la señal en la aceleración o velocidad en el dominio del tiempo y la frecuencia dominante, ya que tanto el peligro con respecto a una estructura como el inconveniente para los ocupantes, influyen en ambos factores. En este documento se analizan los daños dinámicos, constructivos o estructurales causados en una vivienda por el trabajo industrial de una empresa de una empresa de acero (Villa, 2017).

En un estudio realizado por (Gómez, 2016), se informa que en América Latina, hay poca investigación sobre iglesias coloniales (capillas) construidas con tierra (tierra apisonada) teniendo en cuenta consideraciones arquitectónicas, históricas y estructurales (rendimiento sísmico). La falta de estudios ha producido malas intervenciones del patrimonio histórico. En este artículo, los autores presentan los resultados de las pruebas de agitación en la mesa de modelos a escala 1:50 de capillas doctrinales de tierra apisonada construidas en Colombia en los siglos XVI y XVIII. Las paredes de los modelos de las capillas se reforzaron sísmicamente con dos técnicas diferentes: elementos de confinamiento de madera y malla de acero; Ambas técnicas aplicadas solo en un lado de las paredes. Los resultados sugieren que los sistemas de refuerzo sísmico evaluados disminuyen el desplazamiento de las paredes hasta en un 52% y reducen el agrietamiento.

La instrumentación y el monitoreo de vibración de estructuras civiles ha ganado importancia durante las últimas décadas debido a las posibles aplicaciones en la identificación modal y el monitoreo de salud estructural. La identificación de las propiedades dinámicas de las estructuras permite actualizar los modelos numéricos, mientras que el monitoreo de la salud estructural permite identificar y caracterizar los daños en las estructuras con el objetivo de anticipar intervenciones de menor costo. Los acelerómetros son los instrumentos más comunes que se utilizan en las estructuras civiles debido a que se pueden unir directamente a la estructura sin la necesidad de un marco de referencia fijo independiente. Este artículo presenta el desarrollo, la validación y la implementación a escala real de un sistema novedoso para medidas de desplazamiento directo de estructuras civiles. El sistema consta de punteros láser de bajo costo que se adjuntan a la estructura, una pantalla y una cámara de video y algoritmos de procesamiento



de imágenes que se ejecutan en una computadora portátil. Los resultados muestran que el sistema propuesto es una alternativa precisa de bajo costo para aplicaciones de instrumentación en ingeniería civil. (Franco, 2011).

REFERENCIAS

- Aguilar, R. (2010). *Dynamic Structural Identification using Wireless Sensor Networks*. Tesis de Doctorado. Minho, Portugal: Universidad de Minho.
- Aguilar, R., Ramos, L., Torrealva, D., & Chácara, C. (2013). *Experimental Modal Identification of an Existing Earthen Residential Building*. Guimaraes, Portugal: 5th International Operational Modal Analysis Conference.
- Busca, G., Cappellini, A., Cigada, A., & Vanali, M. (2011). *Operational modal Analysis of the "Guglia Maggiore" of the "Duomo" in Milano*. Estambul: 4th International Operational Modal Analysis, Turquia.
- Caetano, E. (2000). *Dynamic of Cable-stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction*. Porto: University of Porto, Portugal.
- Casarin, F., Lorenzoni, F., Islami, K., & Modena, C. (2011). *Dynamic identification and monitoring of the churches of St. Biagio and St. Giuseppe in L'Aquila*. Varenna, Italia.: EVACES 2011 – Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures.
- Cunha, A., Caetano, E., Magalhaes, F., & Mouinho, C. (2006b). *From Input-Output to Output only Modal Identification of Civil Engineering Structures. Final Report 2006*. Samco.
- Diaz, H. (2014). Obtenido de Sistemas Automaticos para la adquisicion de datos enfocados a examinar pavimentos flexibles / Automated systems for data acquisition oriented to examine flexible pavements: <https://search.proquest.com/docview/1994424545?accountid=36937>
- Franco, J. (2011). *Desarrollo e implementación de un sistema láser para caracterización dinámica y medición de desplazamientos en estructuras civiles/Development and implementation of a laser system for dynamic characterization and displacement measurement of civil structur*. Medellin, Colombia: Universidad de Antioquia Sep 2011.
- Gómez, V. (2016). *Rehabilitación sísmica de edificaciones históricas en tapia pisada: estudio de caso de capillas doctrineras reforzadas con malla de acero y madera de confinamiento*. Barcelona, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas 2016.
- Gutierrez, L., & Manco, M. (2006). *Características sísmicas de las construcciones de tierra en el Perú*. Lima, Perú: Tesis de Licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Rainieri, E., & Fabbrocino, G. (2011). *Output-only modal identification for prediction of the elastic period of masonry towers*. Estambul, Turquia: 4th International Operation Modal Analysis.
- Ramos, L., Aguilar, R., Lourenco, P., & Moreira, S. (2012). *Dynamic estructural health monitoring of Saint Torcato Church*. Torcato: Mechanical System and Signal Processing.

- Ramos, L., Casarin, F., Algeri, C., Lourenco, P., & Modena, C. (2006). *Investigation Techniques Carried out on the Outb Minar*. New Delhi, India: Structural Analysis of Historical Constructions New Delhi 2006: 633-640.
- Rodriguez, H. (2003). *Quincha Architecture: The Development of an antiseismic structural system in seventeenth century Lima*. Madrid, España: Proceeding of the 1st International Congress on Construction History.
- Schilder, C. (2000). *La herencia española: las bóvedas y cúpulas de quincha en el Peru*. Sevilla, España: Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla 26-28 octubre 2000: 1019-1026.
- Torrealva, D., & Vicente, E. (2012). *Proyecto de Reforzamiento Sismico: Evaluacion experimental del comportamiento sismico de muros de quincha del centro historico de Lima, Perú*. Lima, Perú.
- Turker, T., & Bayraktar, A. (2011). *Full-Scale Ambient Vibration Test of Hagia Sophia Bell-tower After Restoration*. Estambul, Turquía: 4th International Operational Modal Analysis Conference.
- Villa, J. (2017). *Analysis of constructive damage on single-family homes produced by vibrations induced by soil impacts in their surroundings*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.

ANEXOS

Nº 01 – Base de Datos de artículos investigados (también disponible en archivo Excel)

Title	Authors	copyright	document Type	place Of Publication	publiscie	year	Databases	Motivos de inclusión
Analysis of constructive damage on single-family homes produced by vibrations induced by soil impacts in their surroundings	Vila Garcia, Luis Manuel Luis Manuel Vila Garcia Vila Garcia	Copyright Universidad Nacional de Colombia 2017	Journal Article	Bogota	Dyna	2017	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Rehabilitación sísmica de edificaciones históricas en tapia pisada: estudio de caso de capillas doctrienas reforzadas con malla de acero y madera de cofreanento	Miguel Gómez, V V Gómez Gómez V Gómez, López, C	Copyright Consejo Superior de Investigaciones Científicas 2016	Journal Article	Barcelona	Informes de la Construcción	2016	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
SISTEMAS AUTOMÁTICOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS ENFOCADOS A EXAMINAR PAVIMENTOS FLEXIBLES/AUTOMATED SYSTEMS FOR DATA ACQUISITION ORIENTED TO EXAMINE FLEXIBLE PAVEMENTS	Díaz, Hernán Poma H. Hernán Poma	Copyright Military University of New Granada Jun 2014	Feature	Bogotá	Ciencia e Ingeniería Neogranadina	2014	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Tratamiento de outliers para el estudio de transmisión de vibraciones del ferrocarril	Nicoletta González-Cancelas, Nicoletta N. Nicoletta González-Cancelas Nicoletta González-Cancelas	Copyright UNIVERSIDAD EAFIT Jul-Dec 2012	General Information	Medellín	Ingeniería y Ciencia	2012	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Desarrollo e implementación de un sistema láser para caracterización dinámica y medición de desplazamientos en estructuras civiles/Development and implementation of a laser system for dynamic characterization and displacement measurement of civil structures	Miguel León, Wilmer Julián Carrillo W. Wilmer Julián Carrillo	Copyright Universidad de Antioquia Sep 2011	Feature	Medellín	Revista Facultad de Ingeniería	2011	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
ESTIMACIÓN DE LOS PERIODOS NATURALES DE VIBRACIÓN DE VIVIENDAS DE BAJA ALTURA CON MUROS DE CONCRETO/ESTIMATION OF THE NATURAL VIBRATION PERIODS IN TRADITIONAL HOUSING WITH CONCRETE WALLS	León, Wilmer Julián Carrillo W. Wilmer Julián Carrillo	Copyright Military University of New Granada Jun 2009	General Information	Bogotá	Ciencia e Ingeniería Neogranadina	2009	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Analysis of constructive damage on single-family homes produced by vibrations induced by soil impacts in their surroundings	Vila Garcia, Luis Manuel Luis Manuel Vila Garcia Vila Garcia	Copyright Universidad Nacional de Colombia 2017	Journal Article	Bogota	Dyna	2017	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Rescate en condiciones de emergencia: 40 viviendas cercenadas al río Guadaluquivir, España	A Femeina Sánchez A Femeina Sánchez, Alba Rodríguez, M P M P M P, Alba Rodríguez	Copyright Consejo Superior de Investigaciones Científicas 2016	Journal Article	Barcelona	Informes de la Construcción	2016	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Instalan estación sísmica		Copyright Periodicos Healy Sep 18, 2015	News	Sonora	Frontiers Info	2015	ProQuest Central	objetivo
SISTEMAS AUTOMÁTICOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS ENFOCADOS A EXAMINAR PAVIMENTOS FLEXIBLES/AUTOMATED SYSTEMS FOR DATA ACQUISITION ORIENTED TO EXAMINE FLEXIBLE PAVEMENTS	Díaz, Hernán Poma H. Hernán Poma	Copyright Military University of New Granada Jun 2014	Feature	Bogotá	Ciencia e Ingeniería Neogranadina	2014	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Conservación del patrimonio arqueológico construido con tema en Iberoamérica*	Luis Guerrero Luis Guerrero Luis Guerrero, Concha Mariana Concha Mariana, Nicoletta N.	Copyright Pontificia Universidad Javeriana Jul-Dec 2012	General Information	Bogotá	Apuntes	2012	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Tratamiento de outliers para el estudio de transmisión de vibraciones del ferrocarril	Nicoletta González-Cancelas, Nicoletta N. Nicoletta González-Cancelas Nicoletta González-Cancelas	Copyright UNIVERSIDAD EAFIT Jul-Dec 2012	General Information	Medellín	Ingeniería y Ciencia	2012	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Desarrollo e implementación de un sistema láser para caracterización dinámica y medición de desplazamientos en estructuras civiles/Development and implementation of a laser system for dynamic characterization and displacement measurement of civil structures	Miguel León, Wilmer Julián Carrillo W. Wilmer Julián Carrillo	Copyright Universidad de Antioquia Sep 2011	Feature	Medellín	Revista Facultad de Ingeniería	2011	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Cuba moderniza equipos para detectar sismos con tecnología donada por China		© EFE 2010. Esta expresión no prohíbe la redistribución de todo o	WIRE FEED	Miami	EFE News Service	2010	ProQuest Central	objetivo
Métodos de edificios		Copyright (c) 2009 La Nación	NEWSPAPER	Santiago, Chile	La Nación	2009	ProQuest Central	objetivo
ESTIMACIÓN DE LOS PERIODOS NATURALES DE VIBRACIÓN DE VIVIENDAS DE BAJA ALTURA CON MUROS DE CONCRETO/ESTIMATION OF THE NATURAL VIBRATION PERIODS IN TRADITIONAL HOUSING WITH CONCRETE WALLS	León, Wilmer Julián Carrillo W. Wilmer Julián Carrillo	Copyright Military University of New Granada Jun 2009	General Information	Bogotá	Ciencia e Ingeniería Neogranadina	2009	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Desarrollo e implementación de un sistema láser para caracterización dinámica y medición de desplazamientos en estructuras civiles/Development and implementation of a laser system for dynamic characterization and displacement measurement of civil structures	Miguel León, Wilmer Julián Carrillo W. Wilmer Julián Carrillo	Copyright Universidad de Antioquia Sep 2011	Feature	Medellín	Revista Facultad de Ingeniería	2011	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Tratamiento de outliers para el estudio de transmisión de vibraciones del ferrocarril	Nicoletta González-Cancelas, Nicoletta N. Nicoletta González-Cancelas Nicoletta González-Cancelas	Copyright UNIVERSIDAD EAFIT Jul-Dec 2012	General Information	Medellín	Ingeniería y Ciencia	2012	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Conservación del patrimonio arqueológico construido con tema en Iberoamérica*	Luis Guerrero Luis Guerrero Luis Guerrero, Concha Mariana Concha Mariana, A Femeina Sánchez A Femeina Sánchez, Alba Rodríguez, M P M P M P, Alba Rodríguez	Copyright Pontificia Universidad Javeriana Jul-Dec 2012	General Information	Bogotá	Apuntes	2012	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
Rescate en condiciones de emergencia: 40 viviendas cercenadas al río Guadaluquivir, España	A Femeina Sánchez A Femeina Sánchez, Alba Rodríguez, M P M P M P, Alba Rodríguez	Copyright Consejo Superior de Investigaciones Científicas 2016	Journal Article	Barcelona	Informes de la Construcción	2016	ProQuest Central, Sci Tech Premium Collection	objetivo
INGENIERIA CIVIL ACUSTICA	acústica en las edificaciones ingeniero acústico			CHILE		2010	Google Statistic	objetivo
GEOMATICA	VIBRACIONES MAQUINARIA PESADA GEOMATICA			COLOMBIA		2013	Google Statistic	objetivo
SISTEMA CONSTRUCTIVO DE MADERA	INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL			CHILE		2015	Google Statistic	objetivo
INGENIERIA ELECTRONICA	TECNOLOGIA			PERU		2014	Google Statistic	objetivo

Title	Authors	copyright	document Type	place Of Publication	publisse	year	Database	Motivos de inclusión
NORMAS TECNICAS PERUANAS	ESTADO PERUANO	PERU		PER		2017	Google Statist	objetivo
Dynamic Structural Identification Using Wireless Sensor Network	Aguilar, R	University of Minho, Portugal	Tesis Doctoral	Portugal		2010	EBSCO	objetivo
Experimental Modal Identification of an Existing Earthen Residential Building	Aguilar, R	5th International Operational Modal Analysis Conference	Informe	Portugal		2013	EBSCO	objetivo
Operational modal Analysis of the "Guglia Maggiore" of the "Duomo" in Milano, Estambul: 4th International Operational Modal Analysis, Turquia	Busca, G., Cappelini, A., Cigada, A., & Vanali, M.	4th International Operational Modal Analysis, Turquia	Informe	Estambul		2011	EBSCO	objetivo
Dynamic of Cable-stayed Bridges: Experimental Assessment of Cable-Structure Interaction. Porto:	Caetano, E. (2000).	University of Porto, Portugal	General Information	Portugal		2000	EBSCO	objetivo
Dynamic identification and monitoring of the churches of St. Biagio and St. Giuseppe in L'Aquila. Varenna, Italia	Cesarin, F., Lorenzoni, F., Isami, K., & Modena, C.	EVACES 2011 – Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures	General Information	Italia		2011	EBSCO	objetivo
From Input-Output to Output only Modal Identification of Civil Engineering Structures. Final Report 2008. Samoa.	Cunha, A., Caetano, E., Magalhães, F., & Mouinho, C.	Report	General Information			2008	EBSCO	objetivo
Obtenido de Sistemas Automáticos para la adquisición de datos enfocados a examinar pavimentos flexibles / Automated systems for data acquisition oriented to examine flexible pavements	Díaz, H.	Report	General Information			2014	Google Statist	objetivo
Desarrollo e implementación de un sistema láser para caracterización dinámica y medición de desplazamientos en estructuras civiles/Development and implementation of a laser system for dynamic characterization and displacement measurement of civil structures	Franco, J.	Universidad de Antioquía	General Information	Colombia		2011	Google Statist	objetivo
Rehabilitación sísmica de edificaciones históricas en tapia pisada: estudio de caso de capillas doctrineras reforzadas con malla de acero y madera de confinamiento. Barcelona, España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas 2016	Gómez, V.	Consejo superior de investigaciones científicas	General Information	España		2016	EBSCO	objetivo
Características sísmicas de las construcciones de tierra en el Perú. Lima, Perú: Tesis de Licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú.	Gutiérrez, L., & Menos, M	Pontificia Universidad Católica del Perú	Tesis	Perú		2008	Google Statist	objetivo
Output-only modal identification for prediction of the elastic period of masonry towers. Estambul, Turquia:	Rainieri, E., & Fabbrocino, G.	4th International Operation Modal Analysis.	report	Turquia		2011	EBSCO	objetivo
Dynamic structural health monitoring of Saint Torcato Church. Torcato: Mechanical System and Signal Processing	Ramos, L., Aguilar, R., Lourenco, P., & Moreira, S.		General Information	India		2012	EBSCO	objetivo
Quincha Architecture: The Development of an antiseismic structural system in seventeenth century Lima. Madrid, España:	Rodríguez, H.	Proceeding of the 1st International Congress on Construction History.	report	España		2003	EBSCO	objetivo
La herencia española: las bóvedas y cúpulas de quincha en el Perú. Sevilla, España	Schilder, C.	Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla 26-28 octubre 2000.	General Information	España		2000	EBSCO	objetivo
Proyecto de Reforzamiento Sísmico: Evaluación experimental del comportamiento sísmico de muros de quincha del centro histórico de Lima, Perú. Lima, Perú.	Torealva, D., & Voente, E.		General Information	Perú		2012	Google Statist	objetivo
Full-Scale Ambient Vibration Test of Hagia Sophia Bell-tower After Restoration. Estambul, Turquia: 4th International Operational Modal Analysis Conference.	Turker, T., & Bayraktar, A.		report	Turquia		2011	EBSCO	objetivo