



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ÁREA DE ESTRUCTURAS

**DISMINUCIÓN DE VIBRACIONES PROVOCADAS POR EFECTO DE VIENTO Y SISMO
EN ESTRUCTURA DE ACERO UTILIZANDO MASA SINTONIZADA**

TESIS:

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. ERICK ALEJANDRO HURTADO ALZÚA

TUTOR PRINCIPAL:

DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, MARZO, 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: **Dr. José Alberto Escobar Sánchez**

Secretario: **Dr. Roberto Gómez Martínez**

1er Vocal: **Dr. Adrián Pozos Estrada**

2do Vocal: **Dr. Orlando Javier Díaz López**

3er Vocal: **Dr. Héctor Guerrero Bobadilla**

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, CDMX.

Tutor de Tesis:

Dr. Adrián Pozos Estrada

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, la máxima casa de estudios del país, por permitirme realizar mis estudios de posgrado en sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, por el apoyo económico brindado durante mis estudios de posgrado.

Al Dr. Adrián Pozos Estrada por su asesoría, paciencia y disposición en todo momento a lo largo de la elaboración de este trabajo.

A mi familia y amigos por su apoyo incondicional.

RESUMEN

Este trabajo de investigación se lleva a cabo para determinar la eficacia del uso de un sistema de protección sísmico pasivo en una estructura de acero esbelta para mejorar su respuesta dinámica ante fuerzas externas.

Si bien, existen diversos tipos de ese sistema de protección, este trabajo tendrá énfasis en el Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS); implementándolo en una estructura hipotética que se analizó y diseñó conforme a las Normas Técnicas Complementarias del Estado de Baja California, debido a que la ubicación seleccionada para el objeto de estudio es la ciudad de Mexicali.

Conceptualizando el sistema mecánico equivalente a un sistema de un grado de libertad, se realizaron dos códigos de programación con un método de integración paso a paso para obtener las respuestas dinámicas de ésta; a su vez, desarrollando un código donde se contemplan las características del AMS para realizar una comparativa con los resultados obtenidos.

Las fuerzas actuantes de viento, las cuales se inducirán al sistema para su respectivo análisis, se obtendrán a partir de señales sistemáticas de velocidades de viento turbulento con ayuda del programa SVTpro; mientras que, para la revisión por sismo, se obtienen acelerogramas sintéticos a partir del espectro de diseño calculado con ayuda del programa SIMQKE.

Las respuestas dinámicas obtenidas fueron comparadas con y sin considerar el sistema de protección, comprobando que es un sistema eficaz para la disminución de vibraciones en estructuras de acero ante efectos de viento y sismo.

ABSTRACT

This research work is conducted to determine the effectiveness of using a passive seismic protection system in a slender steel structure to improve its dynamic response to external forces.

Although there are distinct types of this protection system, this work will focus on the Tuned Mass Damper (TMD); implementing it in a hypothetical structure that was analyzed and designed in accordance with Baja California State Standards.

Conceptualizing the mechanical system equivalent to a one degree of freedom system, two programming codes were made with a step-by-step integration method to obtain its dynamic responses; in turn, developing a code where the characteristics of the TMD are contemplated to make a comparison with the results obtained.

The acting wind forces, which will be induced into the system for their respective analysis, will be obtained from systematic signals of turbulent wind speeds with the help of the SVTpro program; while, for the revision due to earthquake, synthetic accelerograms are obtained from the design spectrum calculated with the help of the SIMQKE program.

The dynamic responses obtained were compared with and without considering the protection system, verifying that it is an effective system for reducing vibrations in steel structures in the face of wind and earthquake effects.

CONTENIDO

CONTENIDO

RESUMEN.....	4
ABSTRACT	5
CONTENIDO	5
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
1.2.2 OBJETIVO SECUNDARIO.....	12
1.3 ALCANCES	13
1.4 DESCRIPCIÓN DE CAPÍTULOS	13
CAPÍTULO 2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 SISTEMAS DE CONTROL DE VIBRACIONES.....	14
2.2 AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA (AMS).....	15
2.2.1 AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA TIPO PÉNDULO	15
2.2.2 AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA CONVENCIONAL	16
2.2.3 APLICACIONES DEL AMS	16
2.3 ANTECEDENTES E INVESTIGACIONES.....	19
CAPÍTULO 3.- EDIFICIO EN ESTUDIO.....	23
3.1 UBICACIÓN DEL EDIFICIO	23
3.2 GEOMETRÍA	23
3.3 ESTRUCTURACIÓN Y MATERIALES.....	25
3.4 ANÁLISIS DE CARGAS	25
3.5 ANÁLISIS DE VIENTO	26
3.5.1 CLASIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	26
3.5.2 VELOCIDAD DE DISEÑO, V_D	26
3.5.3 PRESIÓN DE DISEÑO, P_z	29
3.5.4 EMPUJES DINÁMICOS PARALELOS AL VIENTO.....	29
3.6 ANÁLISIS SÍSMICO	32
3.7 COMBINACIONES DE CARGA	33
3.8 ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL	33
3.8.1 RELACIONES DE ESFUERZOS	34
3.8.2 REVISIÓN DESPLAZAMIENTOS POR EFECTOS DE SISMO Y VIENTO	35
3.9 PROPIEDADES MODALES DE LA ESTRUCTURA.....	36
CAPÍTULO 4.- SIMULACIÓN DE SEÑALES DE VIENTO TURBULENTO Y ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS	40
4.1 SEÑALES DE VIENTO TURBULENTO	40

4.2 ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS	45
CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS NÚMERICOS	50
5.1 SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD.....	50
5.2 MÉTODO DE NEWMARK.....	50
5.2.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FUERZAS DE VIENTO TURBULENTO.....	51
5.2.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS	53
5.3 SISTEMA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD	54
5.3.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FUERZAS DE VIENTO TURBULENTO.....	54
5.3.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS	56
5.4 ANÁLISIS EN PROGRAMA COMERCIAL.....	59
5.4.1 APLICACIÓN DE SEÑALES DE FUERZAS EN MODELO MATEMÁTICO	59
5.4.2 APLICACIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA SINTÉTICOS EN MODELO MATEMÁTICO ..	62
5.4.3 MODELADO DE AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA	65
5.4.4 ANÁLISIS EN PROGRAMA COMERCIAL.....	67
CAPÍTULO 6.- COMPARATIVA DE ANÁLISIS.....	93
6.1 ANÁLISIS EN PROGRAMA COMERCIAL.....	93
6.1.1 FUERZAS DE VIENTO TURBULENTO.....	93
6.1.2 ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS	100
6.2 ANÁLISIS NÚMÉRICO VS ANÁLISIS EN PROGRAMA COMERCIAL	107
CAPÍTULO 7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
7.1 CONCLUSIONES.....	108
7.2 RECOMENDACIONES	109
REFERENCIAS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de un AMS tipo péndulo (adaptado de [4]).	16
Figura 2.2. Esquema tipo de un AMS convencional (adaptado de [4]).	16
Figura 2.3. Esquema del amortiguador propuesto por Frahm (adaptado de [11]).	20
Figura 3.1. Mapa geológico regional (adaptado de [3])	23
Figura 3.2. Vista en planta del modelo matemático	24
Figura 3.3. Vista tridimensional del modelo matemático.	24
Figura 3.4. Tabla 3.1 de las Normas Técnicas Complementarias [26] para diseño por viento	27
Figura 3.5. Tabla 3.2 de las Normas Técnicas Complementarias [26] para diseño por viento	28
Figura 3.7. Tabla 3.4 de las Normas Técnicas Complementarias [26] para diseño por viento	29
Figura 3.8. Tabla 5.1 de las Normas Técnicas Complementarias [26] para diseño por viento	30
Figura 3.10. Relación de esfuerzos en programa comercial ETABS [1].	34
Figura 3.11. Desplazamientos en dirección X: a) debido a las fuerzas de sismo; b) debido a las fuerzas de viento	35
Figura 3.13. Desplazamientos modales normalizados	37
La ecuación (3.5) se emplea para determinar la masa modal.	37
Figura 3.14. Tabla 4.4.3 de las Normas Técnicas Complementarias [26].	39
Figura 4.1. Alzado transversal del objeto de estudio (se muestra un punto representativo de coordenadas)	40
Figura 4.2. Tabla 5.1.1 de las Normas Técnicas Complementarias [26]	41
Figura 4.3. Tabla 5.0.1 de las Normas Técnicas Complementarias [26] para diseño por viento.	41
Figura 4.5. Parámetros informativos de la simulación del programa SVTpro [27].	43
Figura 4.6. Resultados de la simulación de señales de viento turbulento del programa SVTpro [27]	43
Figura 4.7. Señal de velocidades de viento turbulento	44
Figura 4.8. Fuerzas de arrastre de viento turbulento	45
Figura 4.9. Acelerogramas sintéticos	48
Figura 4.10. Espectro de diseño para el objeto de estudio	48
Figura 4.11. Espectros obtenidos de los acelerograma sintéticos	49
Figura 5.1. Aceleraciones Máximas para Sistema de 1GDL	52
Figura 5.2. Desplazamientos Máximos para Sistema de 1GDL	52
Figura 5.3. Aceleraciones Máximas para Sistema de 1GDL	53
Figura 5.5. Aceleraciones Máximas para Sistema de 2GDL	55
Figura 5.6. Desplazamientos Máximos para Sistema de 2GDL	56
Figura 5.7. Aceleraciones Máximas para Sistema de 2GDL	57
Figura 5.9. Apartado “Define Load Patterns” de programa comercial ETABS [1]	59
Figura 5.10. Aplicación de la carga unitaria “P48”	60
Figura 5.13. Apartado “Load Case Data” del programa comercial ETABS [1]	62
Figura 5.14. Apartado “Define Time History Functions” del programa comercial ETABS [1]	63
Figura 5.16. Apartado “Load Case” del programa comercial ETABS [1]	64

Figura 5.17. Apartado “Load Case Data” del programa comercial ETABS [1]	64
Figura 5.19. Apartado “Linear Link / Support Directional Properties” del programa comercial ETABS [1]	66
Figura 5.20. Modelo del AMS en el programa comercial ETABS [1]	67
Figura 5.21. Respuesta dinámica de aceleraciones para simulación: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10	70
Figura 5.22. Respuesta dinámica de desplazamientos para simulación: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10	73
Figura 5.23. Respuesta dinámica de aceleraciones para acelerograma sintético: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10	76
Figura 5.24. Respuesta dinámica de desplazamientos para acelerograma sintético: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10	79
Figura 5.25. Respuesta dinámica de aceleraciones para simulación: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10	83
Figura 5.26. Respuesta dinámica de desplazamientos para simulación: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10	85
Figura 5.27. Respuesta dinámica de aceleraciones para acelerograma sintético: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10	89
Figura 5.28. Respuesta dinámica de desplazamientos para acelerograma sintético: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Listado de estructuras con AMS (adaptado de [10]).....	17
Tabla 2.1 (continuación). Listado de estructuras con AMS (adaptado de [10]).	18
Tabla 2.1 (continuación). Listado de estructuras con Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS) (adaptado de [10]).....	19
Tabla 3.1. Presiones de diseño en dirección Eje Y.....	31
Tabla 3.2. Presiones de diseño en dirección Eje X.....	31
Tabla 3.3. Masas y desplazamientos modales obtenidos de ETABS [1].....	37
Tabla 3.4. Propiedades modales de la estructura.....	39
Tabla 4.1. Velocidad media de viento para efectos dinámicos.....	42
Figura 5.11. Apartado “Define Time History Functions” del programa comercial ETABS [1]	61
Tabla 5.1. Parámetros óptimos del AMS.....	65
Tabla 5.2. Respuesta dinámica para Simulaciones de Fuerzas de viento turbulento	73
Tabla 5.3. Respuesta dinámica para Acelerogramas Sintéticos.....	79
Tabla 5.4. Respuesta dinámica para Simulaciones de Fuerzas de Viento Turbulento	86
Tabla 5.5. Respuesta dinámica para Acelerogramas Sintéticos.....	92
Tabla 6.1. Comparativa de respuestas dinámicas de aceleraciones para Simulaciones de Fuerzas de Viento Turbulento.....	96
Tabla 6.2. Comparativa de respuestas dinámicas de desplazamientos para Simulaciones de Fuerzas de Viento Turbulento	100
Tabla 6.3. Comparativa de respuestas dinámicas de aceleraciones para Acelerogramas Sintéticos	103
Tabla 6.4. Comparativa de respuestas dinámicas de desplazamientos para Acelerogramas Sintéticos.....	106
Tabla 6.5. Comparativa de porcentajes de reducción del modelo numérico y el programa comercial para simulaciones de viento turbulento	107
Tabla 6.6. Comparación de respuestas dinámicas para acelerogramas sintéticos	107

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Toda estructura en algún momento experimenta cargas laterales dinámicas provocadas por efecto de viento o sismo, y éstas generan un efecto en cadena; ya que producen aceleraciones, las cuales afectan directamente a los usuarios, y vibraciones que se reflejan como desplazamientos, y éstos a su vez, generan esfuerzos internos que en ocasiones sobrepasan la capacidad de los elementos estructurales, llegando a provocar el colapso de la estructura.

En épocas recientes, se ha incrementado la construcción de edificios altos a lo largo del país y del mundo; en algunos casos debido a la expansión de las ciudades, mientras que, en las zonas turísticas se realiza este tipo de construcción debido a la gran cantidad de visitantes que se reciben anualmente. Es debido a esto, que las construcciones verticales deben ser lo suficientemente resistentes para sobreponerse tanto a las condiciones de servicio, como a los eventos sísmicos y efectos del viento para evitar sucesos indeseables.

Un ejemplo de ubicación con alta sismicidad es la ciudad de Mexicali, debido a su cercanía con a la falla de San Andrés, la cual se ha encargado de producir grandes y devastadores terremotos. Un ejemplo de lo anterior ocurrió el 4 de abril del 2010, con epicentro a 18 km de la ciudad se presentó un terremoto de magnitud 7.2. Entre los daños provocados, perdieron la vida 2 personas y cientos resultaron heridas; además, en el Valle de Mexicali canales de riego sufrieron daños graves [3].

La solución ante estos efectos es la mitigación de las vibraciones en las estructuras. Gracias al avance de la tecnología junto con los años de investigaciones acerca del tema, existen distintos sistemas de control de vibraciones que emplean cambios en las características dinámicas de la estructura y logran controlar o disipar su energía; en otras palabras, concentran el daño en ellos mismos para evitar daños en la estructura.

Con base a lo anterior, el presente trabajo tiene la finalidad de emplear un sistema de los mencionados anteriormente, que lleva por nombre “Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS)”, el cual se ubica en puntos estratégicos de la estructura y consiste en una masa secundaria incorporada a ésta (pequeña, comparada a la masa global de la estructura), con el propósito de reducir su respuesta dinámica por medio de un amortiguador viscoso y un elemento elástico.

La frecuencia del dispositivo se sintoniza con la frecuencia de la estructura, de modo que cuando esa frecuencia es excitada, el AMS resonará en contrafase con el movimiento de la estructura [4].

Así pues, la idea principal de esta investigación es emplear de forma analítica el AMS por un método paso a paso en el tiempo para mitigar los efectos provocados por sismo y viento inducidos en una estructura esbelta por medio de modelos matemáticos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El presente trabajo tiene como objetivo la obtención de los parámetros óptimos del AMS en una estructura de acero esbelta para disminuir la respuesta dinámica provocada por las fuerzas de viento y sismo; las cuales, se obtuvieron por medio de señales sistemáticas de viento turbulento y acelerogramas sintéticos.

Mostrar que pueden obtenerse los parámetros óptimos del dispositivo para cualquier estructura mediante análisis numérico.

1.2.2 OBJETIVO SECUNDARIO

Ayudar a impulsar el interés por investigar e implementar esta información en el ámbito laboral de la ingeniería estructural.

1.3 ALCANCES

En este trabajo se presentan los análisis realizados en una estructura esbelta de acero contemplando los efectos que tiene sobre ésta el AMS bajo efectos de viento y sismo.

Se realiza una idealización de un sistema mecánico equivalente en donde en lugar de enfocar el análisis en toda la estructura, se realiza un modelo de uno y varios grados de libertad; para una vez obtenidos los resultados, hacer una comparativa con los obtenidos en el programa comercial ETABS [1].

1.4 DESCRIPCIÓN DE CAPÍTULOS

Este trabajo inicia con el capítulo introductorio, donde se hace un resumen de la investigación realizada.

El Capítulo 2 contiene la revisión bibliográfica de los sistemas de control de vibraciones, así como, los inicios del concepto de AMS y aportes que han brindado diversos autores a través de los años, respectivamente.

En el Capítulo 3 se presenta el objeto de estudio, así como, el análisis y diseño estructural efectuado, donde se presenta las características de la estructura y las consideraciones necesarias de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias [26].

En el Capítulo 4 se presenta el procedimiento para la obtención de las simulaciones de fuerzas de viento turbulento y los acelerogramas sintéticos.

En el Capítulo 5 se realiza la conceptualización de un sistema equivalente de uno y varios grados de libertad para representar los efectos del AMS en la estructura. Se realiza la descripción de estos y de la metodología impuesta para realizar los análisis correspondientes. Para finalizar el capítulo, se presentan los resultados obtenidos de la metodología impuesta para los sistemas de uno y varios grados de libertad, al igual que los resultados obtenidos en el programa comercial ETABS [1] tanto para las señales sistemáticas de viento turbulento como para los acelerogramas sintéticos.

El Capítulo 6 muestra la comparativa de resultados obtenidos en el análisis por medio del programa comercial respecto al análisis numérico realizado con la metodología del Capítulo 5.

El trabajo finaliza con el Capítulo 9, en el cual se realizan las conclusiones obtenidas con el desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO 2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS DE CONTROL DE VIBRACIONES

El control estructural ante acciones sísmicas se está planteando como una alternativa al diseño sismorresistente convencional, basado en la ductilidad y el hiperestatismo estructural. Los sistemas sismorresistentes avanzados tienen por objetivo el control de los desplazamientos de una estructura haciendo uso de la modificación de las propiedades dinámicas del edificio, la disipación de energía introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos y/o el control con dispositivos que ejerzan fuerzas que contrarreste en la acción sísmica [5].

Los japoneses y estadounidenses utilizan dos nomenclaturas diferentes de clasificación de acuerdo con el mecanismo de funcionamiento. Los japoneses los clasifican en cuatro categorías: sistemas aislados en la base, sistemas de absorción de energía, sistemas de efecto de masa y sistemas de control activo [6].

Los estadounidenses plantean tres categorías: sistemas aislados, sistemas de disipación pasiva de energía y sistema de control activo [7].

Sin embargo, la ISO 3010 International Standard “Basis for design of structures – Seismic action on structures” se plantea una clasificación que pretende ser internacional, que consiste en tres sistemas de control de respuesta sísmica: control pasivo, activo e híbrido y semiactivo [8]. A continuación, se hace una breve descripción de éstos.

Los sistemas de control activo aplican fuerzas de control a las estructuras para contrarrestar los efectos del viento y sismo mediante actuadores alimentados externamente; las cuales se determinan por medio de sensores de movimiento, sensores de control y procesadores de datos. Tienen como desventaja su alto costo de mantenimiento.

Los sistemas pasivos no requieren una fuente de energía externa para mitigar la energía y reducir la respuesta dinámica, a diferencia de los sistemas activos. Son los sistemas de control más empleados.

Los sistemas híbridos, como su nombre lo indica, son sistemas donde trabajan en conjunto un sistema activo y otro pasivo. Finalmente, los sistemas semiactivos son sistemas de control pasivo que cuentan con mecanismos de monitoreo en tiempo real sin aplicar fuerzas de control sobre la estructura.

2.2 AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA (AMS)

Un AMS es un sistema de control pasivo que consta de una masa, un resorte y un amortiguador viscoso. En este sistema de control de vibraciones, la masa se adjunta a la estructura por medio de resortes y amortiguadores que mitigan las fuerzas actuantes, y de esta forma, se reduce la respuesta dinámica de la estructura.

“Si la frecuencia del absorbedor adherido a la estructura coincide con la frecuencia de excitación, entonces la masa del sistema principal permanece quieta, y el absorbedor genera en todo instante sobre la estructura fuerzas iguales y contrarias a la excitación” (Frahm, 1911).

Así como se tiene una clasificación de los distintos tipos de sistemas de control, también hay tipos de AMS: el tipo péndulo y el convencional. Una de las ventajas que tiene este dispositivo es que resulta ser muy práctico su empleo, debido a que puede añadirse a estructuras existentes.

2.2.1 AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA TIPO PÉNDULO

El AMS convencional de masa y resorte requiere una gran masa y gran espacio para la instalación, creando así limitaciones arquitectónicas [9]; una solución alternativa es usar una configuración de péndulo que consta de una masa y un cable. Cuando un edificio está sujeto a un movimiento sísmico, el AMS tipo péndulo creará una fuerza en la dirección opuesta al movimiento del piso [10].

Debido a que la sintonización de la frecuencia del dispositivo con respecto a la estructura es acorde a la longitud del cable, resulta una ventaja utilizarlo y si se requiere sintonizar su frecuencia nuevamente, se realiza un cambio en la longitud de este.

En la Figura 2.1, se observa una representación gráfica mediante un sistema de un grado de libertad.

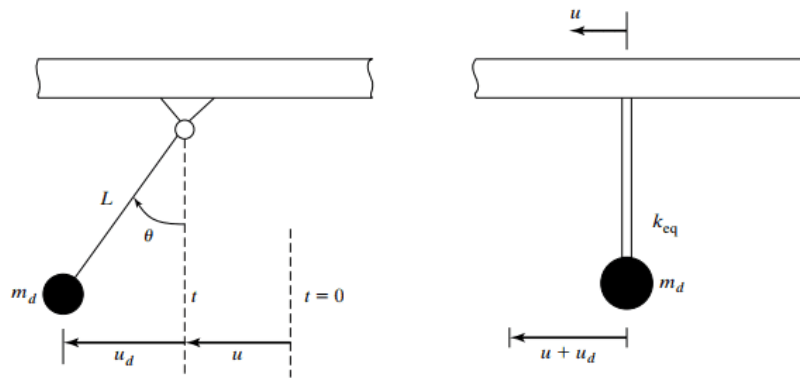


Figura 2.1. Esquema de un AMS tipo péndulo (adaptado de [4]).

2.2.2 AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA CONVENCIONAL

Este sistema se representa de manera típica como una masa que descansa sobre ruedas para permitir su desplazamiento lateral, así mismo, entre la masa y los miembros de soporte vertical se incluyen elementos elásticos y amortiguadores [4].

En la Figura 2.2, se muestra un esquema de un AMS traslacional, la cual es la forma más común de representar a este sistema.

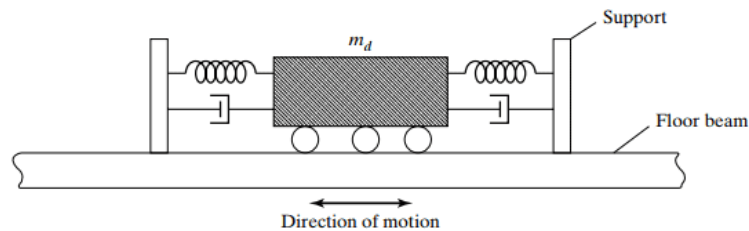


Figura 2.2. Esquema tipo de un AMS convencional (adaptado de [4]).

2.2.3 APLICACIONES DEL AMS

Este sistema de protección ha tenido aplicaciones en diversos países de todo el mundo, a continuación, en la Tabla 2.1 se muestra un listado de algunos edificios donde se ha implementado su uso, además de información adicional como la altura de este y el tipo de AMS utilizado.

Tabla 2.1. Listado de estructuras con AMS (adaptado de [10]).

Nombre	Tipo de Estructura	Altura	Ubicación	Año	Tipo de AMS
CN Tower	Torre	553 m	Toronto, Canada	1976	Péndulo
John Hancock	Edificio	241 m	Boston, MA, EUA	1976	Convencional
Citycorp Center	Edificio	278 m	New York, EUA	1978	Convencional
Sydney Tower	Torre	305 m	Sydney, Australia	1980	Convencional
Deutsche Bundespost	Torre	278 m	Nurnberg, Alemania	1982	Convencional
Chiba Port Tower	Torre	125 m	Chiba, Japón	1986	Convencional
FGran Bretañauoka Tower	Torre	234 m	FGran Bretañauoka, Japón	1989	Convencional
Higashiyama Sky Tower	Torre	134 m	Nagoya, Japón	1989	Péndulo
Kyobashi Center	Edificio	33 m	Tokyo, Japón	1989	Convencional
Fernsehturm Tower	Torre	368 m	Berlin, Alemania	1990	Convencional
Huis Ten Bosch Domtoren	Torre	105 m	Nagasaki, Japón	1990	Convencional
Crystal Tower	Edificio	157 m	Osaka, Japón	1990	Péndulo
Shimizu Tech Lab	Edificio	30 m	Tokyo, Japón	1990	Convencional
ORC 2000 Symbol tower	Edificio	188 m	Osaka, Japón	1992	Convencional
Applause Tower	Edificio	162 m	Osaka, Japón	1992	Convencional
Sendagaya INTES	Edificio	58 m	Tokyo, Japón	1992	Convencional
Rokko Island Procter and Gamble	Edificio	117 m	Kobe, Japón	1993	Convencional
Yokohama Landmark Tower	Edificio	296.3 m	Yokohama City, Japón	1993	Convencional
Chifley Tower	Edificio	209 m	Sydney, Australia	1993	Convencional
Kansai International airport	Torre	86 m	Osaka, Japón	1993	Convencional
C Office Tower	Edificio	130 m	Tokyo, Japón	1993	Convencional
KS Project	Torre	121 m	Kanasawa, Japón	1993	Convencional
Ando Nishikicho	Edificio	68 m	Tokyo, Japón	1993	Convencional
MKD8 Hikarigaoka	Edificio	100 m	Tokyo, Japón	1993	Péndulo
P&G Japón Headquarters	Edificio	131 m	Kobe, Japón	1993	Convencional
Akita Tower	Torre	112 m	Akita, Japón	1994	Convencional
ShinjGran Bretañau Park Tower	Edificio	227 m	Tokyo, Japón	1994	Convencional
Building M	Edificio	30.4 m	Osaka, Japón	1994	Convencional
Sea Hawk Hotel and Resort	Edificio	143 m	FGran Bretañauoka, Japón	1995	Convencional

Tabla 2.1 (continuación). Listado de estructuras con AMS (adaptado de [10]).

Nombre	Tipo de Estructura	Altura	Ubicación	Año	Tipo de AMS
Regensburg Siemens Building	Edificio	–	Regensburg, Alemania	1996	Convencional
Karlsruhe Building	Edificio	–	Karlsruhe, Alemania	1997	Convencional
Hotel Burj–Al–Arab (7–star)	Edificio	321 m	Dubai, E.A.U.	1997	Convencional
Petronas Twin Towers	Edificio	451.9 m	Kuala Lumpur, Malasia	1997	Convencional
Itoyama Tower	Edificio	89 m	Tokyo, Japón	1997	Convencional
TC Tower	Edificio	348 m	Kau–Shon, Taiwan	1997	Convencional
Kaikyō–messe Dream Tower	Torre	153 m	Yamaguchi, Japón	1998	Convencional
Otis Shibayama Test Tower	Edificio	154 m	Chiba, Japón	1998	Convencional
Emirates Towers	Torre	355 m	Dubai, E.A.U	1999	Convencional
Century Pak Tower	Edificio	170 m	Tokyo, Japón	1999	Convencional
Shinagawa Intercity A	Edificio	144 m	Tokyo, Japón	1999	Convencional
Park Tower	Edificio	252.2 m	Chicago, IL, EUA	2000	Convencional
Stakis Metropole	Hotel	60 m	London, Gran Bretaña	2000	Convencional
The Trump World Tower	Torre	262.4 m	New York, NY, EUA	2001	Convencional
Cerulean Tower Tokyo Hotel	Edificio	184 m	Tokyo, Japón	2001	Convencional
Triton Square office complex	Edificio	195 m	Tokyo, Japón	2001	Convencional
Hotel Nikko Bayside Osaka	Edificio	138 m	Osaka, Japón	2002	Convencional
Dentsu New Headquarter	Edificio	210 m	Tokyo, Japón	2002	Convencional
Incheon International	Torre	100.4 m	Incheon, Corea	2001	Convencional
Spire of Dublin	Monumento	121.2 m	Dublin, Islandia	2003	Convencional
Refab2	Edificio	–	Brasil	2003	Convencional
Highcliff	Edificio	252.4 m	Hong Kong, China	2003	Convencional
Al Rostamani Tower	Torre	67 m	Dubai, E.A.U	2003	Convencional
Taipei 101	Edificio	449 m	Taipei, Taiwan	2004	Convencional
Bloomberg Tower	Edificio	245.6 m	New York, EUA	2004	Convencional
DoCoMo Telecommunications	Torre	198.5 m	Osaka, Japón	2004	Convencional
Bright Start Tower	Mast	284 m	Dubai, E.A.U	2005	Convencional
Araucano Park	Edificio	60 m	Santiago de Chile, Chile	2005	Convencional
Aspire Tower	Torre	300 m	Doha, Qatar	2007	Péndulo

Tabla 2.1 (continuación). Listado de estructuras con Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS) (adaptado de [10]).

Nombre	Tipo de Estructura	Altura	Ubicación	Año	Tipo de AMS
Comcast Center	Edificio	297.1 m	Philadelphia, PA, EUA	2008	Convencional
Al Mas Tower	Edificio	361m	Dubai, E.A.U	2008	Convencional
Magura Odobesti	Torre	112 m	Villa Magura	2008	Convencional
Hangzhou Bay Bridge Tower	Torre	130 m	Jiaxing, China	2009	Convencional
Lanxess, Chemical Plant	Edificio	–	Ontario, Canada	2009	Convencional
ShenZhen WuTong	Torre	198 m	ShenZhen, China	2009	Péndulo
Canton Tower (Guangzhou TV Tower)	Torre	600 m	Guangzhou, China	2010	Convencional
Estela de Luz	Monumento	104 m	Ciudad de México	2010	Convencional
Tokyo Skytree	Torre	634.0 m	Tokyo, Japón	2012	Convencional

2.3 ANTECEDENTES E INVESTIGACIONES

Los inicios de lo que hoy se conoce como AMS, se remontan al año 188; sin embargo, en 1911, cuando Hermann Frahm, ingeniero de construcción naval alemán, por medio de una patente, presentó una forma de amortiguar las vibraciones de resonancia que surgían en cuerpos sometidos a ciertos impactos periódicos mediante un sistema de masa-resorte sin amortiguamiento (Figura 2.3).

Estas vibraciones se evitan o amortiguan por medio de un cuerpo auxiliar que está dispuesto dentro o sobre el cuerpo principal cuyas vibraciones se van a amortiguar. Este cuerpo auxiliar se hace vibrar por las vibraciones del cuerpo principal y las vibraciones naturales del cuerpo auxiliar tienen, en la medida de lo posible, el mismo período que las del cuerpo principal. La acción de este dispositivo depende del hecho de que las vibraciones de resonancia del cuerpo principal son anuladas por las vibraciones de resonancia secundaria del cuerpo auxiliar más pequeño. El elemento que une el auxiliar al cuerpo principal ejerce una reacción sobre el cuerpo principal debido a la diferencia de fase, que se dirige contra el perturbador primario [11].

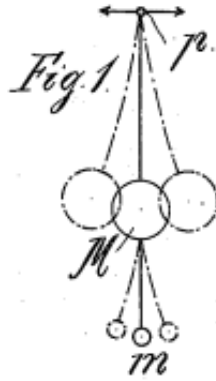


Figura 2.3. Esquema del amortiguador propuesto por Frahm (adaptado de [11]).

En 1928, Ormondroyd y Den Hartog [12] tomaron el esquema de Frahm y demostraron que, al añadirle un amortiguador, el comportamiento del dispositivo mejoraba considerablemente. Den Hartog continuó con la investigación y desarrolló expresiones para determinar los parámetros óptimos de sintonización y amortiguamiento del dispositivo para un sistema de un grado de libertad no amortiguado sometido a fuerzas de excitación armónica [13]; lo anterior, fue el detonante para que diversos autores realizaran sus propias investigaciones para la obtención de los parámetros óptimos del AMS.

En 1969, Gupta y Chandrasekaren [14] estudiaron el comportamiento del dispositivo ante fuerzas sísmicas, concluyendo que éste no era tan efectivo para la reducción de la respuesta dinámica de la estructura bajo estas fuerzas, como si lo era para fuerzas armónicas.

Wirshching y Yao [15] estudiaron el primer modo de vibrar de dos edificios sujetos a excitación en la base, de 5 y 10 niveles respectivamente; sintonizando la frecuencia del AMS con la frecuencia fundamental de la estructura y considerando una relación de amortiguamiento ξ del 20%, obtuvieron una reducción de la respuesta dinámica considerable.

En 1980, Warburton y Ayorinde [16], realizaron una investigación sobre el efecto del AMS en un sistema principal con poco amortiguamiento; conociendo los valores óptimos de rigidez y amortiguamiento del dispositivo a partir de un sistema de un grado de libertad, llegaron a la conclusión que si el amortiguamiento del sistema principal es pequeño, la sintonización óptima y el amortiguamiento del dispositivo también será diminuta, sin embargo, se logra presentar una disminución en la respuesta dinámica.

Warburton [17] determinó una serie de parámetros óptimos para varias combinaciones de respuesta, haciendo énfasis en la disminución de los desplazamientos ante fuerzas armónicas.

Thompson [18] también realizó investigaciones para la obtención de los parámetros óptimos de la frecuencia del sistema ante fuerzas externas, utilizando un método gráfico para conocer dicho parámetro a partir de valores de μ y ξ conocidos.

Slandek y Klingner [19], realizaron el análisis de un edificio alto ante un acelerograma de El Centro, California; considerando una relación de masas μ del 0.65%, hallaron que los parámetros óptimos propuestos por Den Hartog, Weisner y Wirsching obtenían resultados esencialmente idénticos; sin embargo, concluyeron que el uso del AMS no era recomendado para la disminución de la respuesta máxima sísmica de un edificio alto.

En 1985, Villaverde [20] estudió el uso del AMS ante fuerza sísmicas, demostrando que, al aumentar el amortiguamiento del dispositivo, incrementaba el amortiguamiento de la estructura y por ende la respuesta dinámica ante efectos de sismo disminuía; implementando una fórmula para la obtención del amortiguamiento del AMS.

En 1990, Setareh [21], realizó un estudio sobre el uso del AMS para la disminución de vibraciones provocadas por movimientos humanos; concluyendo que cuando los dispositivos son instalados en las ubicaciones cercanas a los puntos de máxima respuesta, el sistema equivalente de un grado de libertad puede ser utilizado de manera eficaz.

Tsai y Lin [22] analizaron la sincronización de frecuencia y la relación de amortiguamiento del AMS ante fuerzas externas por medio de procedimientos numéricos, realizando un método de ajuste de curva para hallar los parámetros óptimos. Determinaron que la respuesta del dispositivo no era eficaz cuando se contaba con un amortiguamiento considerable del sistema principal. El método mencionado se ajusta a $\mu < 20\%$ y $\xi < 15\%$.

Fujino y Abé [23] realizaron una investigación donde empleaban fuerzas armónicas y aleatorias por medio de procedimientos numéricos. Determinaron ciertos parámetros óptimos para sistemas sujetos a vibración libre, armónica y aleatoria, los cuales se obtuvieron considerando $\mu < 2\%$.

Sadek, Mohraz, Taylor y Chung [24] propusieron fórmulas para la obtención de los parámetros óptimos de frecuencia y amortiguamiento del AMS basándose en los estudios realizados por Villaverde.

Más recientemente, Martín del Campo et al., (2022) [25] estudiaron la reducción de la respuesta estructural de aerogeneradores con el empleo del AMS y propusieron expresiones para evaluar la fragilidad del sistema sin y con AMS.

Los estudios anteriores indican que el estudio del AMS continúa siendo de interés para investigadores alrededor del mundo.

CAPÍTULO 3.- EDIFICIO EN ESTUDIO

3.1 UBICACIÓN DEL EDIFICIO

El sitio de estudio es la ciudad de Mexicali, Baja California; la cual se encuentra en una zona de mayor sismicidad del país debido a su cercanía a un gran número de fallas geológicas. En la Figura 3.1 se aprecian las fallas geológicas cercanas a la ciudad.



Figura 3.1. Mapa geológico regional (adaptado de [3])

El último sismo de consideración fue el domingo 4 de abril del 2010 en la Laguna Salada, con epicentro a 18 km de la ciudad; tuvo una magnitud de 7.2

3.2 GEOMETRÍA

La estructura hipotética representativa tiene dimensiones en planta de 12 m de ancho por 18 m de longitud; cuenta con 16 niveles de 4 m de altura de entrepiso, teniendo una altura total del edificio de 64 m. En la Figura 3.2 y 3.3, se muestran vistas en planta y tridimensional del modelo matemático.

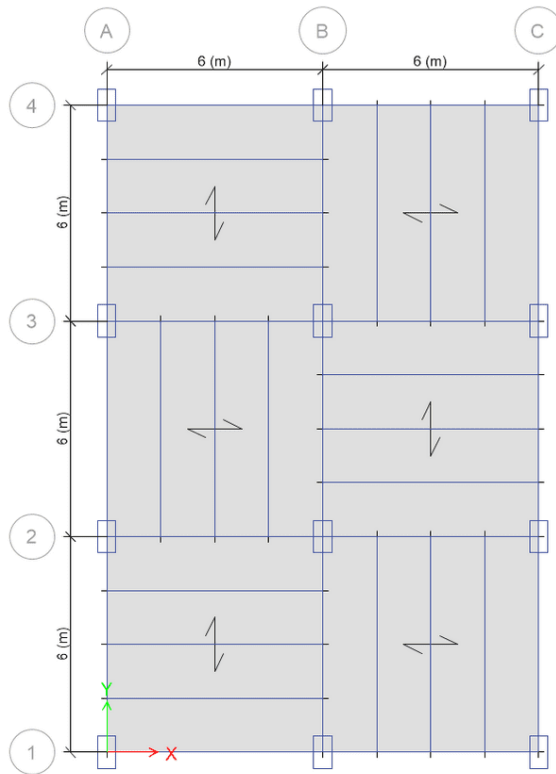


Figura 3.2. Vista en planta del modelo matemático

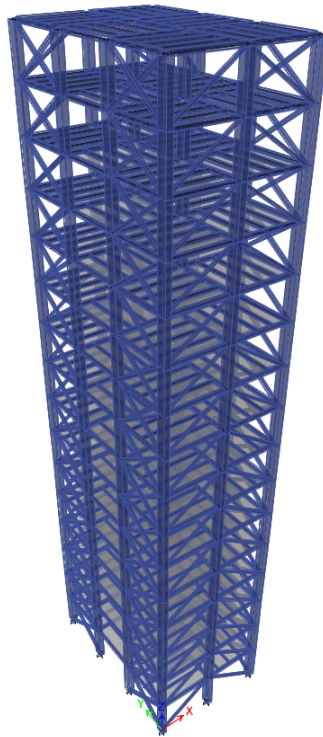


Figura 3.3. Vista tridimensional del modelo matemático

3.3 ESTRUCTURACIÓN Y MATERIALES

La estructura está formada por marcos rígidos de columnas de sección rectangular formadas por placas y vigas de acero de sección W. Los marcos resisten las cargas gravitacionales y, además, para soportar las cargas accidentales generadas por el sismo y viento, se incluyeron contraventeos formados por elementos PTR, brindando así estabilidad a la estructura.

El sistema de entrepiso y cubierta se encuentran formados por losacero soportada sobre vigas secundarias de sección W.

A continuación, se enlistan los materiales contemplados:

Perfiles W ASTM 572 Gr. 50	$f_y = 50 \text{ ksi}$
Perfiles ASTM A36	$f_y = 36 \text{ ksi}$
Perfiles PTR A500B Gr. 46	$f_y = 46 \text{ ksi}$
Concreto	$f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$

3.4 ANÁLISIS DE CARGAS

Las cargas utilizadas para el análisis y diseño de la estructura se obtuvieron de acuerdo con las características de la estructura, y por ende se obtuvieron de la Normas Técnicas Complementarias Estructurales de la Ley de Edificaciones de Baja California [25].

A continuación, se enlistan las cargas de diseño por el tipo de uso.

Cubierta

Peso propio de los elementos estructurales	
Carga muerta colateral	150 kg/m^2
Carga viva	100 kg/m^2
Carga viva instantánea	70 kg/m^2

Entrepiso

Peso propio de los elementos estructurales	
Carga muerta colateral	120 kg/m ²
Carga viva (Uso habitacional)	170 kg/m ²
Carga viva accidental	90 kg/m ²

3.5 ANÁLISIS DE VIENTO

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias del Estado de Baja California [26], la presión de viento se calcula de acuerdo con lo indicado en las siguientes secciones.

3.5.1 CLASIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA

3.5.1.1 DE ACUERDO CON SU IMPORTANCIA

La estructura al considerar hipotéticamente que su uso sería habitacional se encuentra clasificada dentro del grupo B; debido a que su falla ocasionaría pérdidas de magnitud intermedia.

3.5.1.2 DE ACUERDO CON SU RESPUESTA ANTE LA ACCIÓN DEL VIENTO

Debido a que la relación de la altura de la estructura y la dimensión mínima en planta es mayor o igual a 5, se trata de una estructura esbelta; por lo que, su clasificación debido a su respuesta ante la acción de las fuerzas del viento es del Tipo 2.

3.5.2 VELOCIDAD DE DISEÑO, V_D

La velocidad de diseño se obtiene con la ecuación (3.1).

$$V_D = F_{TR} F_{\alpha} V_R \quad (3.1)$$

Los parámetros empleados en la ecuación 3.1, se definen en las siguientes secciones.

3.5.2.1 VELOCIDAD REGIONAL, V_R

Para la ciudad de Mexicali, acorde a la Tabla 3.1 de la normativa citada, la velocidad regional con un período de retorno de 50 años para una estructura con clasificación de importancia grupo B, es de 101 km/h.

Tabla 3.1 Velocidades regionales, V_R , según la importancia de la construcción y la zonificación eólica, km/h

Periodo de retorno, años	Importancia de la construcción			
	AA	A	B	C
	200	200	50	Temporal 10
Mexicali	131	116	101	83
San Felipe y Costa Sur del Golfo	150	130	110	90
Tecate	140	120	110	90
Tijuana	140	130	119	100
Playas de Rosarito	140	130	119	100
Ensenada	135	120	105	86
San Quintin y Costa Sur del Pacífico	150	140	120	100

Figura 3.4. Tabla 3.1 de las Normas Técnicas Complementarias [26] para diseño por viento

3.5.2.2 FACTOR DE VARIACIÓN CON LA ALTURA, F_α

La estructura cuenta con 16 niveles y 60 m de altura, por lo que el factor de variación se obtendrá para cada nivel de entrepiso, utilizando las expresiones:

$$F_\alpha = 1.00; \quad \text{si } z \leq 10.00 \text{ m} \quad (3.2)$$

$$F_\alpha = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad \text{sí } 10.00 \text{ m} < z < \delta \quad (3.3)$$

Donde los valores de α y δ se obtienen de la Tabla 3.2 del documento, acorde al tipo de terreno en el que se encuentra la estructura; al tratarse de un terreno plano con pocas obstrucciones es un terreno tipo R2.

Tabla 3.2 Rugosidad del terreno, α y δ

Tipos de terreno (fig. 3.1)	α δ , m	
	α	δ , m
R1 Escasas o nulas obstrucciones al flujo de viento, como en campo abierto	0.099	245
R2 Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones	0.128	315
R3 Zona típica urbana y suburbana. El sitio está rodeado predominantemente por construcciones de mediana y baja altura o por áreas arboladas y no se cumplen las condiciones del Tipo R4	0.156	390
R4 Zona de gran densidad de edificios altos. Por lo menos la mitad de las edificaciones que se encuentran en un radio de 500 m alrededor de la estructura en estudio tiene altura superior a 20 m	0.170	455

Figura 3.5. Tabla 3.2 de las Normas Técnicas Complementarias [26] para diseño por viento

Para el caso de este análisis, el valor de α y δ es 0.128 y 315 m, respectivamente.

3.5.2.3 FACTOR CORRECTIVO POR TOPOGRAFÍA Y RUGOSIDAD, F_{TR}

Este factor toma en cuenta el efecto de la topografía del sitio donde se ubica la estructura; se considera en el análisis que el terreno en cuestión será en campo abierto, por lo que su tipo de topografía corresponde al Tipo 3.

**Tabla 3.3 Factor F_{TR}
(Factor de topografía y rugosidad del terreno)**

Tipos de topografía (fig. 3.2)	Rugosidad de terrenos en alrededores		
	Terreno tipo R2	Terreno tipo R3	Terreno tipo R4
T1 Base protegida de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento	0.80	0.70	0.66
T2 Valles cerrados	0.90	0.79	0.74
T3 Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores de 5 % (normal)	1.00	0.88	0.82
T4 Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10 %	1.10	0.97	0.90
T5 Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores de 10 %, cañadas o valles cerrados	1.20	1.06	0.98

Figura 3.6. Tabla 3.3 de las Normas Técnicas Complementarias [26] para diseño por viento

De acuerdo con la Figura 3.6, para el tipo de terreno considerado el factor correctivo es:

$$F_{TR} = 1.00$$

3.5.3 PRESIÓN DE DISEÑO, P_z

La presión que ejerce el viento sobre una estructura se obtiene de acuerdo con la ecuación (3.4)

$$p_z = 0.0048 C_p V_D^2 \quad (3.4)$$

donde los coeficientes de presión C_p , se obtienen de la Tabla 3.4 de la normativa mencionada.

Tabla 3.4 Coeficiente C_p para construcciones cerradas

	C_p
Pared de barlovento	0.8
Pared de sotavento ¹	-0.4
Paredes laterales	-0.8
Techos planos	-0.8
Techos inclinados lado de sotavento	-0.7
Techos inclinados lado de barlovento ²	$-0.8 < 0.04\theta - 1.6 <$ 1.8
Techos curvos	ver tabla 3.5 y fig. 3.3

Figura 3.7. Tabla 3.4 de las Normas Técnicas Complementarias [26] para diseño por viento

3.5.4 EMPUJES DINÁMICOS PARALELOS AL VIENTO

Al ser una estructura tipo 2, de acuerdo con la normativa mencionada, se deberá tomar en cuenta en el análisis los efectos estáticos y dinámicos debidos a la turbulencia mediante la expresión (3.5), la cual se multiplicará por la presión de viento calculada.

$$G = 0.43 + g \sqrt{\frac{R}{C_e} \left(B + \frac{SF}{\beta} \right)} \geq 1 \quad (3.5)$$

Donde:

$$g = \left(\sqrt{2 \ln(3600v)} + \frac{0.58}{\sqrt{2 \ln(3600v)}} \right) \left(\frac{1}{2.3} \right) \geq 1.48$$

$$v = n_0 \sqrt{\frac{SF}{SF + \beta B}}$$

$$B = \frac{4}{3} \int_0^{914/H} \left(\frac{1}{1 + \frac{xH}{457}} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{xb}{122}} \right) \left(\frac{x}{(1+x^2)^{4/3}} \right) dx$$

$$S = \frac{\pi}{3} \left(\frac{1}{1 + \frac{8n_0H}{3V_H}} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{10n_0b}{V_H}} \right)$$

$$F = \frac{x_0^2}{(1+x_0^2)^{4/3}}$$

$$x_0 = \left(\frac{1220n_0}{V_H} \right)$$

$$V_H = V_R \sqrt{RC_e}$$

$$C_e = \left(\frac{z}{a} \right)^n$$

Los parámetros R , a y n se obtienen de la Tabla 5.1 de la normativa, que se muestra en la Figura 3.8; los cuales dependen de la rugosidad del terreno del sitio.

Tabla 5.1 Parámetros R , a y n según la condición de exposición

Exposición	R	a	n
R1	0.04	10	0.18
R2	0.08	10	0.28
R3	0.16	20	0.50
R4	0.34	33	0.72

Figura 3.8. Tabla 5.1 de las Normas Técnicas Complementarias [26] para diseño por viento

A continuación, en las Tablas 3.1 y 3.2 se muestran las presiones de diseño calculadas para el análisis en ambas direcciones.

Tabla 3.1. Presiones de diseño en dirección Eje Y

Altura (m)	Pz (kg/m ²)	
	Barlovento	Sotavento
4	43.40	-21.70
8	41.98	-20.99
12	43.19	-21.60
16	45.93	-22.97
20	48.19	-24.10
24	50.14	-25.07
28	51.85	-25.92
32	53.38	-26.69
36	54.78	-27.39
40	56.06	-28.03
44	57.25	-28.62
48	58.53	-29.26
52	59.74	-29.87
56	60.88	-30.44
60	61.97	-30.98
64	63.00	-31.50

Tabla 3.2. Presiones de diseño en dirección Eje X

Altura (m)	Pz (kg/m ²)	
	Barlovento	Sotavento
4	41.40	-20.70
8	39.99	-19.99
12	41.11	-20.56
16	44.18	-22.09
20	46.78	-23.39
24	49.01	-24.51
28	50.99	-25.49
32	52.76	-26.38
36	54.37	-27.19
40	55.86	-27.93
44	57.24	-28.62
48	58.53	-29.26
52	59.74	-29.87
56	60.88	-30.44
60	61.97	-30.98
64	63.00	-31.50

3.6 ANÁLISIS SÍSMICO

La ciudad de Mexicali se encuentra en la zona D de la zonificación sísmica del estado de Baja California. Por lo tanto, se derivan los siguientes parámetros para la formación de los espectros del sitio, obtenidos de la Tabla 3.1 de las Normas Técnicas Complementarias del Estado de Baja California [25].

$$a_0 = 0.25$$

$$c = 0.44$$

$$T_a = 0.13 \text{ s}$$

$$T_b = 0.70 \text{ s}$$

$$r = 4/3$$

El factor de comportamiento sísmico Q en ambas direcciones fue asignado con el valor de $Q = 2$. En la Figura 3.9, se muestran los espectros de servicio, diseño, elástico y de colapso obtenidos de acuerdo con la normativa.

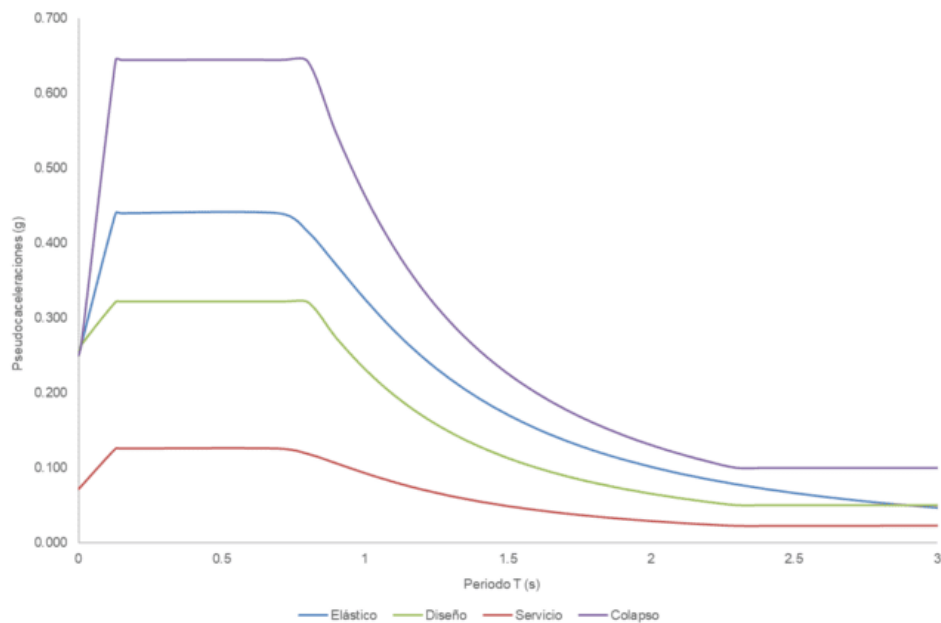


Figura 3.9. Espectros para la ciudad de Mexicali

3.7 COMBINACIONES DE CARGA

La sección 12.2 de las Normas Técnicas Complementarias [26], establece las combinaciones de carga básicas para el diseño empleando factores de carga, teniendo como mínimas las siguientes:

- a) $1.4 CM + 1.4 CV$
- b) $1.1 CM + 1.1 CVa \pm 1.1 V$
- c) $1.1 CM + 1.1 CVa \pm 1.1 S$
- d) $0.9 CM \pm 1.1 V$
- e) $0.9 CM \pm 1.1 S$

donde CM es la carga muerta, CV es la carga viva de acuerdo con el uso que tendrá el edificio, CVa es la carga viva instantánea, la cual se utiliza para el diseño sísmico y por viento, V son las cargas debidas al viento y S las cargas debidas al sismo.

3.8 ANÁLISIS Y DISEÑO ESTRUCTURAL

Una vez obtenidos los efectos accidentales, así como las cargas gravitacionales actuantes en la estructura se procedió a analizar la estructura. Para el análisis estructural se elaboró un modelo tridimensional en el programa comercial ETABS [1].

Al asignarle al programa los datos de la geometría, las acciones actuantes y las combinaciones de carga de diseño, el programa calcula las deformaciones y elementos mecánicos resultantes. El diseño final es el resultado de la revisión de la información obtenida y el ajuste de los elementos de la estructura hasta el punto en el que se cumplen los estados límite de diseño establecidos por el reglamento.

Se realizó un análisis sísmico modal espectral utilizando el espectro de diseño obtenido de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias del Estado de Baja California [26].

A continuación, se presentan los resultados generales del análisis estructural.

3.8.1 Relaciones de esfuerzos

A continuación, se muestran las relaciones de esfuerzo (esfuerzo actuante entre esfuerzo resistente) para el análisis del modelo matemático del edificio. Para que la sección propuesta sea aceptable para el diseño estructural, su relación de esfuerzo deberá ser menor o igual a la unidad.

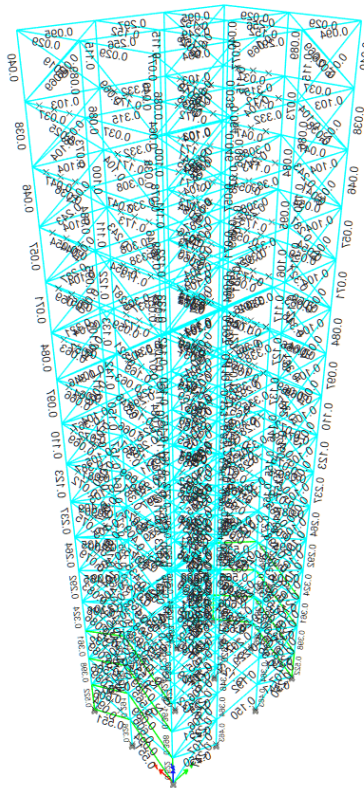


Figura 3.10. Relación de esfuerzos en programa comercial ETABS [1]

Se aprecia en la Figura 3.10, que todos los elementos se encuentran con una relación de esfuerzos menor a la unidad, por lo que el diseño se considera adecuado.

3.8.2 Revisión desplazamientos por efectos de sismo y viento

La revisión por desplazamientos se realiza de acuerdo con el valor permisible de la normativa del estado.

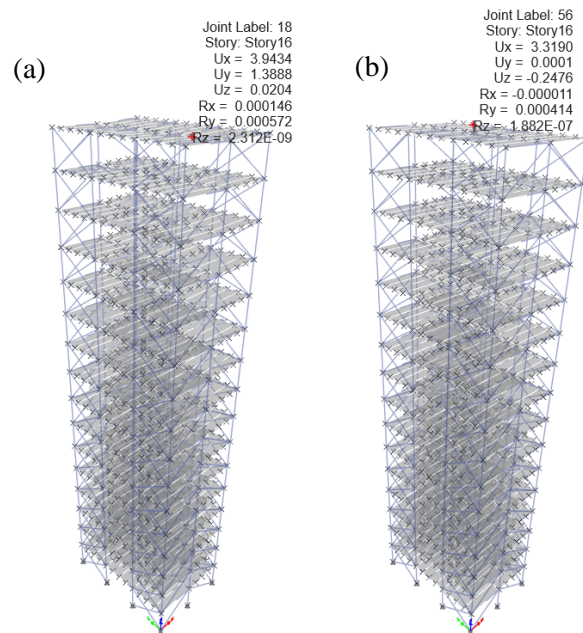


Figura 3.11. Desplazamientos en dirección X: a) debido a las fuerzas de sismo; b) debido a las fuerzas de viento

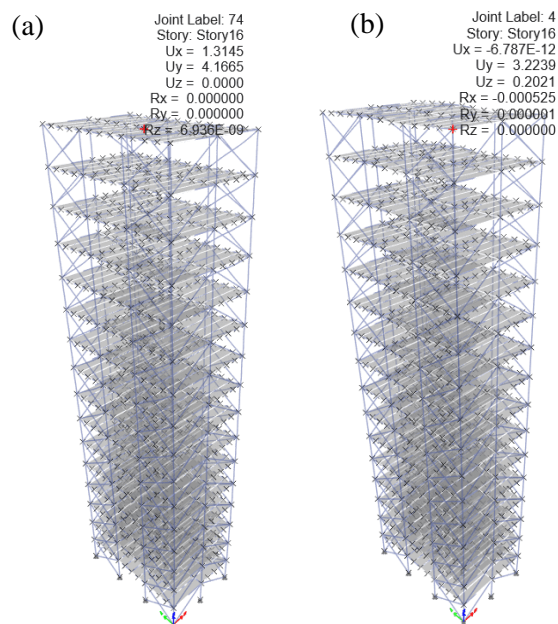


Figura 3.12. Desplazamientos en dirección Y: a) debido a las fuerzas de sismo; b) debido a las fuerzas de viento

Como se aprecia, el desplazamiento en dirección X causada por la carga de sismo es de 3.94 cm, mientras que el desplazamiento obtenido por fuerzas de viento es de 3.32 cm. Así mismo, en dirección Y se tiene un desplazamiento causado por sismo de 4.17 cm, y el causado por fuerzas de viento es de 3.22 cm.

Por lo tanto, los desplazamientos por sismo rigen en ambas direcciones, por lo que las distorsiones resultan:

$$3.94 \text{ cm} / 6400 \text{ cm} = 0.0006 < 0.012$$

$$4.17 \text{ cm} / 6400 \text{ cm} = 0.0007 < 0.012$$

De acuerdo con los resultados anteriores se considera que la estructura cumple con la condición de servicio de desplazamiento lateral.

3.9 PROPIEDADES MODALES DE LA ESTRUCTURA

Como resultado del análisis y diseño estructural anteriormente descrito, se realiza el cálculo de las propiedades modales de la estructura para el primer modo de traslación (masa modal, rigidez modal y fracción de amortiguamiento); para el cual, se tiene un periodo fundamental de vibración de 1.529 s.

Para el cálculo de la masa y rigidez modal, así como del coeficiente de amortiguamiento de la estructura se emplea el procedimiento dado por Chopra [29].

Iniciando con el cálculo de la masa modal es necesario obtener tanto la masa total de los niveles de la estructura, como los desplazamientos modales, éstos se obtienen del programa matemático, los cuales para cuestiones de cálculo deben ser normalizados. En la Figura 3.13 se aprecian estos desplazamientos.

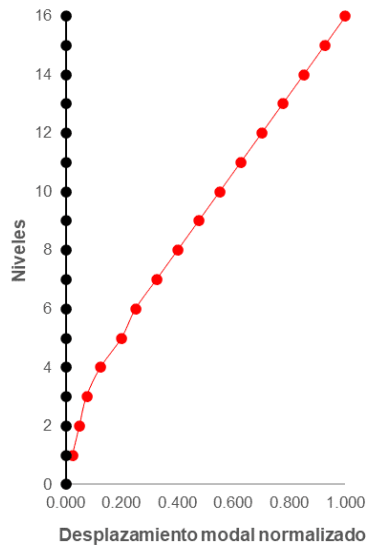


Figura 3.13. Desplazamientos modales normalizados

La ecuación (3.5) se emplea para determinar la masa modal.

$$M_{modal} = \frac{\sum m\phi^2}{\sum m * \phi^2} \quad (3.5)$$

La información necesaria para emplear la ecuación anterior se obtiene directamente del programa comercial ETABS [1]; en la Tabla 3.3 se muestra la información mencionada.

Tabla 3.3. Masas y desplazamientos modales obtenidos de ETABS [1].

Nivel	Masa (ton)	ϕ	$m\phi$	$m*\phi^2$
1	13.04	0.025	0.326	0.008
2	13.04	0.050	0.652	0.033
3	13.04	0.075	0.978	0.073
4	13.04	0.125	1.630	0.204
5	13.04	0.200	2.607	0.521
6	13.04	0.250	3.259	0.815
7	13.04	0.325	4.237	1.377
8	13.04	0.400	5.214	2.086
9	13.04	0.475	6.192	2.941
10	13.04	0.550	7.170	3.943
11	13.04	0.625	8.148	5.092
12	13.04	0.700	9.125	6.388
13	13.04	0.775	10.103	7.830
14	13.04	0.850	11.081	9.419
15	13.04	0.925	12.058	11.154
16	11.21	1.000	11.207	11.207
Σ	206.75		93.99	63.09

Por lo tanto, la masa modal de la estructura es:

$$M_{modal} = 140.012 \text{ t-s}^2/m$$

La cual es equivalente al 67.72% de la masa total de estructura analizada.

Continuamos con el cálculo de la rigidez modal y fracción de amortiguamiento, utilizando las siguientes expresiones:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (3.6)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.7)$$

$$c = \xi(2m\omega_n) \quad (3.8)$$

Conociendo el valor del periodo natural de la estructura, se realiza un despeje en la ecuación (3.6) para obtener la frecuencia circular y a su vez, calcular la rigidez modal con la ecuación (3.7).

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_n} = 4.109 \text{ rad/s}$$

$$k = \omega_n^2 m = 2364.34 \text{ kN/m}$$

Finalmente, se calcula la fracción de amortiguamiento con la ecuación (3.8), donde el valor del porcentaje de amortiguamiento ξ , se obtiene de la Tabla 4.4.3 de las Normas Técnicas Complementarias del Estado de Baja California [26] en materia de Criterio y Acciones de Diseño Estructural.

Tabla 4.4.3 VALORES REPRESENTATIVOS DE RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO ESTRUCTURAL

Tipo de estructura	$\zeta_{est,x}$
Edificios de concreto reforzado y presforzado	0.015
Edificios de acero	0.010
Estructuras mixtas de concreto y acero	0.013
Chimeneas y torres de concreto reforzado	0.01
Chimeneas de acero soldadas y sin recubrimientos	0.002
Chimeneas de acero soldadas con recubrimiento	0.005
Chimeneas de acero con recubrimiento de refractarios	0.01
Torres de celosía soldadas	0.003
Torres de celosía atornilladas	0.005

Figura 3.14. Tabla 4.4.3 de las Normas Técnicas Complementarias [26].

Al tratarse nuestro objeto de estudio de una estructura de acero, el valor representativo de relación de amortiguamiento estructural es de 0.010 ó 1%, por lo tanto:

$$c = 0.010(2) \left(140.012 \frac{t-s^2}{m} \right) \left(4.109 \frac{rad}{s} \right) = 11.51 \text{ kN} - s / m$$

En la Tabla 3.4 se muestra un resumen de las propiedades modales de la estructura.

Tabla 3.4. Propiedades modales de la estructura

Modo	Eje	Periodo (s)	Masa (t-s ² /m)	Rigidez (kN/m)	Coef. de Amortiguamiento (kN-s/m)
1	Y	1.529	140.012	2364.34	11.51

CAPÍTULO 4.- SIMULACIÓN DE SEÑALES DE VIENTO TURBULENTO Y ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS

4.1 SEÑALES DE VIENTO TURBULENTO

Con ayuda del programa SVTpro [27], el cual es un programa que permite simular señales de velocidades de viento turbulento para inducir las en algún sistema estructural y conocer su comportamiento.

En este programa deben indicarse ciertos parámetros para la obtención de dichas señales, iniciando con las coordenadas “X” y “Y” de los puntos a analizar; en la Figura 4.1 se aprecia el alzado transversal (marco 2D) del objeto de estudio del cual se obtienen las coordenadas.

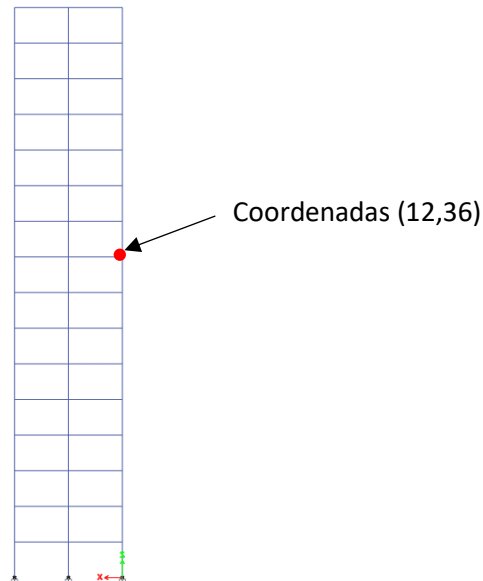


Figura 4.1. Alzado transversal del objeto de estudio (se muestra un punto representativo de coordenadas)

Otro parámetro necesario es la velocidad media de viento para efectos dinámicos, el cual se obtiene para cada nivel de la estructura utilizando la normativa mencionada; el procedimiento para su obtención se describe a continuación.

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias del Estado de Baja California [26], la velocidad media de viento para efectos dinámicos se obtiene con la ecuación (4.1).

$$V'D = F'_{TR} F'_{\alpha} V_R \quad (4.1)$$

donde el factor correctivo por topografía y rugosidad de terreno F'_{TR} se obtiene de la Tabla 5.1.1 de las Normas Técnicas Complementarias [26] mostrada en la Figura 4.2.

Tabla 5.1.1 Factor F'_{TR}

Tipos de topografía (fig. 3.1.2 y tabla 3.1.3)	Rugosidad de terrenos en alrededores		
	Terreno tipo R2	Terreno tipo R3	Terreno tipo R4
T1	0.80	0.62	0.44
T2	0.90	0.70	0.50
T3	1.00	0.77	0.55
T4	1.10	0.85	0.60
T5	1.20	0.92	0.66

Figura 4.2. Tabla 5.1.1 de las Normas Técnicas Complementarias [26]

Al tener nuestro objeto de estudio un tipo de topografía T3 y un tipo de terreno R2, el factor F'_{TR} es:

$$F'_{TR} = 1.00$$

El factor de variación por altura F'_α se obtiene utilizando las expresiones:

$$F'_\alpha = 0.702; \quad \text{sí } z \leq 10.00 \text{ m} \quad (4.2)$$

$$F'_\alpha = 0.702 \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha'} \quad \text{sí } 10.00 \text{ m} < z < 200.00 \text{ m} \quad (4.3)$$

donde el valor de alfa prima α' se obtiene de la Tabla 5.0.1 del documento, acorde al tipo de terreno en el que se encuentra la estructura; al tratarse de un terreno plano con pocas obstrucciones es un terreno tipo R2.

Tabla 5.0.1 Parámetros \bar{d} , Z_0 , Z_{min} y α' según la condición de exposición

Exposición	\bar{d}	Z_0 (m)	Z_{min} (m)	α'
R1	0.15	0.01	1	0.12
R2	0.19	0.05	2	0.16
R3	0.29	0.30	5	0.21
R4	0.43	1.0	10	0.29

Figura 4.3. Tabla 5.0.1 de las Normas Técnicas Complementarias [26] para diseño por viento.

Por último, la velocidad regional V_R se obtiene como se muestra en el apartado 3.5.2.1 de este documento, siendo entonces:

$$V_R = 101 \text{ km/h}$$

Finalmente, calculamos la velocidad media de viento para efectos dinámicos utilizando la ecuación 4.1. En la Tabla 4.1, se muestra las velocidades obtenidas para cada nivel de la estructura.

Tabla 4.1. Velocidad media de viento para efectos dinámicos

Altura (m)	V _D (km/h)	V _D (m/s)
4	70.90	19.70
8	70.90	19.70
12	73.00	20.28
16	76.44	21.23
20	79.22	22.00
24	81.56	22.66
28	83.60	23.22
32	85.40	23.72
36	87.03	24.17
40	88.51	24.59
44	89.87	24.96
48	91.13	25.31
52	92.30	25.64
56	93.40	25.95
60	94.44	26.23
64	95.42	26.51

La información anterior se ingresa al programa como se muestra en la Figura 4.4.

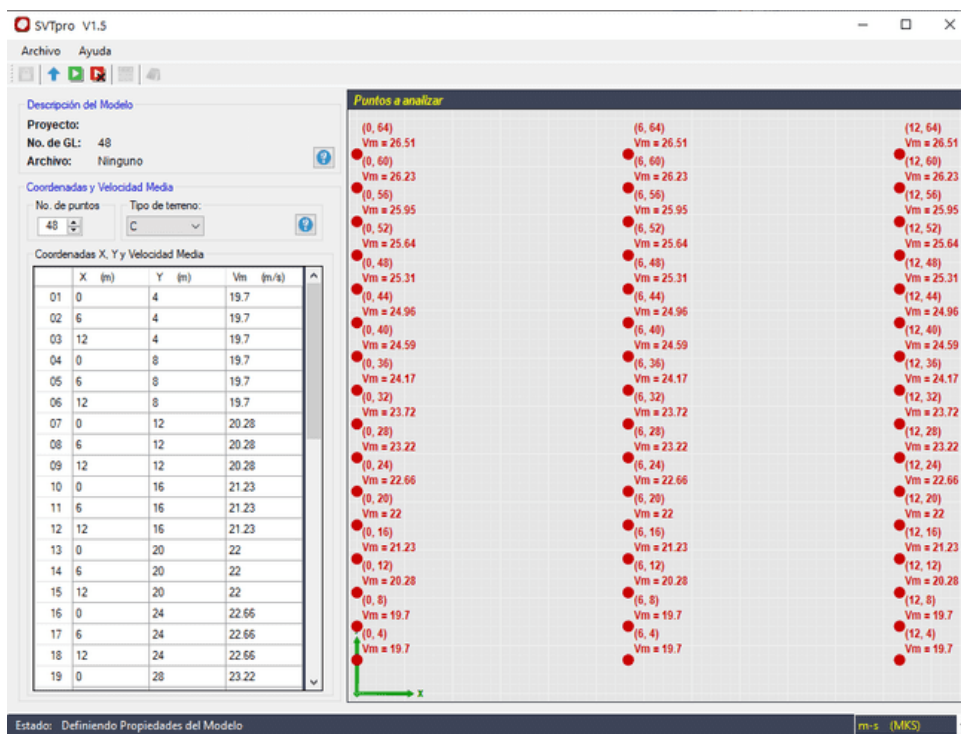


Figura 4.4. Programa SVTpro [27]

Una vez ingresados los parámetros, se indica la Función de Densidad de Potencia Espectral que se desea utilizar y se inicia la simulación (Figura 4.5).

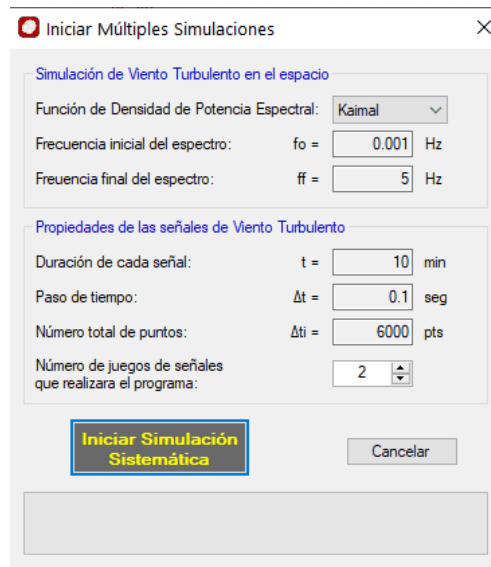


Figura 4.5. Parámetros informativos de la simulación del programa SVTpro [27]

Al terminar los cálculos el programa presenta una pantalla con los resultados obtenidos, en la Figura 4.6 se aprecia lo anteriormente mencionado.

	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6
▶ 0001	-0.63963	4.26037	2.10661	-3.61058	-2.87898	-0.93506
0002	-0.14784	1.54654	1.72712	-2.29875	-3.81478	-0.83751
0003	-0.85286	2.83475	0.92624	-1.19599	-5.05902	0.54101
0004	-0.00514	-0.12399	-1.56948	-2.67588	-5.0053	-4.2695
0005	0.61387	6.70185	-0.85697	-0.83445	-3.74507	-5.99768
0006	-0.15336	2.64548	-4.45629	-2.94058	-6.5662	-3.76265
0007	-0.42285	0.35233	-3.08607	-2.06981	-6.86418	-6.74276
0008	2.9922	1.69509	-5.14215	-1.65883	-2.91161	-7.0375
0009	0.38638	5.34125	-2.23125	-1.56963	-3.05791	-5.30383
0010	-0.12686	1.51805	-3.80958	-1.2728	-3.971	-6.16749
0011	-1.10508	-0.58769	2.42828	-1.50626	-2.83084	-4.56678
0012	-5.98371	-4.14011	1.79378	-5.84752	-4.1868	-5.69395
0013	-2.69376	-4.64008	-2.90311	-6.60461	-7.6023	-3.96658

Figura 4.6. Resultados de la simulación de señales de viento turbulento del programa SVTpro [27]

Para el análisis numérico en el programa MATLAB [2], se analizaron 10 simulaciones sistemáticas de velocidades de viento turbulento, cada simulación con 30 señales de velocidades y cada señal con un total de 6000 puntos de velocidades con un intervalo de tiempo de 0.1 s.

Por otra parte, para el análisis en el modelo matemático en el programa comercial ETABS [1], se obtienen 10 simulaciones sistemáticas de velocidades de viento turbulento, cada simulación cuenta con 48 señales de velocidades de viento (uno para cada coordenada ingresada); además, cada señal consta de 6000 puntos de velocidades con un intervalo de tiempo de 0.1 s, dando una señal de 10 min.

Para considerar los efectos del viento en ambos análisis de esta investigación, es necesario realizar la conversión de la señal de velocidades a fuerzas de arrastre actuantes; esto se realiza por medio de la ecuación (4.4).

$$F_D(t) = \frac{1}{2} \rho V(t)^2 C_D A \quad (4.4)$$

donde ρ es la densidad del aire, C_D es el coeficiente de arrastre, A el área expuesta al viento y $V(t)$ es la velocidad de viento.

Por medio de un código de programación en el software MATLAB [2], se realiza la conversión de señales de velocidades a fuerzas actuantes, donde el valor del área expuesta al viento A , corresponde al área tributaria del nodo en cuestión y $V(t)$ las señales de viento turbulento.

En las Figuras 4.7 y 4.8, se muestra un ejemplo de las señales de viento turbulento obtenidas, así como, la conversión a fuerzas de arrastre de viento respectivamente.

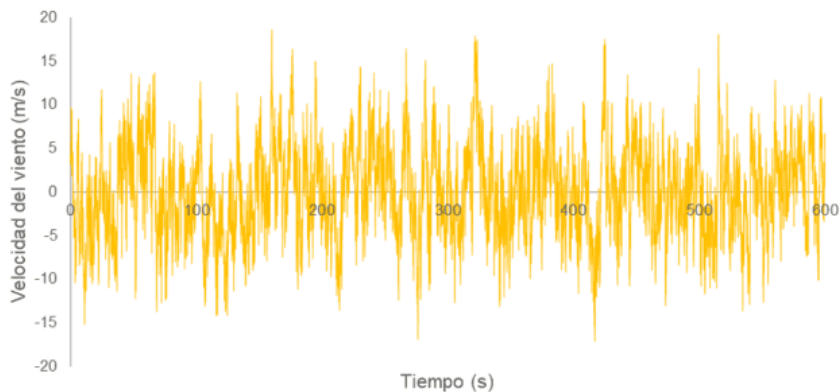


Figura 4.7. Señal de velocidades de viento turbulento

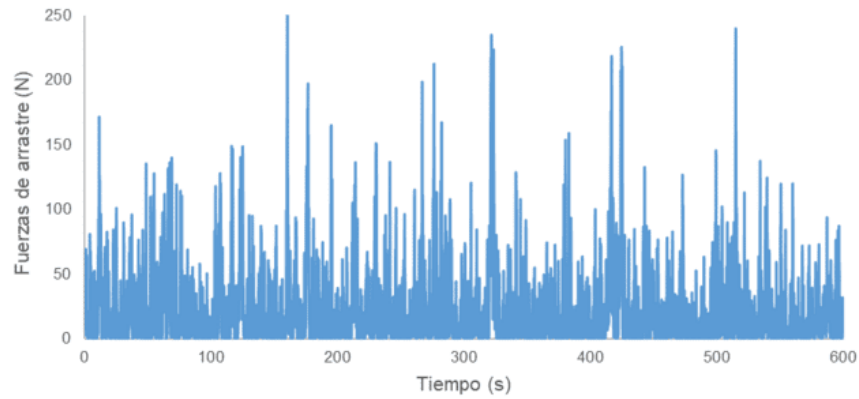


Figura 4.8. Fuerzas de arrastre de viento turbulento

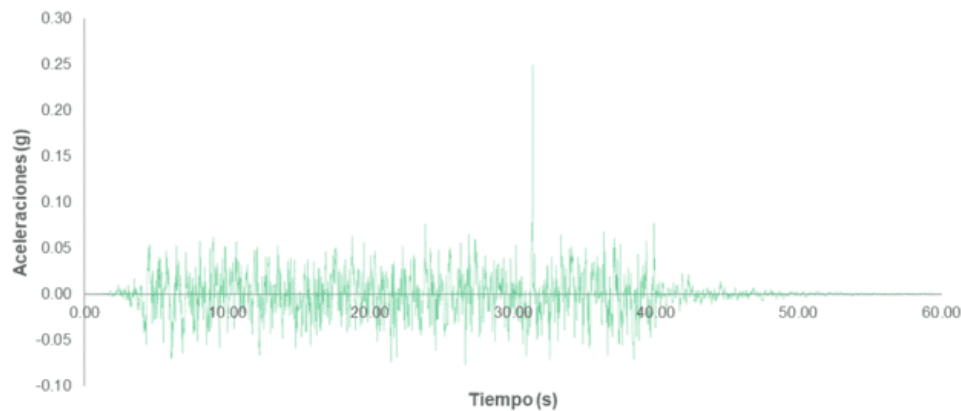
4.2 ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS

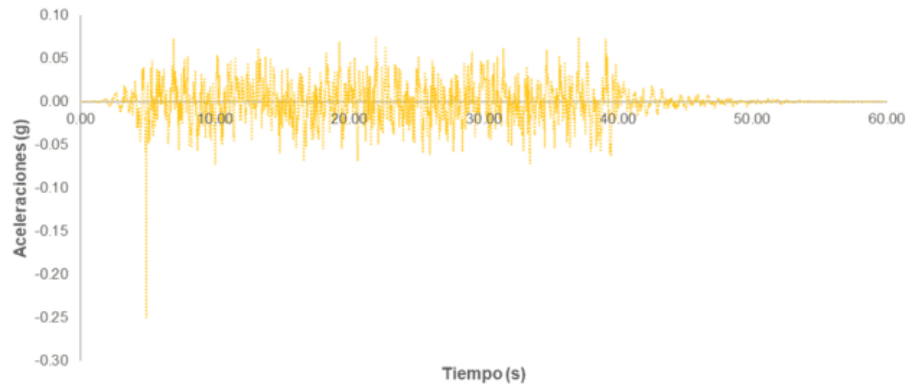
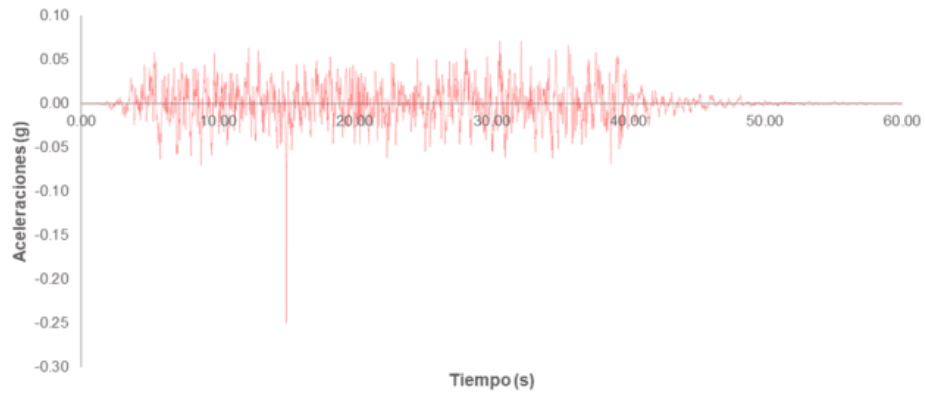
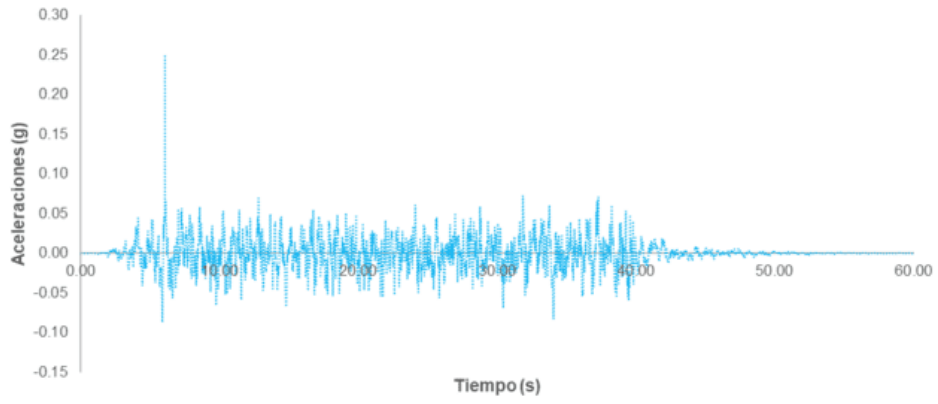
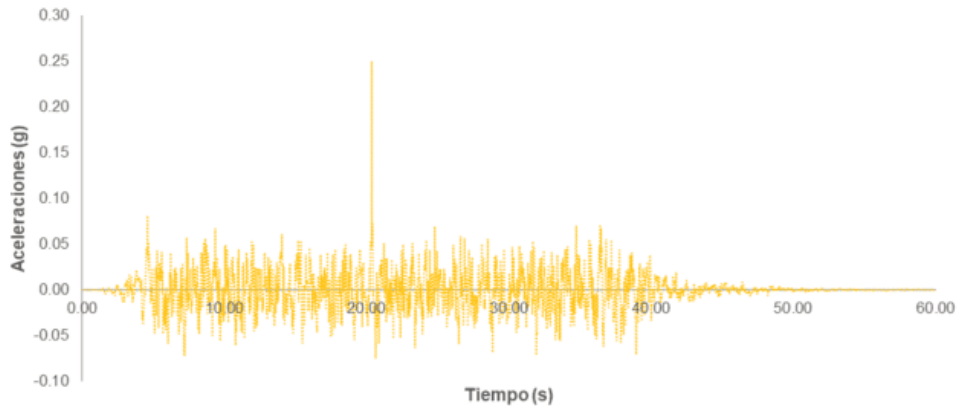
Se empleó el programa SIMQKE [28] para la simulación de los acelerogramas sintéticos. El programa que permite generar acelerogramas sintéticos a partir de parámetros de un espectro; para este caso, el espectro utilizado es el de diseño mostrado en el apartado 3.6 de este documento, el cual se obtiene de acuerdo con lo especificado en las Normas Técnicas Complementarias [26].

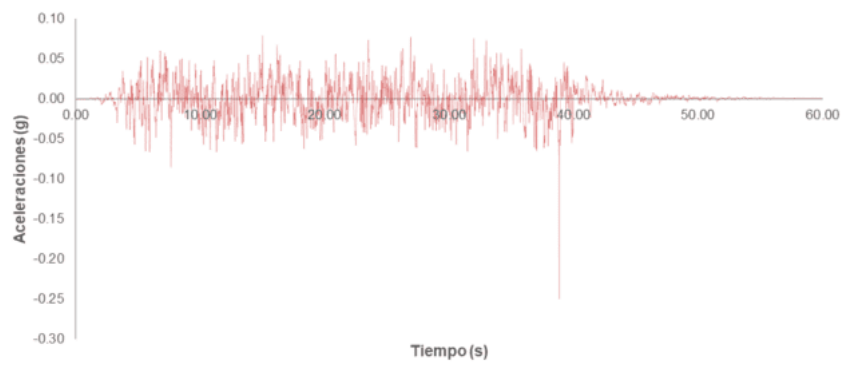
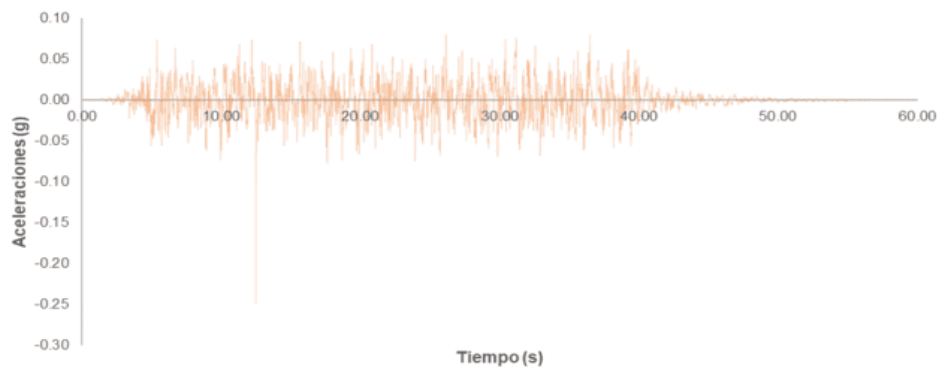
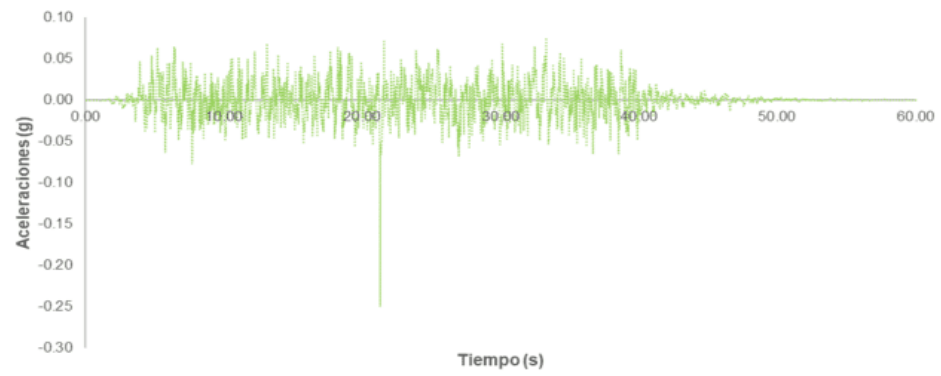
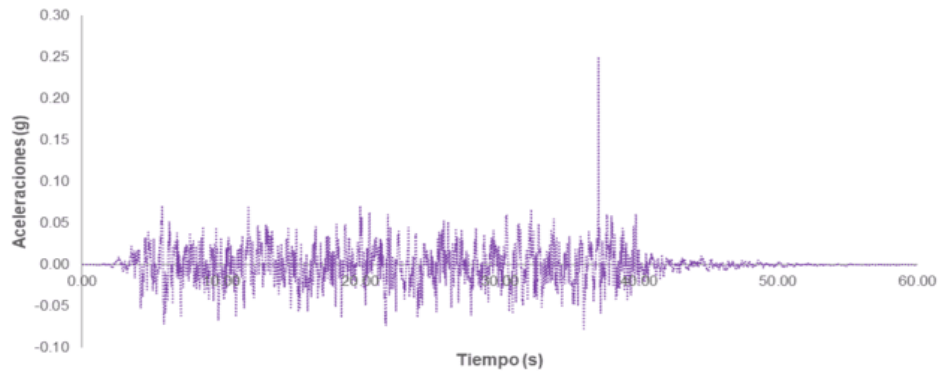
Obtenidos dichos acelerogramas sintéticos, por medio de un código de programación en el programa MATLAB [2], se generan los espectros correspondientes a los acelerogramas sintéticos para verificar que su promedio sea parecido al espectro de diseño calculado.

Para fines de esta investigación se obtienen un total de 10 acelerogramas sintéticos; para ello, es necesario ingresar como parámetros la aceleración inicial del espectro, así como la duración de este y el intervalo de tiempo para el que fue calculado.

A continuación, se muestran los acelerogramas sintéticos obtenidos.







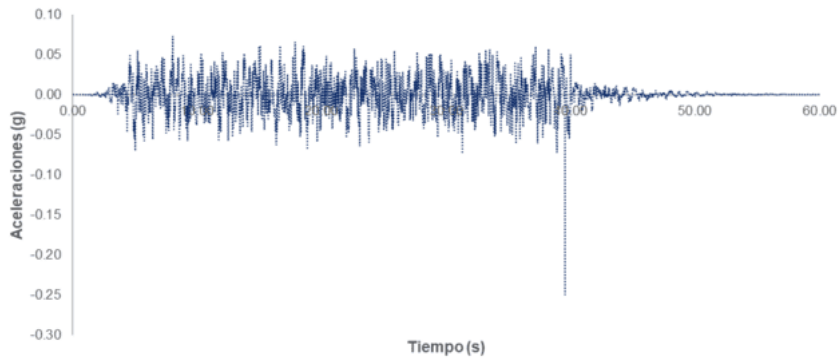


Figura 4.9. Acelerogramas sintéticos

Del mismo modo, en la Figura 4.10 se aprecia el espectro de diseño calculado en el apartado 3.6 de este documento; mientras que en la Figura 4.11, se aprecian los espectros obtenidos de los acelerogramas sintéticos, así como el promedio de estos.

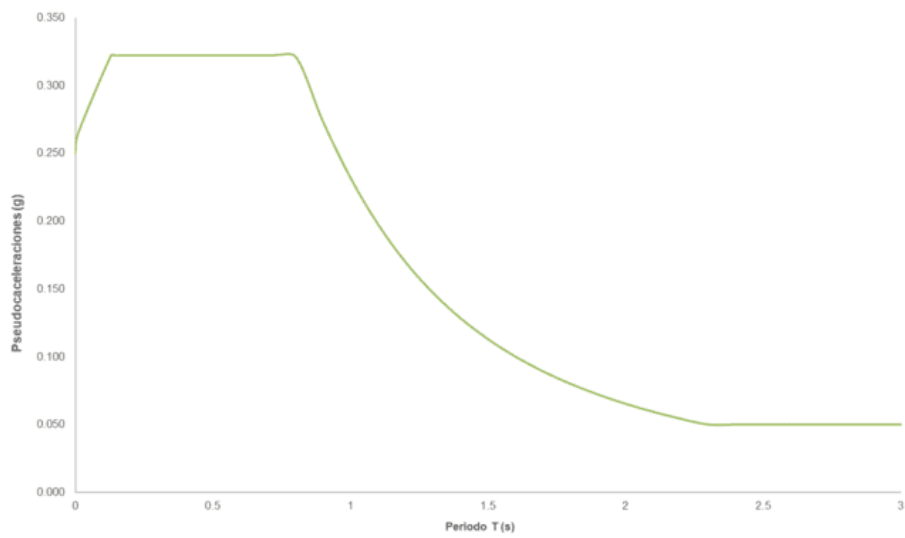


Figura 4.10. Espectro de diseño para el objeto de estudio

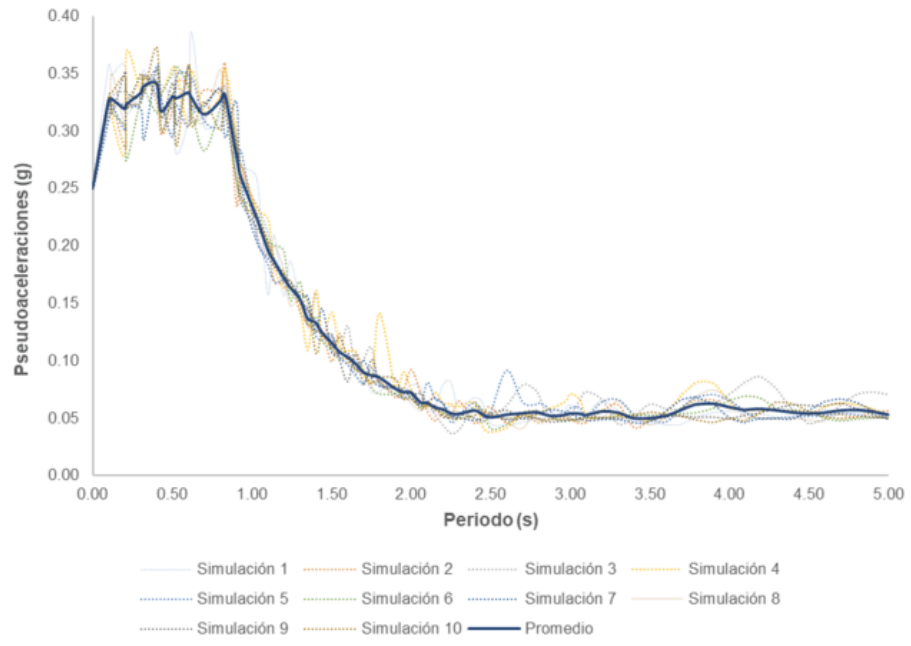


Figura 4.11. Espectros obtenidos de los acelerograma sintéticos

CAPÍTULO 5.- ANÁLISIS NÚMERICOS

5.1 SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD

Conociendo las propiedades modales de la estructura (ver Tabla 3.4), en una primera instancia, se conceptualiza el análisis de un sistema de un grado de libertad para representar a la estructura.

Para este sistema, se realiza el análisis numérico mediante dos códigos de programación en el programa MATLAB [2], utilizando el “Método de Newmark”. En dichos códigos, se ingresan las 30 simulaciones de fuerzas de viento turbulento, así como los 10 acelerogramas sintéticos para obtener la respuesta dinámica del sistema.

5.2 MÉTODO DE NEWMARK

En busca de obtener la respuesta dinámica de la estructura y mediante un código de programación en el software MATLAB [2], utilizando el “Método de Newmark” para resolver la ecuación de movimiento (5.1), en puntos discretos del tiempo. El procedimiento, así como las ecuaciones mostradas se obtienen de Chopra [29].

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + ku_{i+1} = p_{i+1} \quad (5.1)$$

Este método posee dos casos especiales: el primero considerando aceleración constante en el tiempo y el segundo, considerando una variación lineal de la aceleración; para ello, se incluyen los parámetros beta β y gamma γ , los cuales definen la variación de la aceleración durante un paso de tiempo y determinan las características de estabilidad y precisión del método.

Para esta investigación, se considera el primer caso especial del método; para el cual, se contempla una variación lineal de la aceleración, por lo que los parámetros son:

$$\beta = \frac{1}{6} \quad , \quad \gamma = \frac{1}{2}$$

Los valores de la respuesta de la estructura se obtienen realizando los siguientes cálculos para cada paso del tiempo, como se muestra a continuación:

$$\hat{p}_{i+1} = p_{i+1} + a_1 u_i + a_2 \dot{u}_i + a_3 \ddot{u}_i \quad (5.2)$$

$$u_{i+1} = \hat{p}_{i+1} / \hat{k} \quad (5.3)$$

$$\dot{u}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (u_{i+1} - u_i) + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta}\right) \dot{u}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{u}_i \quad (5.4)$$

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} (u_{i+1} - u_i) - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_i - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \ddot{u}_i \ddot{u}_i \quad (5.5)$$

Para iniciar con el método se establecen condiciones iniciales del sistema como son el desplazamiento y la velocidad inicial; mientras que la aceleración inicial del sistema se obtiene haciendo el respectivo despeje de la ecuación (5.1).

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{(p_{i+1} - c\dot{u}_{i+1} - ku_{i+1})}{m}$$

Para que el análisis numérico sea sencillo, se realiza una conceptualización de un sistema mecánico equivalente en donde en lugar de enfocar el análisis en toda la estructura, se realizan un modelo de uno y dos grados de libertad.

El primer modelo conceptualiza la idea de la estructura sin los efectos del sistema de protección, mientras que en el segundo se incorporan las propiedades del AMS.

5.2.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FUERZAS DE VIENTO TURBULENTO

Realizando el análisis numérico para el sistema de un grado de libertad por medio del código anteriormente comentado, se obtienen las aceleraciones y desplazamientos máximos por simulación.

En la Figura 5.1, se presentan aceleraciones máximas del sistema de un grado de libertad ante las simulaciones fuerzas de viento turbulento.

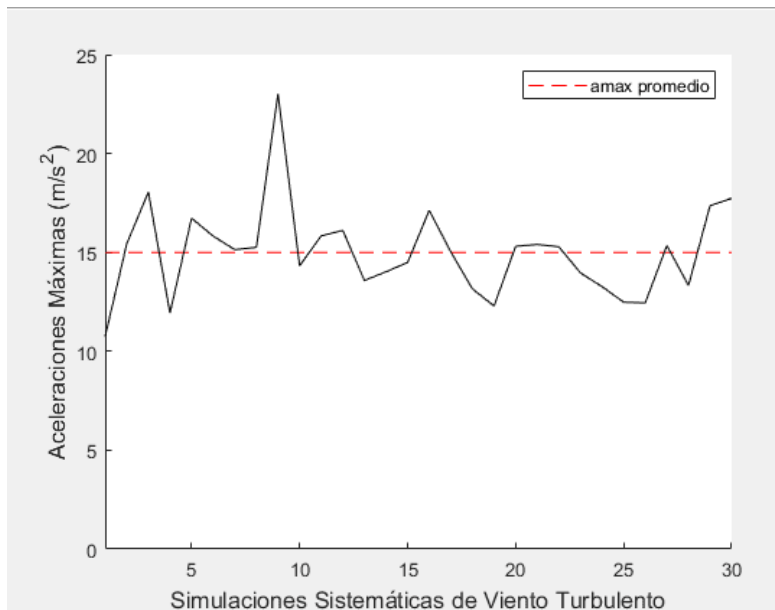


Figura 5.1. Aceleraciones Máximas para Sistema de 1GDL

Se observa en la Figura 5.1 que las respuestas presentan valores desde los 11 m/s² hasta los 24 m/s², teniendo una aceleración máxima promedio de 15 m/s².

En la Figura 5.2, se presentan los desplazamientos máximos sistema de un grado de libertad ante las simulaciones fuerzas de viento turbulento. Se observa que las respuestas presentan valores desde 0.80 m hasta 1.45 m, teniendo un desplazamiento máximo promedio de 0.96 m.

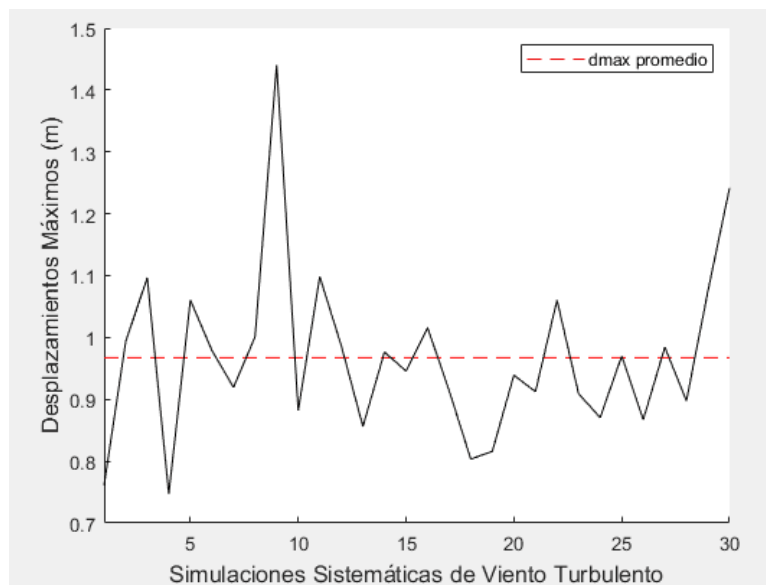


Figura 5.2. Desplazamientos Máximos para Sistema de 1GDL

5.2.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS

Realizando el análisis numérico para el sistema de un grado de se obtienen las aceleraciones y desplazamientos máximos por acelerograma sintético.

En la Figura 5.3, se presentan aceleraciones máximas del sistema de un grado de libertad ante los acelerogramas sintéticos. Se observa que las respuestas presentan valores desde los 0.173 m/s^2 hasta los 0.193 m/s^2 , teniendo una aceleración máxima promedio de 0.18 m/s^2 .

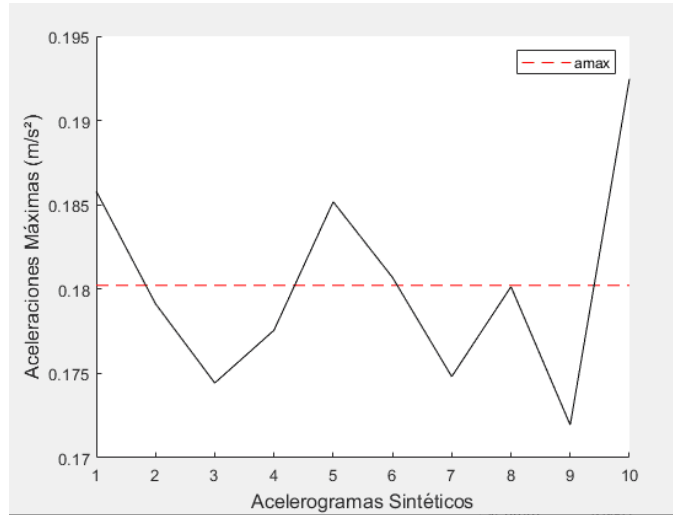


Figura 5.3. Aceleraciones Máximas para Sistema de 1GDL

En la Figura 5.4, se observan los desplazamientos máximos del sistema de un grado de libertad ante los acelerogramas sintéticos. Se observa que las respuestas presentan valores desde $2.55 \times 10^{-4} \text{ m}$ hasta $3.45 \times 10^{-4} \text{ m}$, teniendo un desplazamiento máximo promedio de 0.00029 m .

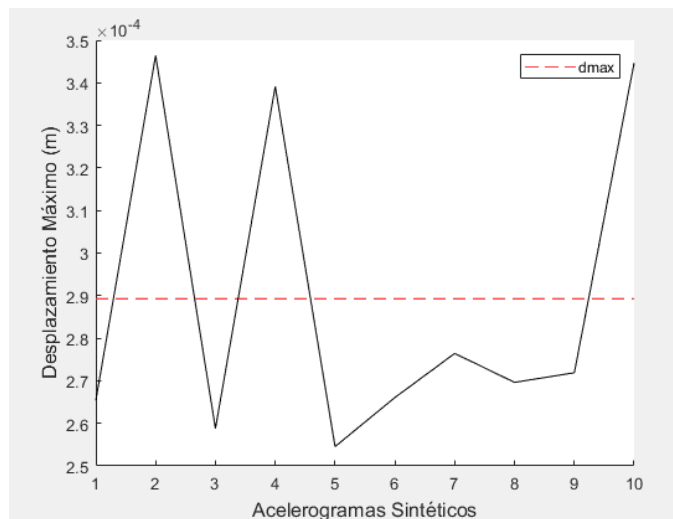


Figura 5.4. Desplazamientos Máximos para Sistema de 1GDL

5.3 SISTEMA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD

Al igual que para el sistema de un grado de libertad, se realiza una conceptualización mecánico equivalente de un sistema de dos grados de libertad; en el cual, se incorporan las propiedades del AMS y la estructura.

Para este sistema, se realiza el mismo procedimiento descrito anteriormente, con ayuda del programa MATLAB [2], y utilizando el “Método de Newmark” anteriormente mencionado. La diferencia en el análisis radica en que se incorporan en ambos códigos las propiedades del AMS, abarcando intervalos de la relación de masa (μ) definida como masa del AMS/masa de la estructura, relación de frecuencias (r_f) definida como frecuencia del AMS/frecuencia de la estructura y relación porcentaje de amortiguamiento del AMS (r_ξ) definida como amortiguamiento del AMS/amortiguamiento de la estructura, con el propósito de determinar la combinación de parámetros que presentan mayor reducción a la respuesta dinámica.

El intervalo de parámetros para el análisis contemplado es el siguiente:

$$\mu = [0 - 20\%]$$

$$r_f = [90 - 120\%]$$

$$r_\xi = [1 - 20\%]$$

Del mismo modo que para el análisis del sistema de 1GDL, se ingresan las 30 simulaciones de fuerzas de viento turbulento, así como los 10 acelerogramas sintéticos para obtener la respuesta dinámica del sistema.

5.3.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE FUERZAS DE VIENTO TURBULENTO

Realizando el análisis numérico para el sistema de dos grados de libertad por medio del código mencionado, se obtienen las aceleraciones y desplazamientos máximos por simulación.

En la Figura 5.5, se presentan las aceleraciones máximas del sistema de dos grados de libertad ante las simulaciones de fuerzas de viento turbulento.

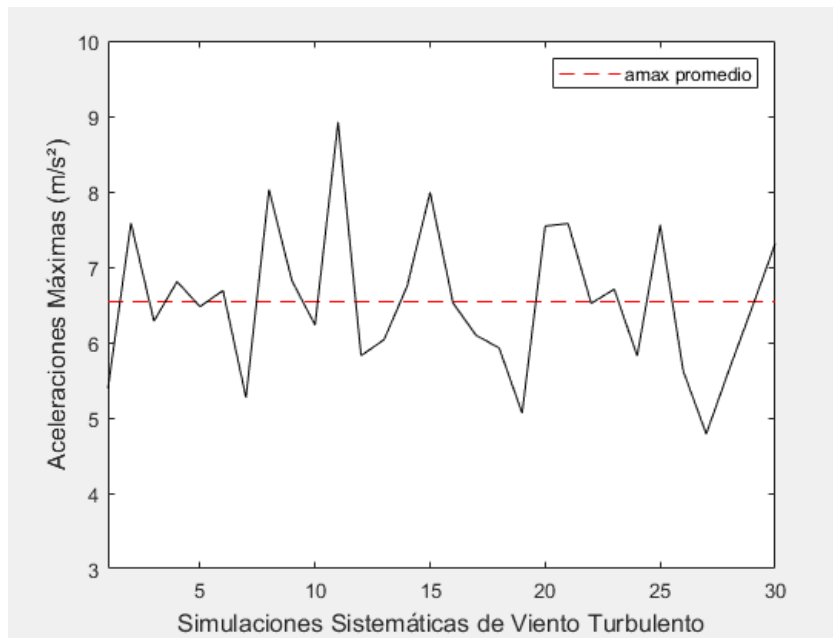


Figura 5.5. Aceleraciones Máximas para Sistema de 2GDL

Se observa que las respuestas presentan valores desde los 4.80 m/s² hasta los 9 m/s², teniendo una aceleración máxima promedio de 6.42 m/s².

Este resultado demuestra que la respuesta dinámica del sistema por aceleraciones presenta una disminución del 57.18% de acuerdo con el análisis numérico; lo cual, representa que los parámetros óptimos para mayor disminución de aceleraciones son:

$$\mu = 0.20$$

$$r_f = 0.94$$

$$r_\xi = 0.20$$

En la Figura 5.6, se presentan los desplazamientos máximos sistema de 2GDL ante fuerzas de viento turbulento.

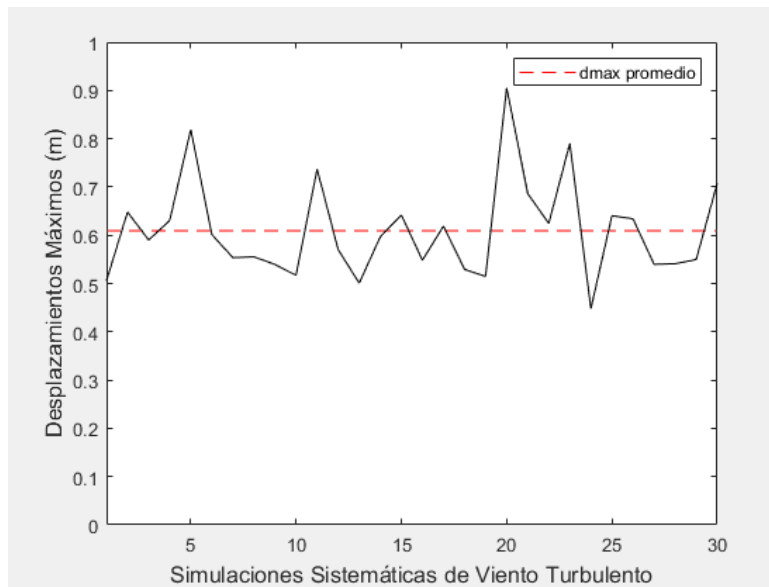


Figura 5.6. Desplazamientos Máximos para Sistema de 2GDL

Se observa que las respuestas presentan valores desde 0.45 m hasta 0.93 m, teniendo un desplazamiento máximo promedio de 0.609 m.

Lo anterior demuestra que la respuesta dinámica del sistema ante desplazamientos presenta una disminución del 36.99% de acuerdo con el análisis numérico; lo cual, representa que los parámetros óptimos para la reducción del desplazamiento son:

$$\mu = 0.20$$

$$r_f = 0.91$$

$$r_\xi = 0.16$$

5.3.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS

De nueva cuenta se realiza el análisis numérico para el sistema de 2GDL para obtener la respuesta dinámica de éste, ante acelerogramas sintéticos.

En la Figura 5.7, se presentan las aceleraciones máximas del sistema de dos grados de libertad.

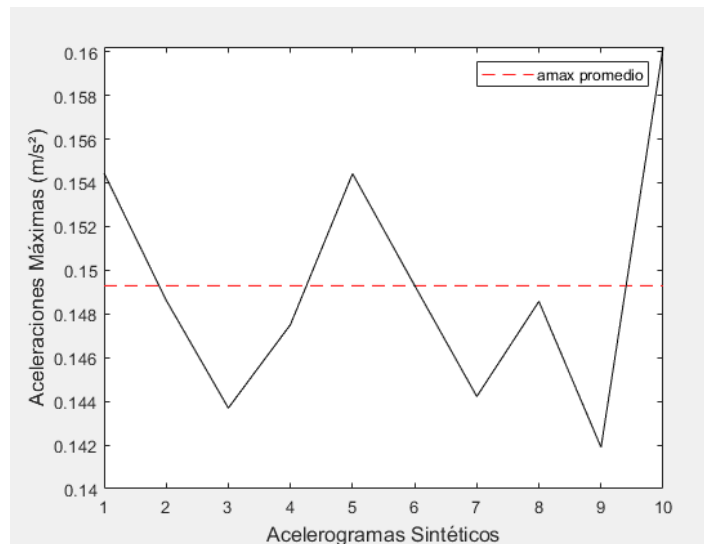


Figura 5.7. Aceleraciones Máximas para Sistema de 2GDL

Se observa que las respuestas presentan valores desde los 0.143 m/s^2 hasta los 0.160 m/s^2 , teniendo una aceleración máxima promedio de 0.149 m/s^2 .

Este resultado demuestra que la respuesta dinámica del sistema por aceleraciones presenta una disminución del 17.07% de acuerdo con el análisis numérico; por lo tanto, los parámetros óptimos para la disminución de aceleraciones son:

$$\mu = 0.20$$

$$r_f = 1.10$$

$$r_\xi = 0.01$$

En la Figura 5.8, se aprecia la gráfica de desplazamientos máximos del sistema de 2GDL.

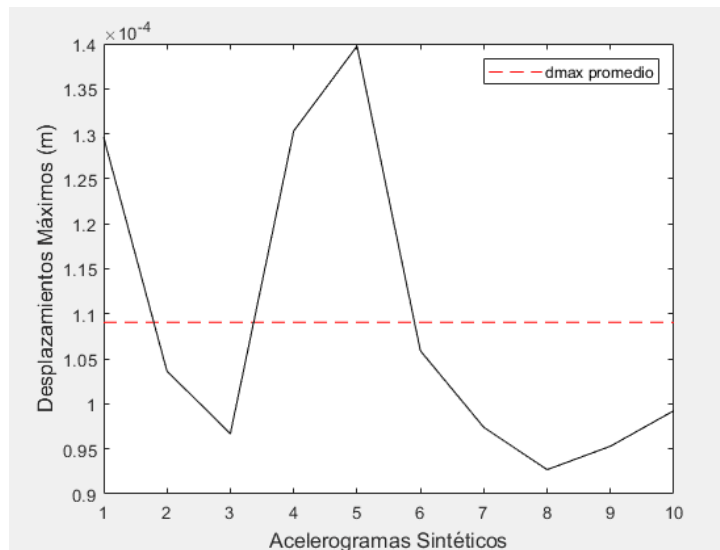


Figura 5.8. Desplazamientos Máximos para Sistema de 2GDL

Se observa que las respuestas presentan valores desde 9.5×10^{-4} m hasta 1.4×10^{-4} m, teniendo un desplazamiento máximo promedio de 1.0×10^{-4} m.

Lo anterior muestra que la respuesta dinámica del sistema ante desplazamientos presenta una disminución del 62.40% de acuerdo con el análisis numérico; por lo que, los parámetros óptimos para obtener esa reducción son:

$$\mu = 0.20$$

$$r_f = 0.90$$

$$r_\xi = 0.20$$

5.4 ANÁLISIS EN PROGRAMA COMERCIAL

Con ayuda del programa comercial ETABS [1], se realiza el análisis de la estructura para obtener su respuesta dinámica ante efectos de fuerzas de viento y sismo; para el cual, se utilizan las 10 simulaciones de fuerzas de viento turbulento, así como los 10 acelerogramas sintéticos mencionados en el Capítulo 4.

5.4.1 APLICACIÓN DE SEÑALES DE FUERZAS EN MODELO MATEMÁTICO

Se debe generar un patrón de carga para cada nodo en el que se aplicarán las fuerzas actuantes de viento turbulento. En la Figura 5.9 se muestra el apartado “Define Load Patterns” del programa comercial ETABS [1].

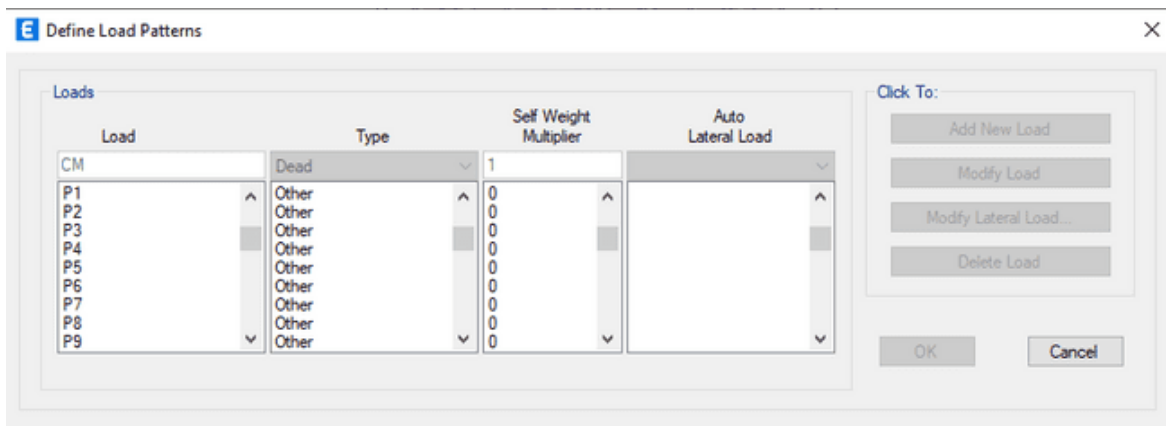


Figura 5.9. Apartado “Define Load Patterns” de programa comercial ETABS [1]

Una vez se generan los 48 patrones de carga, se aplica una carga puntual unitaria en cada nodo de la estructura; es decir, a cada uno de los patrones de carga generados le corresponde una carga puntual aplicada.

En la Figura 5.10 se muestra la carga aplicada en el nodo 48, la cual corresponde al patrón de carga “P48”.

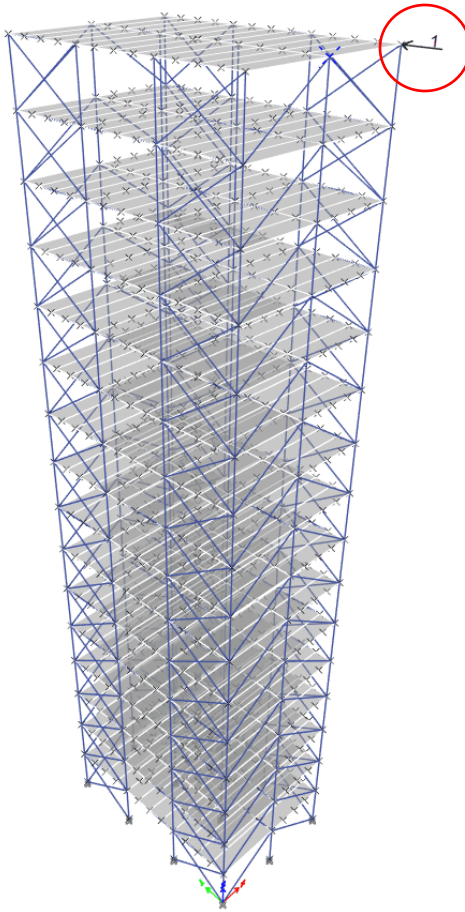


Figura 5.10. Aplicación de la carga unitaria "P48"

En el apartado "Define Time History Functions" se agregan las fuerzas de viento actuantes, como se muestra en la Figura 5.11

:

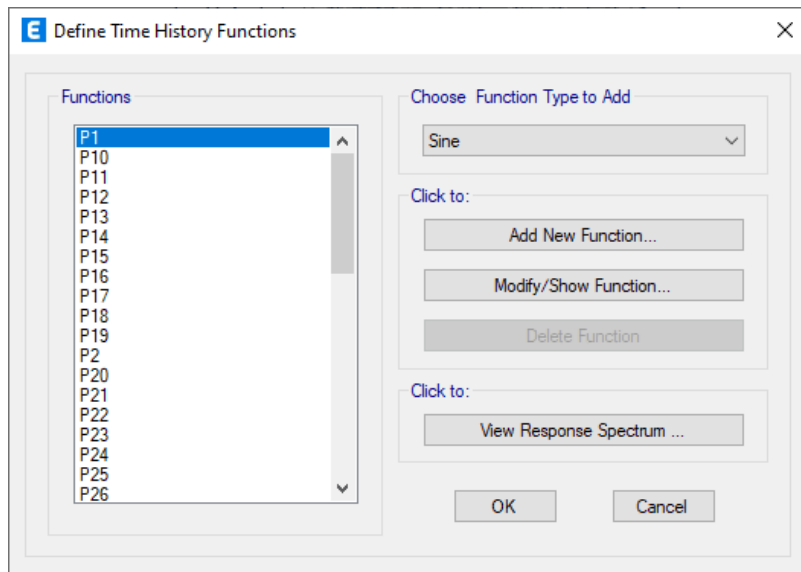


Figura 5.11. Apartado “Define Time History Functions” del programa comercial ETABS [1]

Se prosigue definiendo una condición de carga, en la cual, se engloban los 48 nodos donde se aplicarán las fuerzas de viento por medio del análisis tiempo historia. Se indican el tipo de análisis en la casilla “Load Case Type / Subtype”, el cual corresponde a un análisis lineal paso a paso en el tiempo, o bien, tiempo historia, como se muestra en la Figura 5.12:

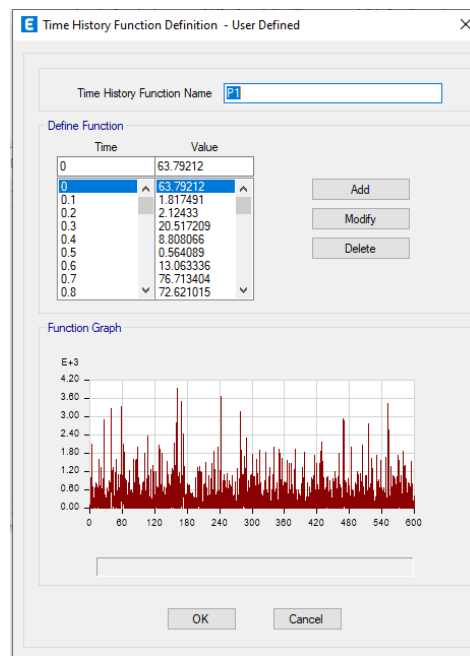


Figura 5.12. Fuerzas actuantes en el nodo 1

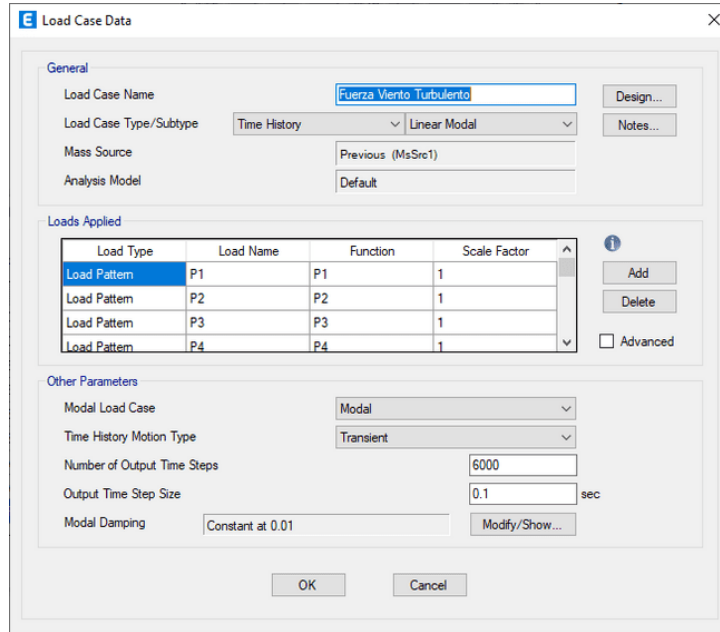


Figura 5.13. Apartado “Load Case Data” del programa comercial ETABS [1]

Así mismo, se indica el número de pasos a realizar y el intervalo de éstos; los cuales son 6000 pasos debido a que cada señal de fuerzas actuantes contiene 6000 puntos de fuerzas con un intervalo de 0.1 s (Figura 5.13).

5.4.2 APLICACIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA SINTÉTICOS EN MODELO MATEMÁTICO

La aplicación de los espectros de respuesta sintéticos en el modelo matemático tiene un procedimiento más sencillo que el anterior para la aplicación de las fuerzas de viento turbulento; sin embargo, el procedimiento es similar.

En el apartado “Define Time History Functions” se agregan los Acelerogramas Sintéticos, como se muestra en las Figuras 5.14 y 5.15:

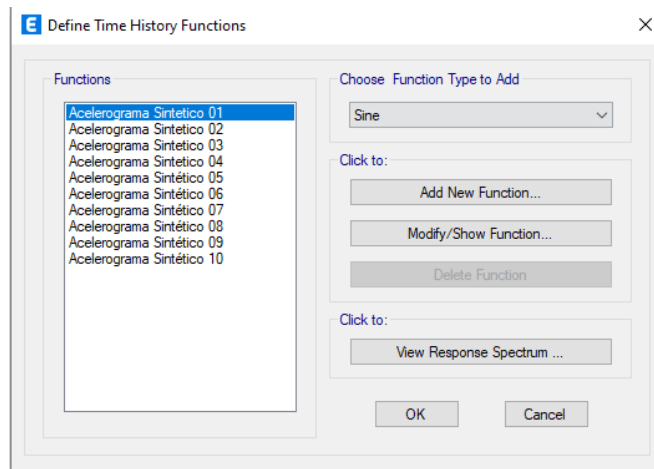


Figura 5.14. Apartado “Define Time History Functions” del programa comercial ETABS [1]

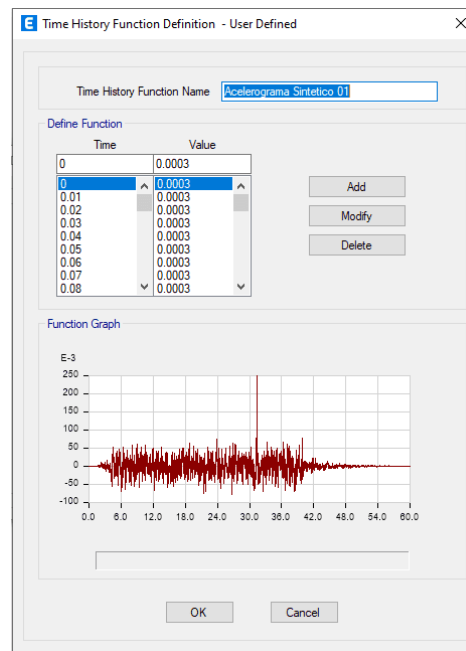


Figura 5.15. Acelerograma Sintético 1 en programa comercial ETABS [1]

Se prosigue definiendo una condición de carga para cada uno de los acelerogramas, así como, indicando el eje global en el que actúa, como se presenta en las Figuras 5.16 y 5.17.

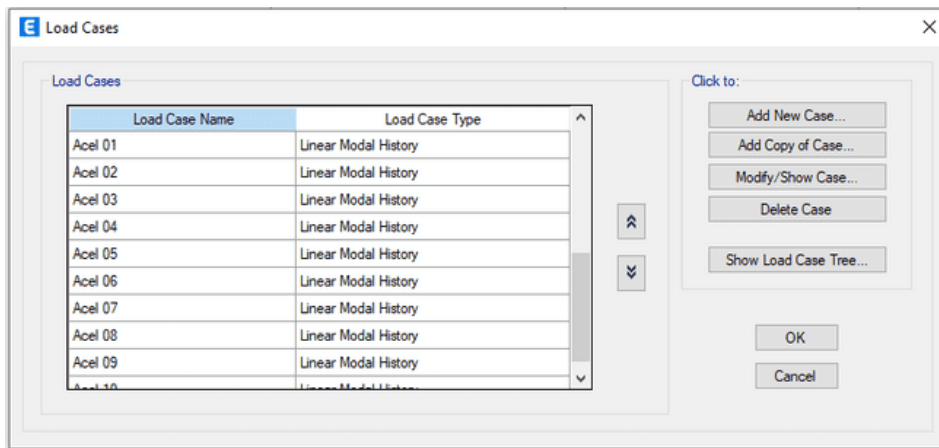


Figura 5.16. Apartado “Load Case” del programa comercial ETABS [1]

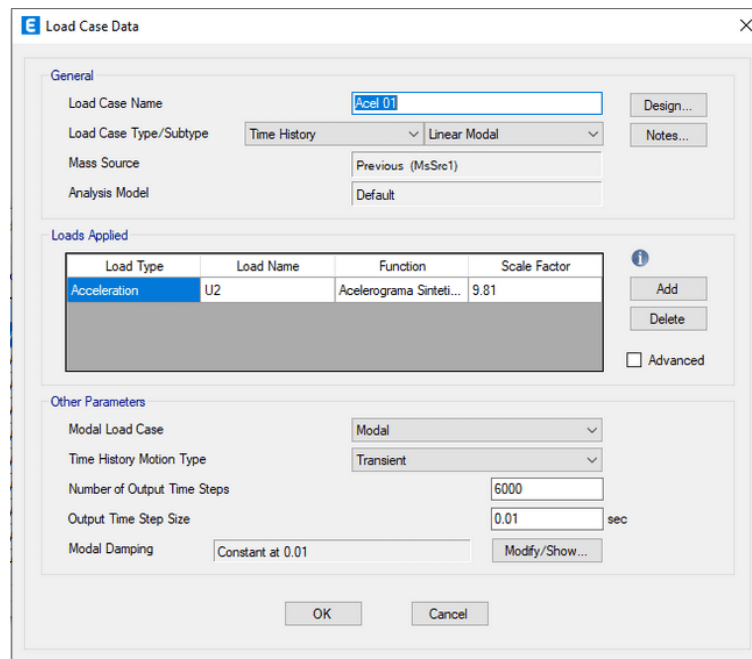


Figura 5.17. Apartado “Load Case Data” del programa comercial ETABS [1]

Debido a que el análisis se realiza de acuerdo con el primer modo de traslación, el cual es en el eje “Y”, se indica como dirección actuante el eje global “U2”.

5.4.3 MODELADO DE AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA

Se empleó el objeto “Link” para modelar el AMS en el modelo matemático. En el Capítulo 3 se obtuvieron los parámetros óptimos del análisis numérico para reducir la respuesta dinámica del sistema equivalente; por lo que, esos mismos parámetros se ingresan al modelo matemático para su respectivo análisis.

En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los parámetros óptimos del AMS obtenidos del análisis numérico.

Tabla 5.1. Parámetros óptimos del AMS

Análisis	Respuesta disminuida	Parámetros óptimos del AMS		
		μ	r_f	r_ξ
Fuerzas de viento turbulento	Aceleraciones	20%	94%	20%
	Desplazamientos	20%	91%	16%
Acelerogramas sintéticos	Aceleraciones	20%	110%	1%
	Desplazamientos	20%	90%	20%

En la Figura 5.18, se muestra el apartado “Link Property Data” del programa comercial ETABS [1].

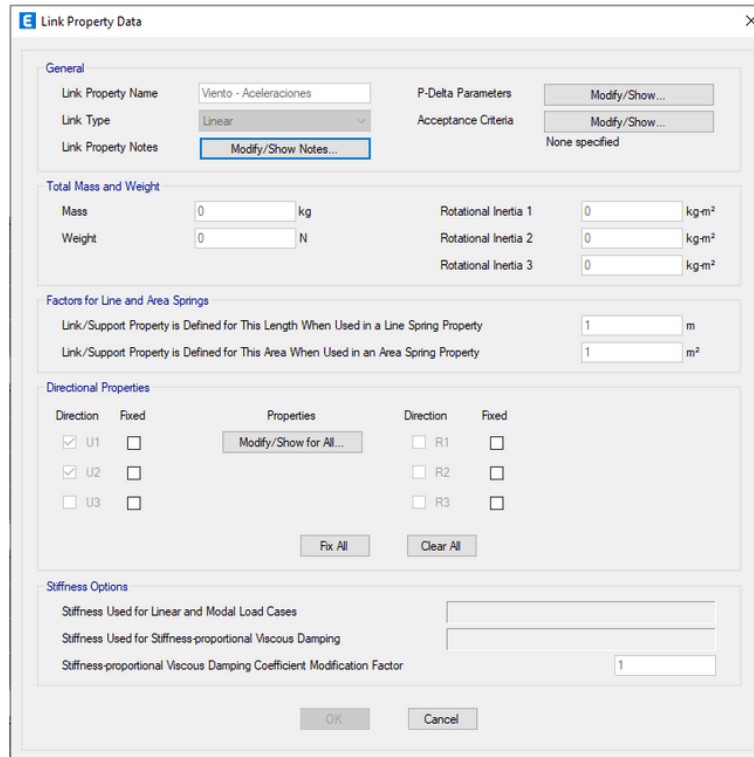


Figura 5.18. Apartado “Link Property Data” del programa comercial ETABS [1]

En dicho apartado se permite modificar las propiedades direccionales del Link; así como, la rigidez y amortiguamiento que se tiene en los ejes locales del elemento. En la Figura 5.19 se muestra lo mencionado anteriormente.

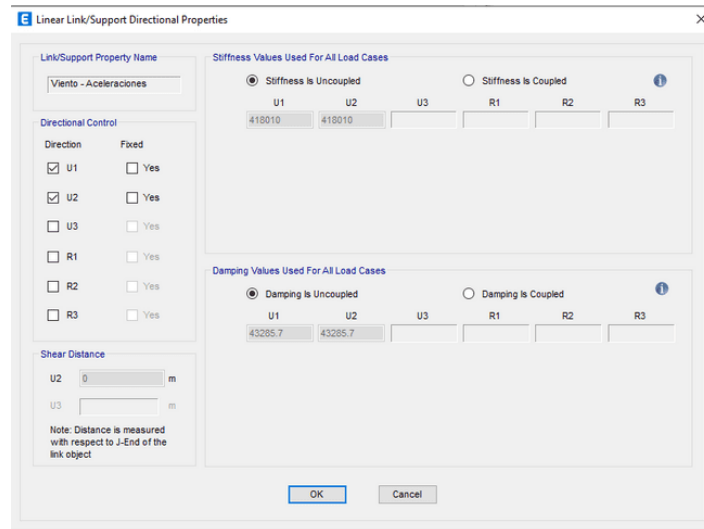


Figura 5.19. Apartado “Linear Link / Support Directional Properties” del programa comercial ETABS [1]

El procedimiento para añadir el elemento Link al modelo matemático, consiste en incluir en el último nivel de la estructura un elemento infinitamente rígido (al cual se le modifica su propiedad de masa y peso con valor de 0), en el cual se conecta el elemento Link para realizar la función del AMS.

Así mismo, debido a que el análisis por realizar se enfoca únicamente en la respuesta de la estructura en el eje “Y”, el extremo no conectado al elemento infinitamente rígido se le restringen los desplazamientos en los ejes “X” y “Z”.

Finalmente, el modelado de la masa sintonizada consiste en añadir en el nodo previamente restringido la masa adicional calculada. En la Figura 5.20 se muestra una captura del modelo matemático donde se aprecia el elemento Link modelado, así como, la masa adicional agregada.

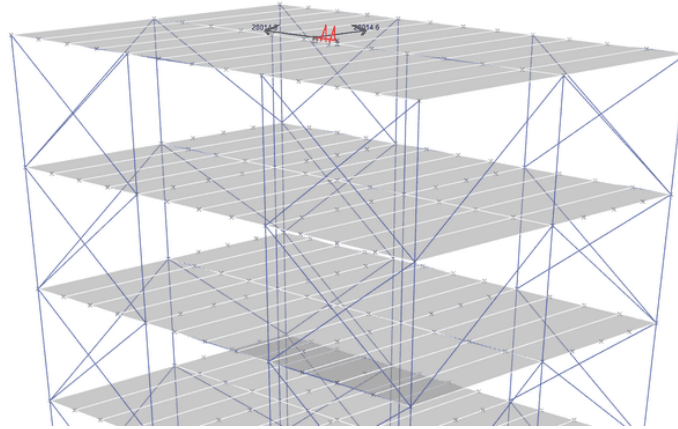


Figura 5.20. Modelo del AMS en el programa comercial ETABS [1]

5.4.4 ANÁLISIS EN PROGRAMA COMERCIAL

Debido a que se realiza la comparativa de la respuesta dinámica de la estructura aplicando las propiedades del AMS, es necesario generar 2 modelos matemáticos para cada simulación de viento analizada, así como, 2 modelos por cada espectro de respuesta sintético obtenido.

Por lo tanto, el análisis contiene resultados de 20 modelos matemáticos ante fuerzas de viento turbulento y fuerzas de sismo, respectivamente.

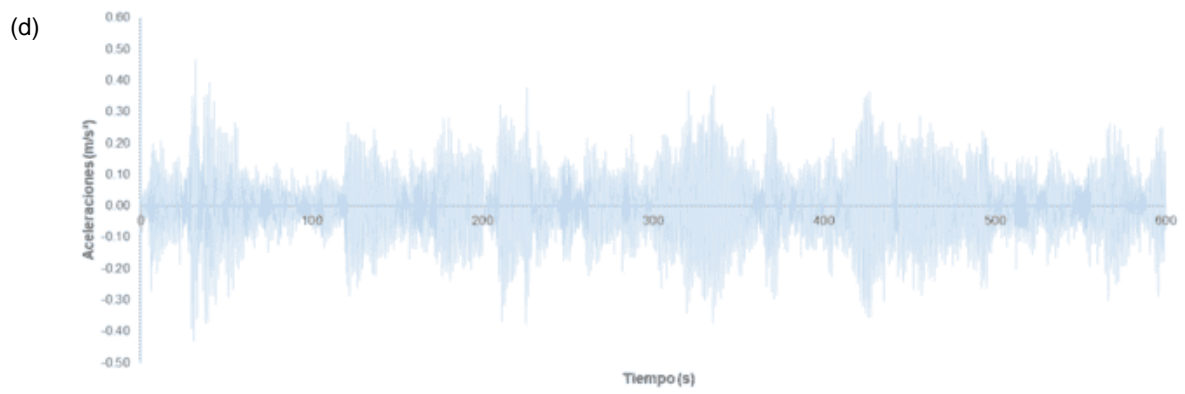
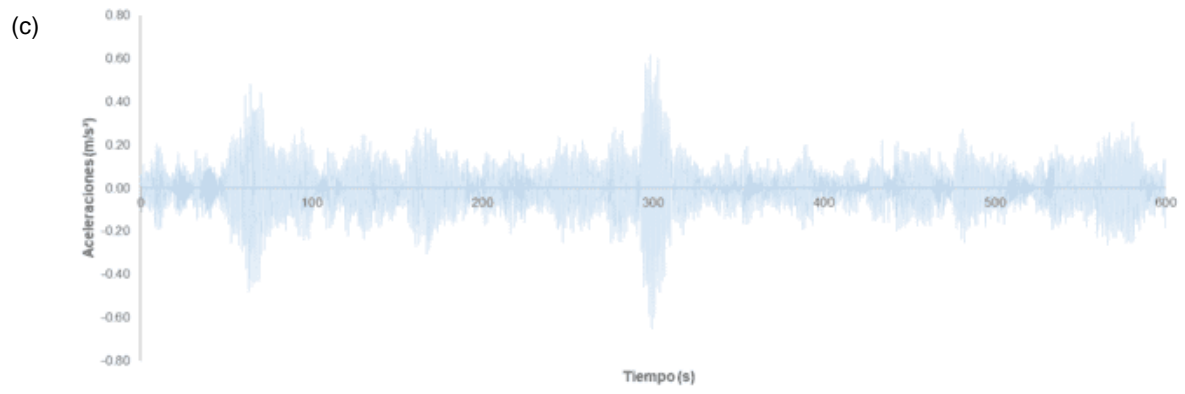
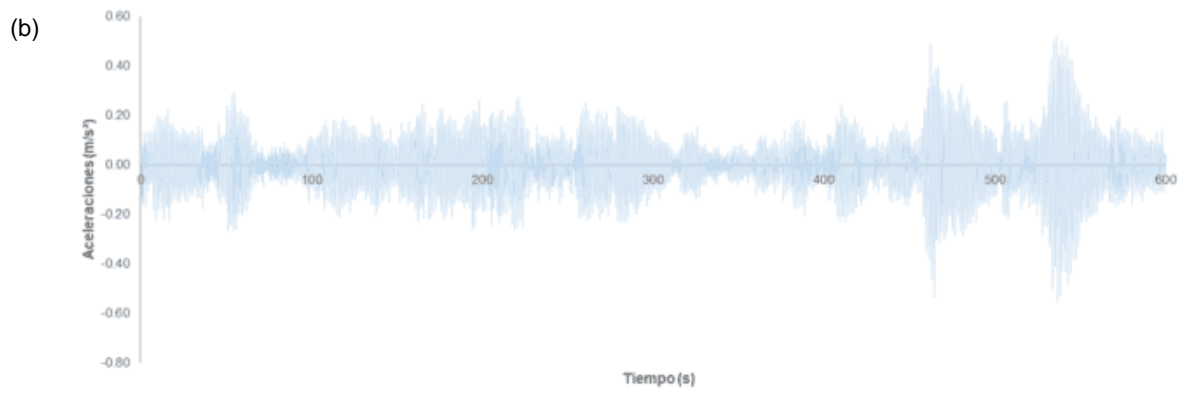
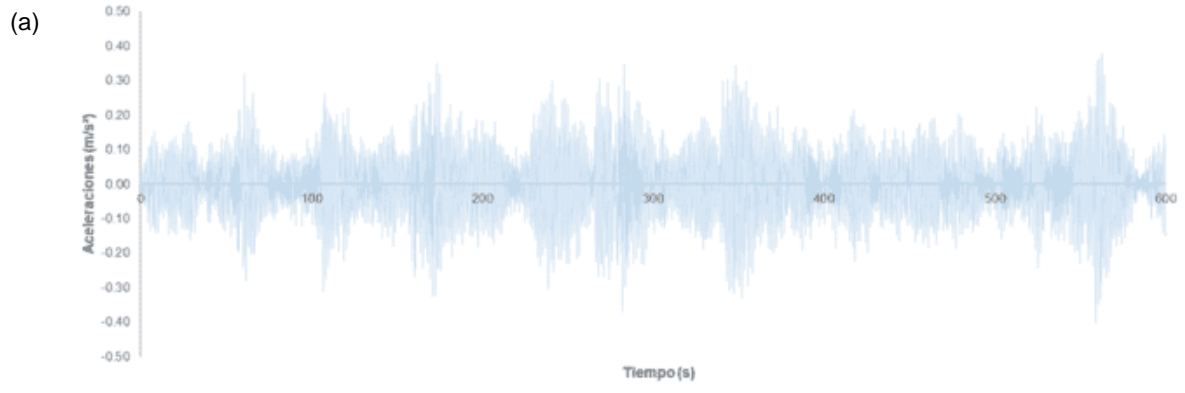
5.4.4.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS SIN AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA

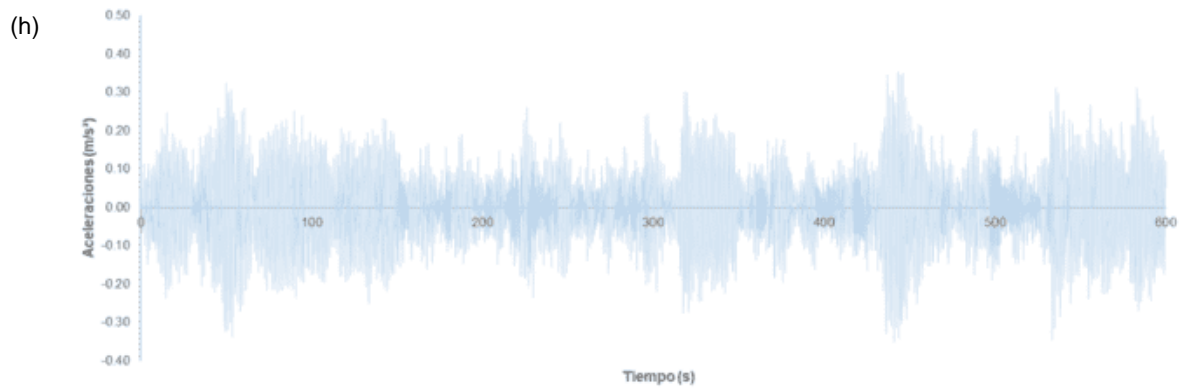
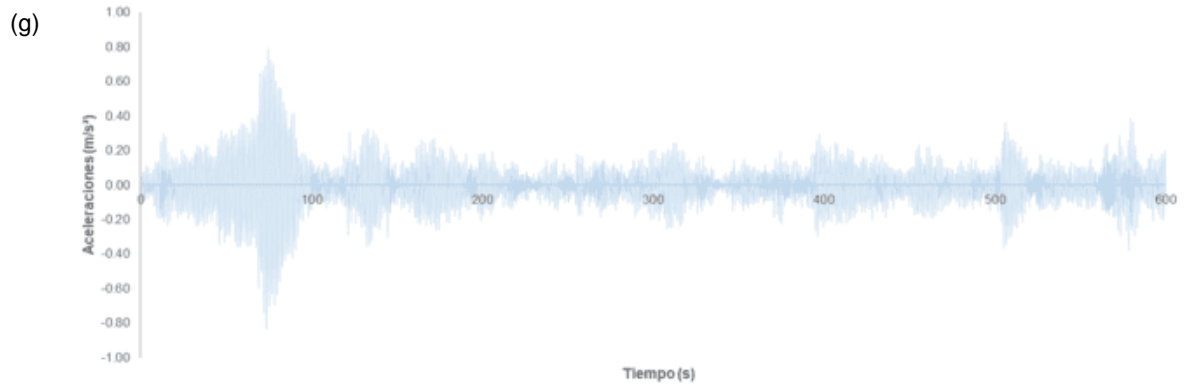
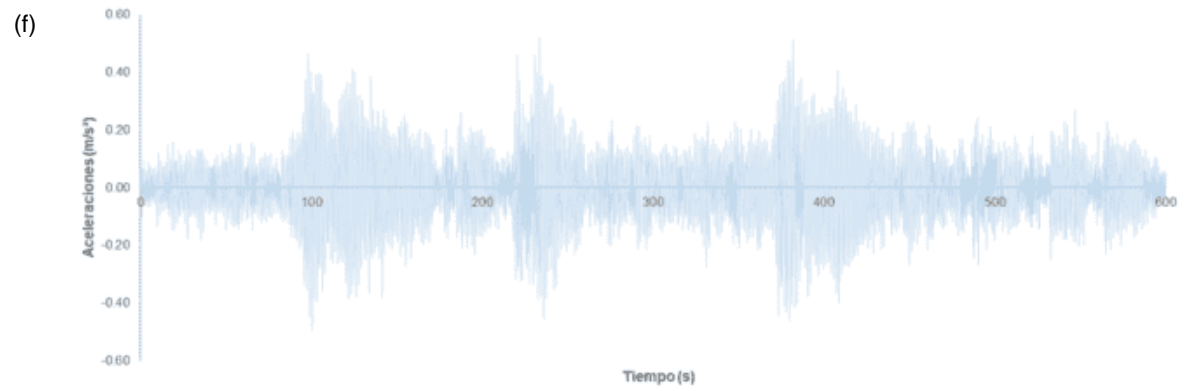
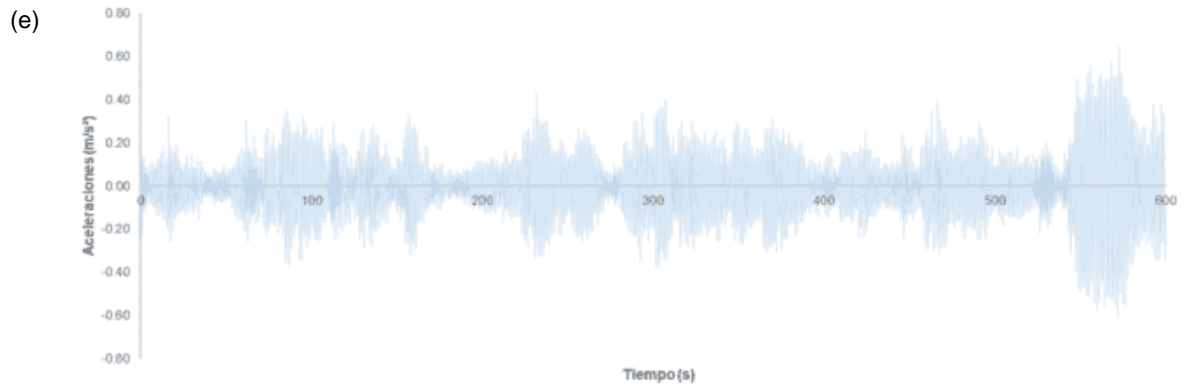
Se realiza el análisis correspondiente en el modelo matemático sin considerar las propiedades del AMS ante los efectos de las fuerzas de viento y sismo, a continuación, se muestran las respuestas dinámicas obtenidas.

5.4.4.1.1 FUERZAS DE VIENTO TURBULENTO

Para cada simulación se obtiene la respuesta dinámica del último nivel para posteriormente realizar la comparativa con los resultados del análisis del modelo matemático considerando los efectos del AMS.

Las Figuras 5.21 y 5.22 muestran las respuestas dinámicas para cada simulación de fuerzas de viento turbulento.





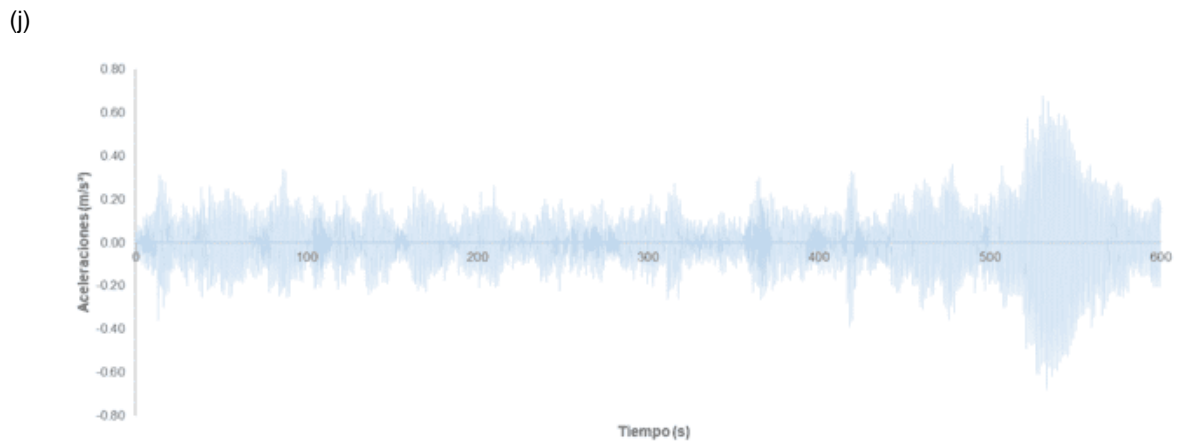
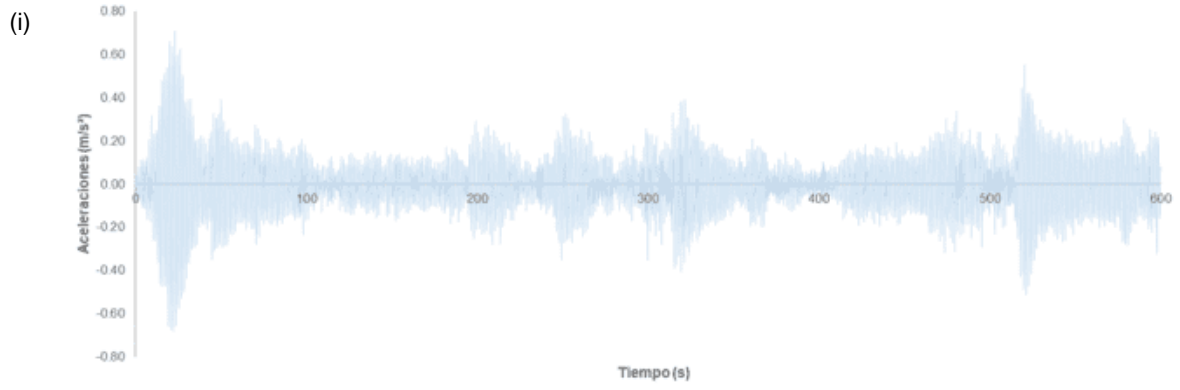
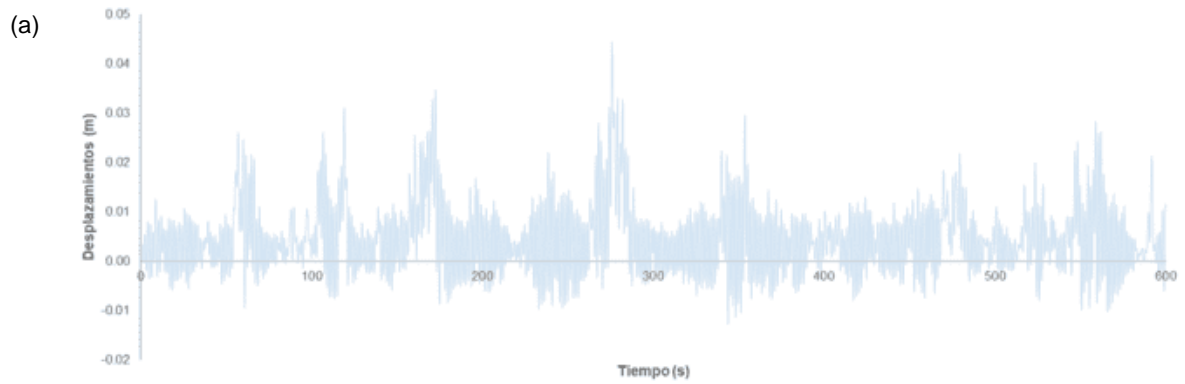
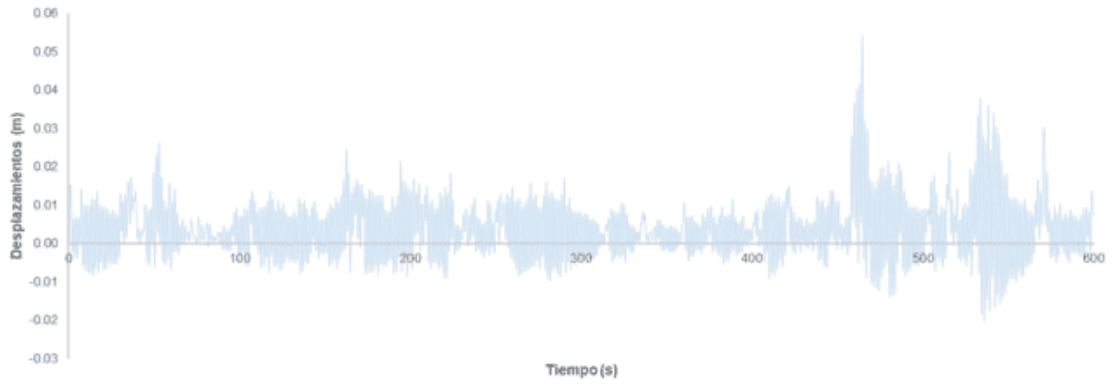


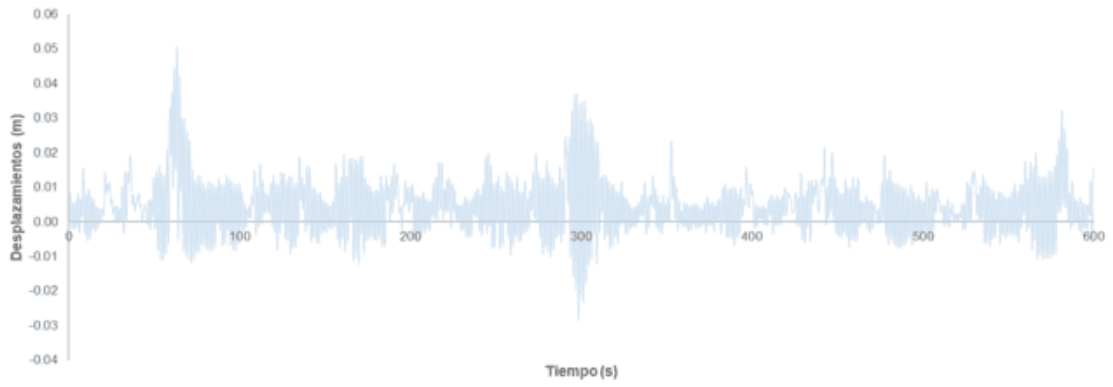
Figura 5.21. Respuesta dinámica de aceleraciones para simulación: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10



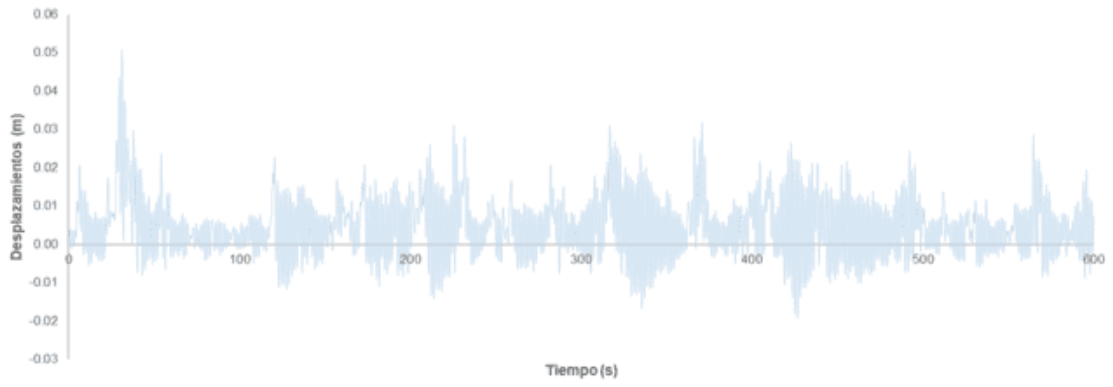
(b)



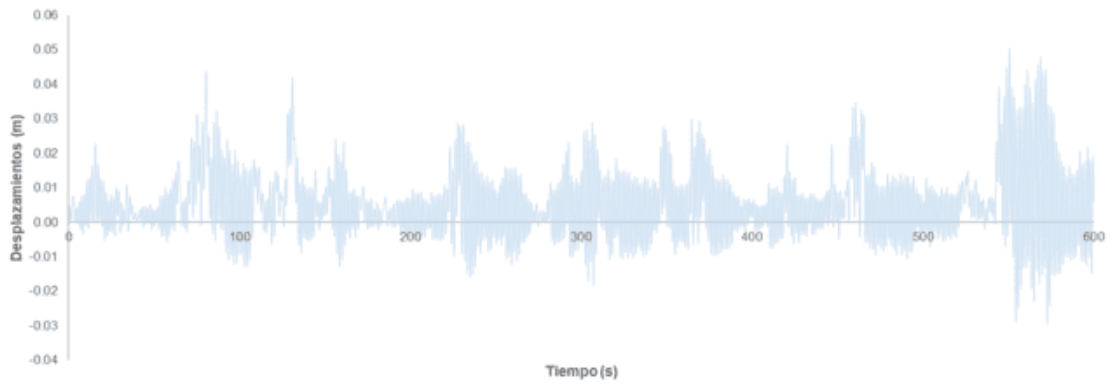
(c)

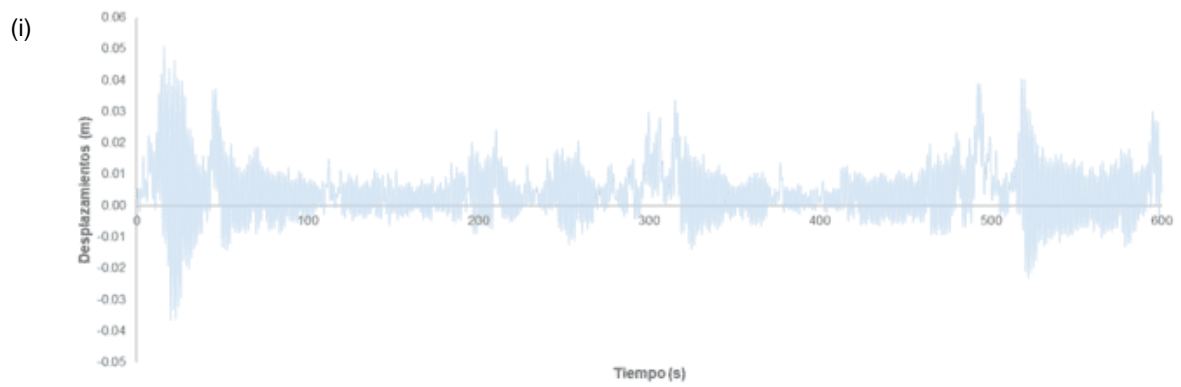
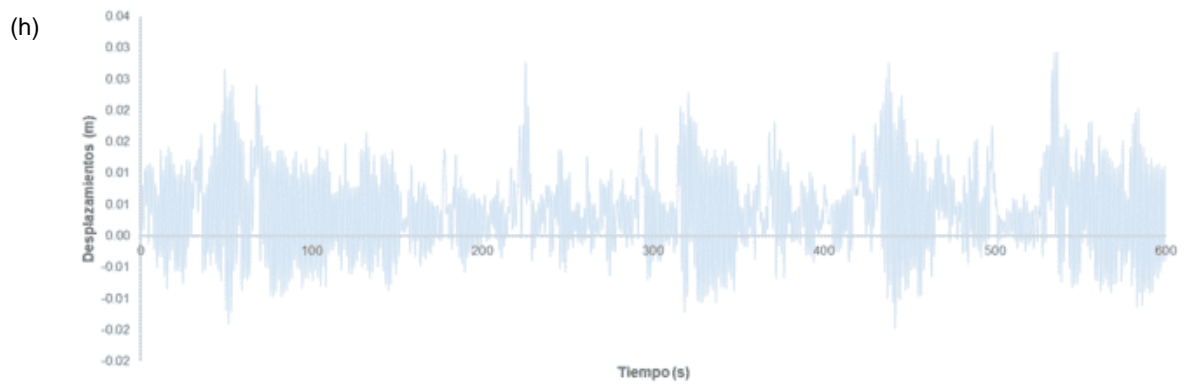
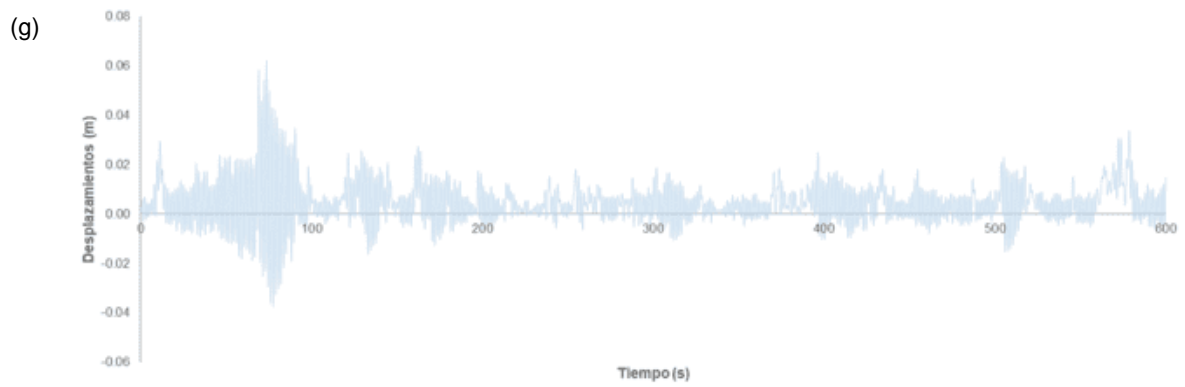
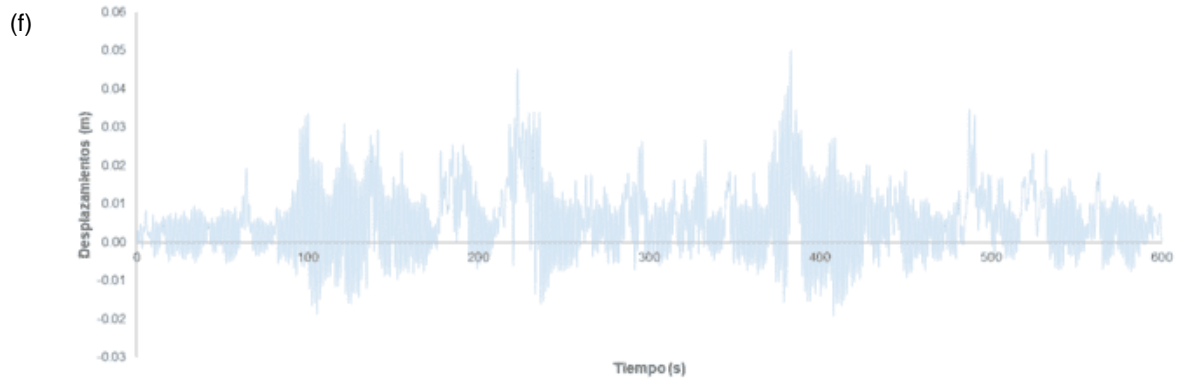


(d)



(e)





(i)

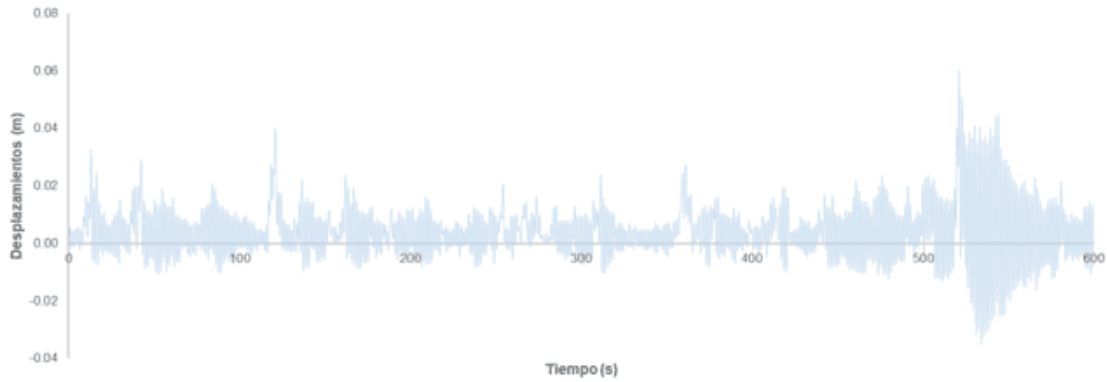


Figura 5.22. Respuesta dinámica de desplazamientos para simulación: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10

Realizando el análisis para cada una de las 10 simulaciones de fuerzas de viento turbulento se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 5.2.

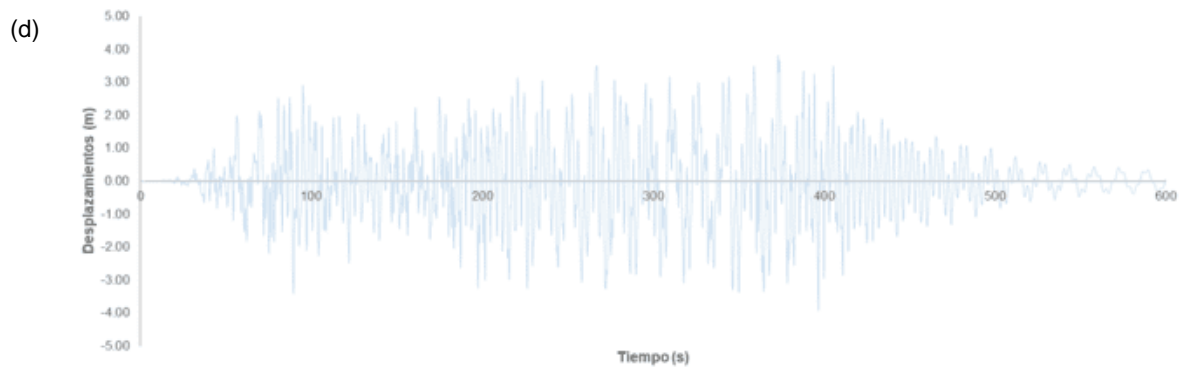
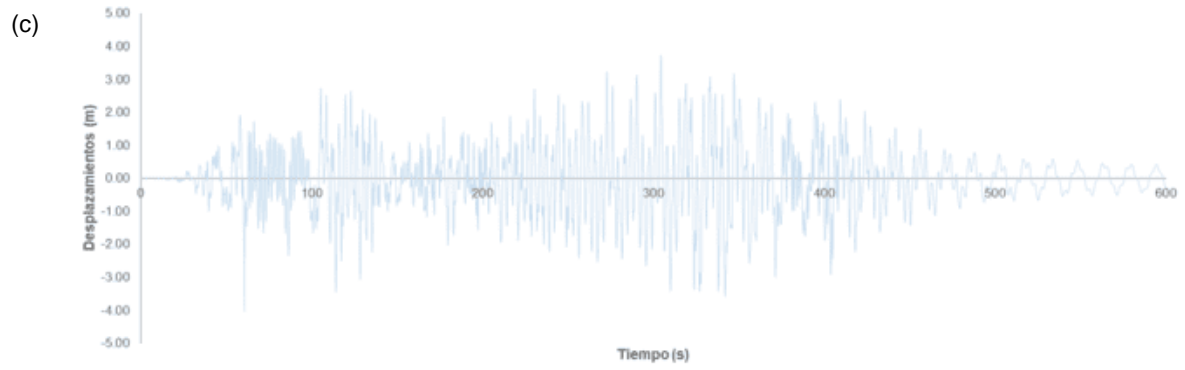
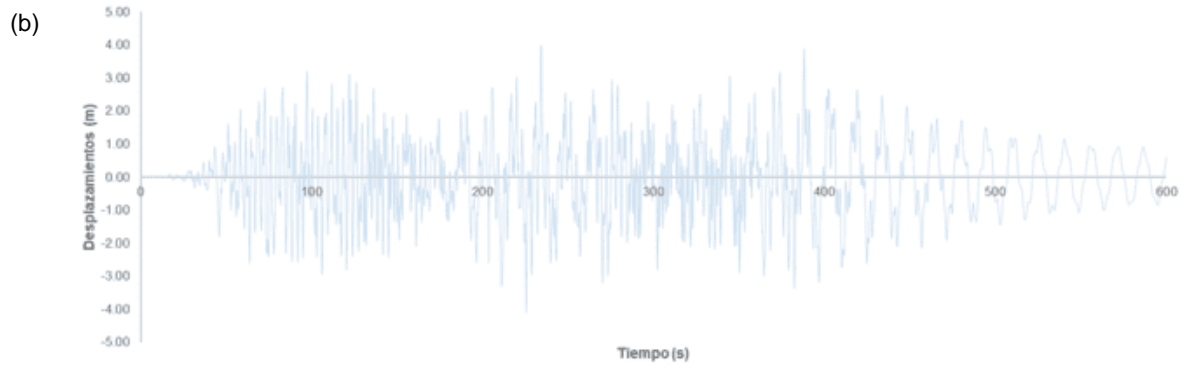
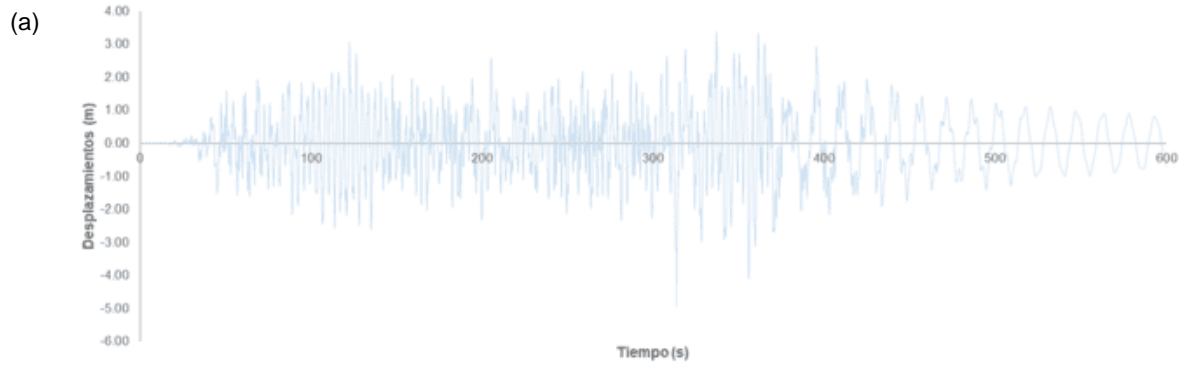
Tabla 5.2. Respuesta dinámica para Simulaciones de Fuerzas de viento turbulento

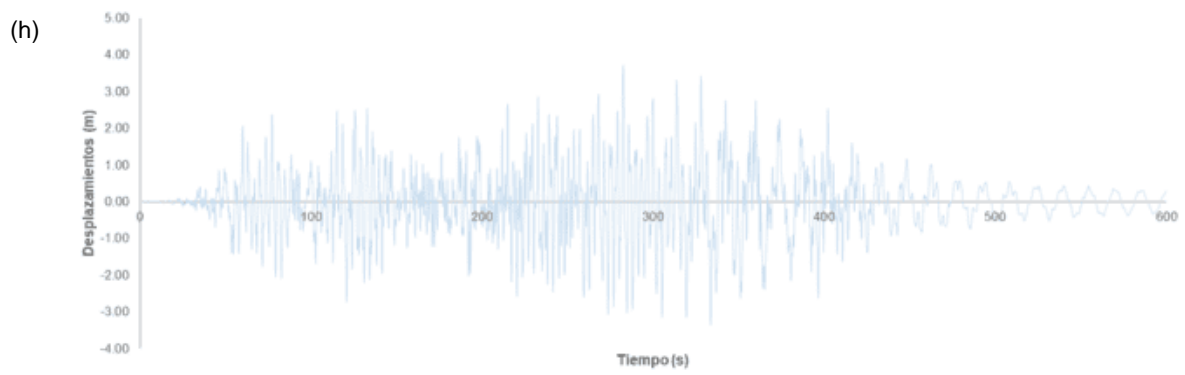
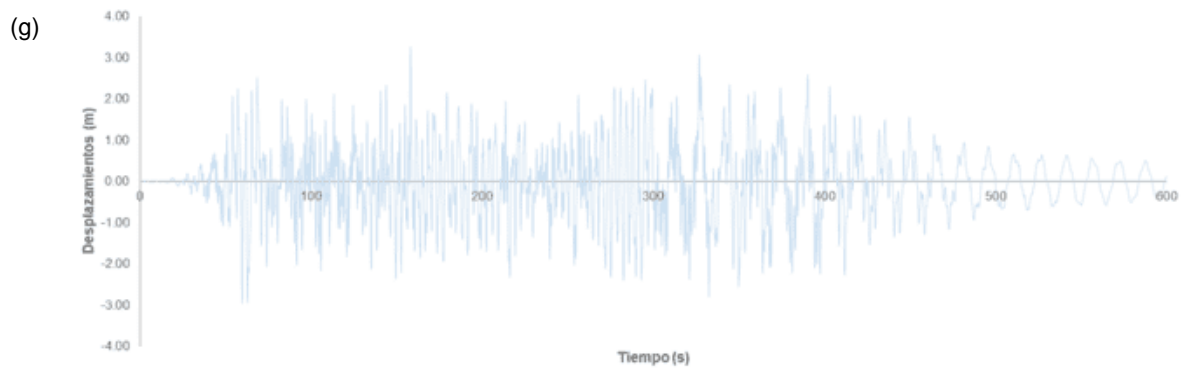
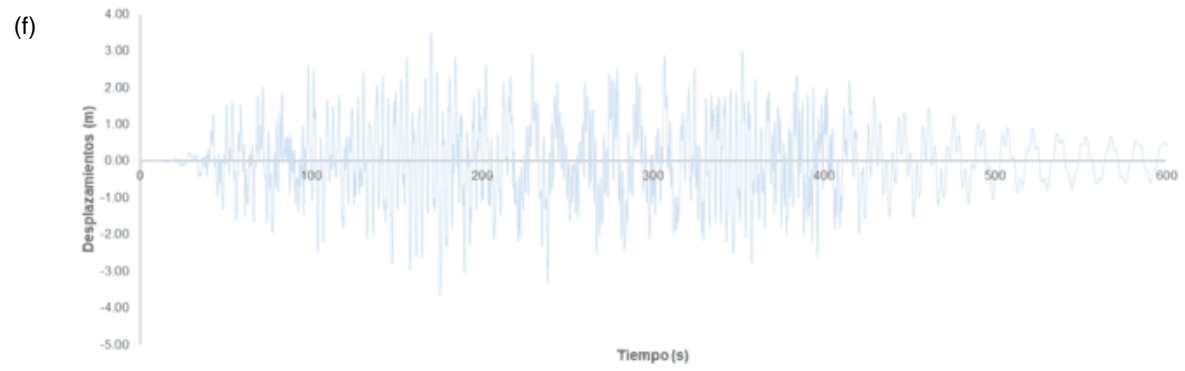
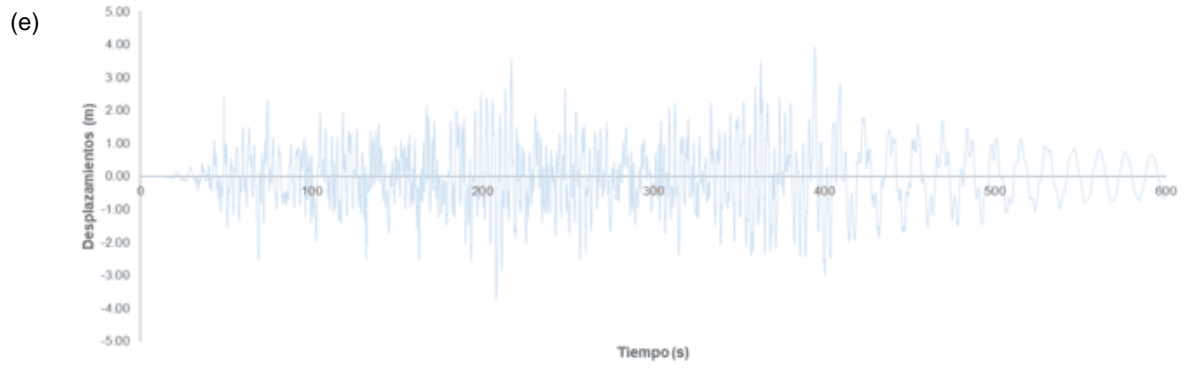
Simulaciones	Aceleración Máxima (m/s ²)	Desplazamiento Máximo (m)
Simulación 1	0.403	0.044
Simulación 2	0.557	0.054
Simulación 3	0.645	0.051
Simulación 4	0.467	0.051
Simulación 5	0.645	0.050
Simulación 6	0.520	0.050
Simulación 7	0.827	0.062
Simulación 8	0.369	0.030
Simulación 9	0.709	0.051
Simulación 10	0.678	0.060
Promedio	0.582	0.050

5.4.4.1.2 ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS

Para cada acelerograma sintético inducido se obtiene la respuesta dinámica del último nivel para posteriormente realizar la comparativa con los resultados del análisis del modelo matemático considerando los efectos del AMS.

Las Figuras 5.23 y 5.24 muestran las respuestas dinámicas para cada acelerograma sintético.





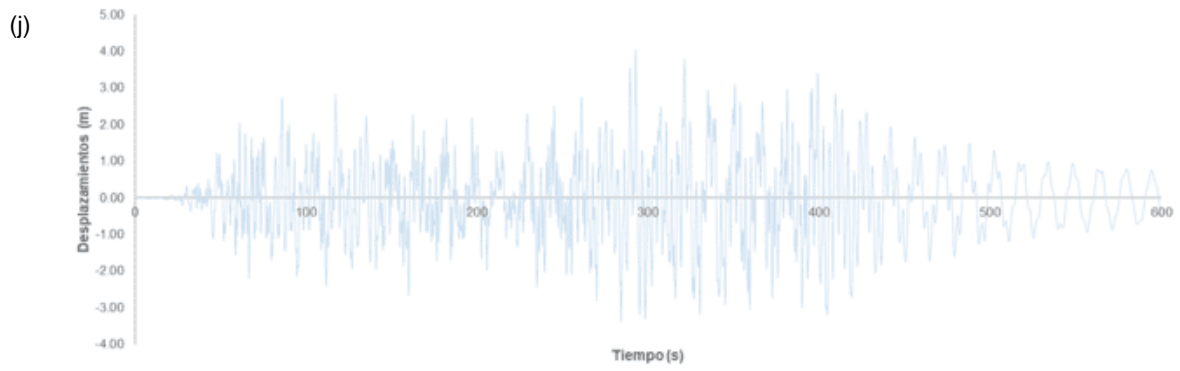
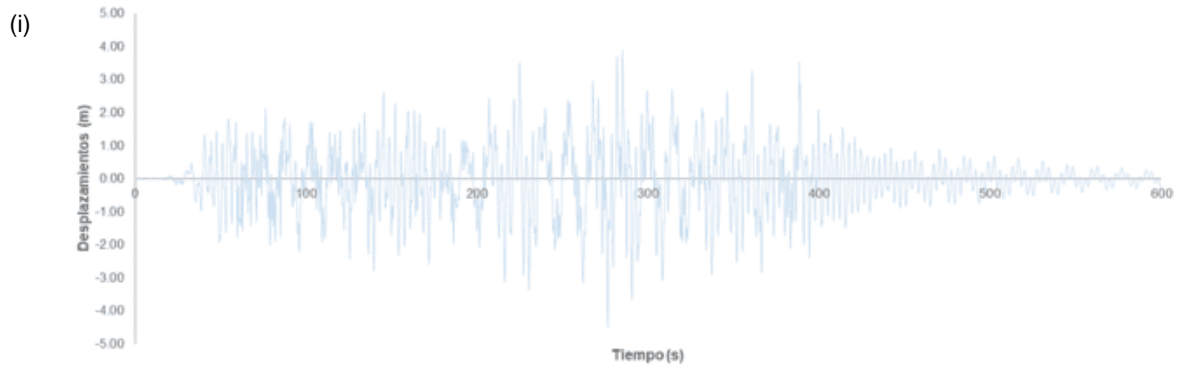
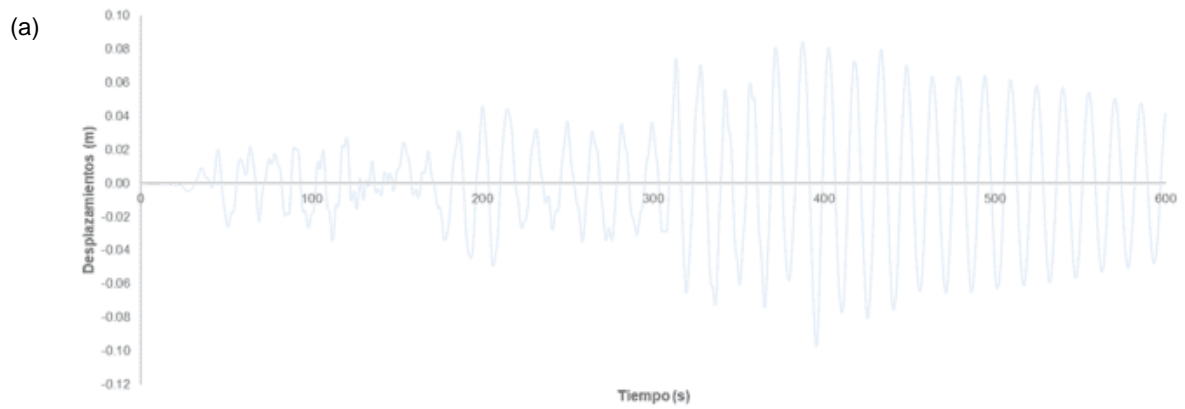
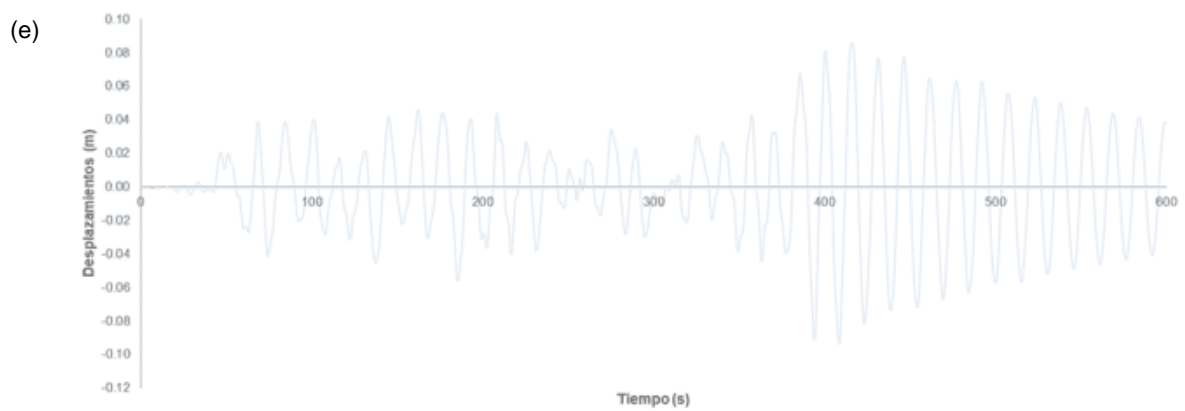
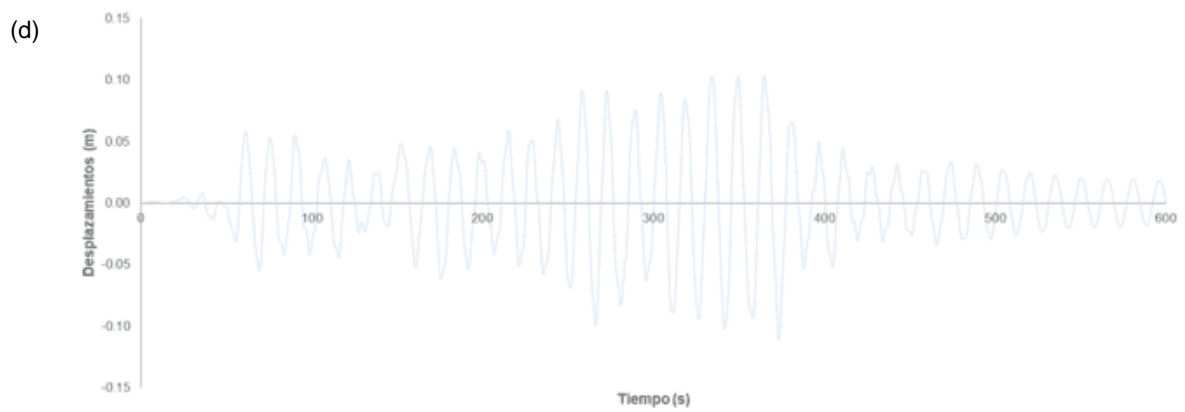
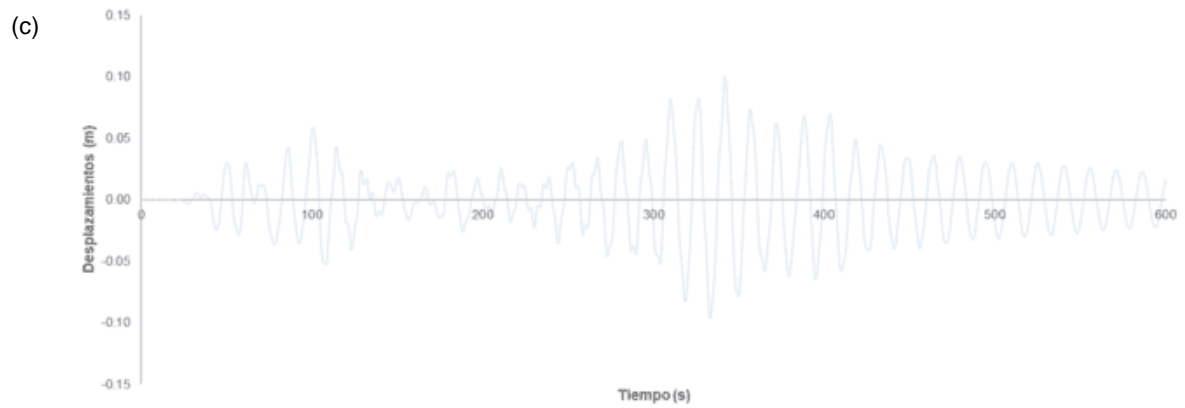
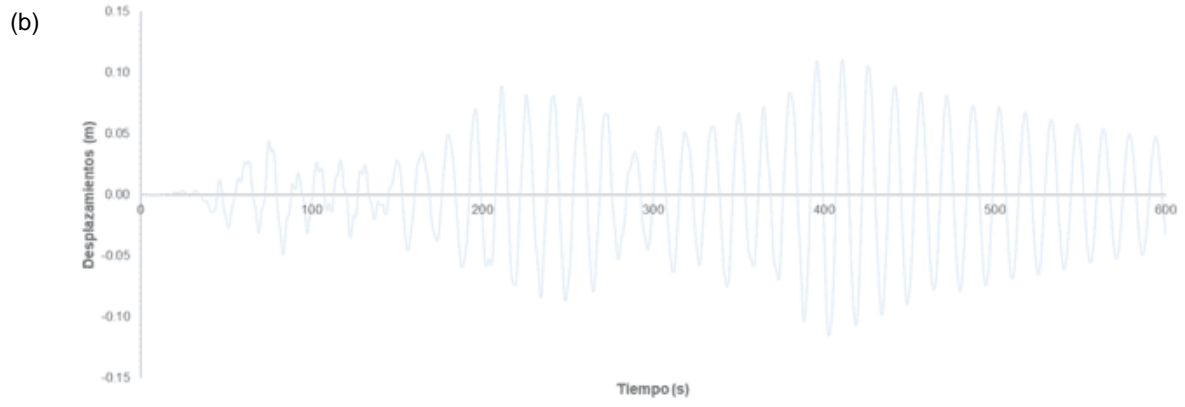
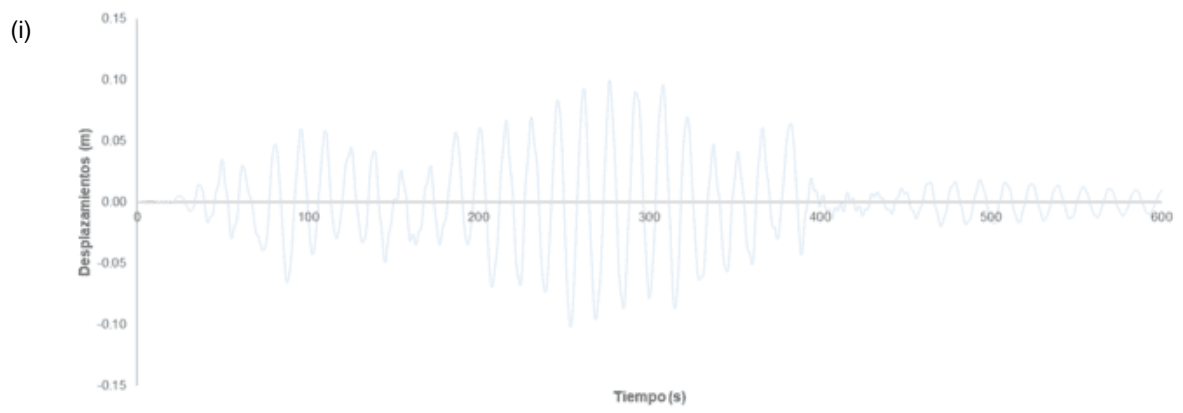
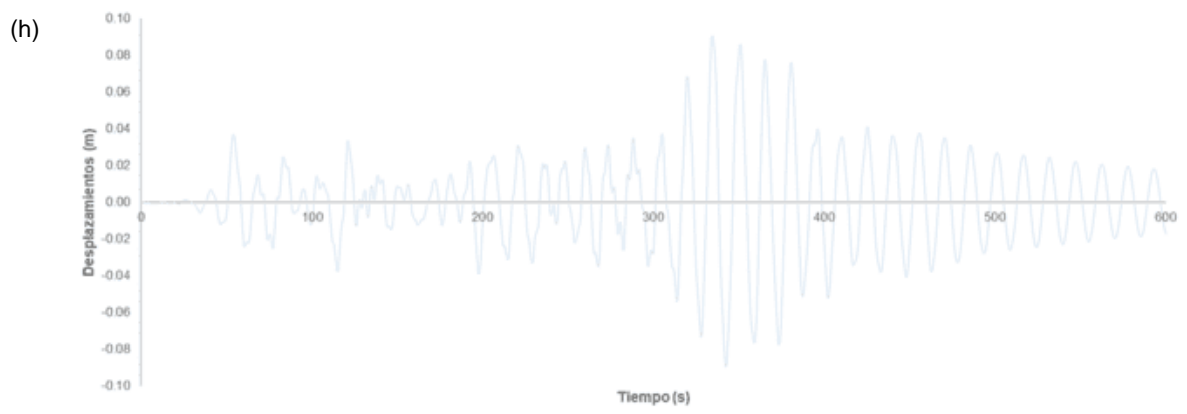
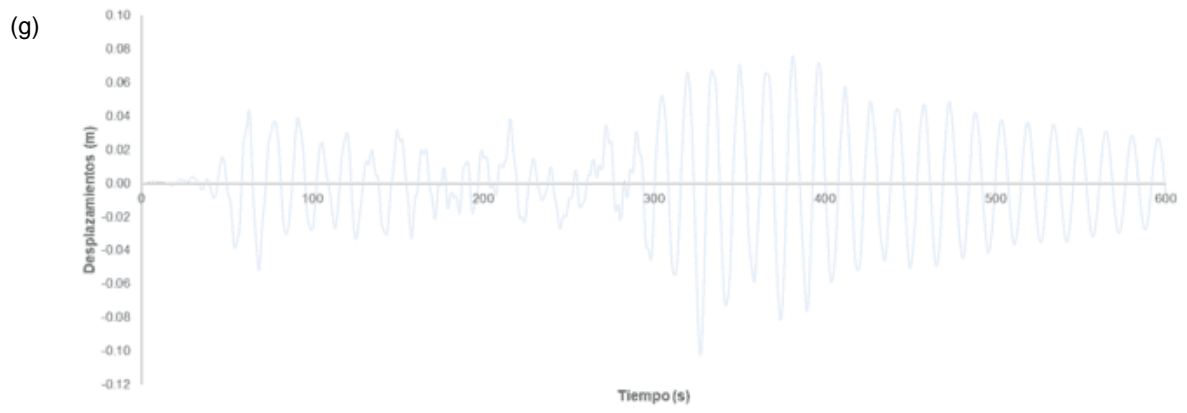
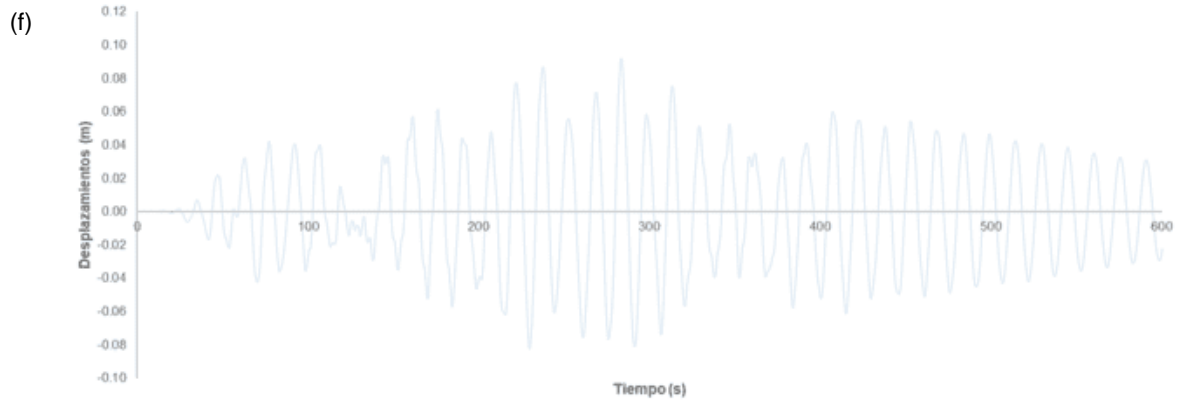


Figura 5.23. Respuesta dinámica de aceleraciones para acelerograma sintético: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10







(j)

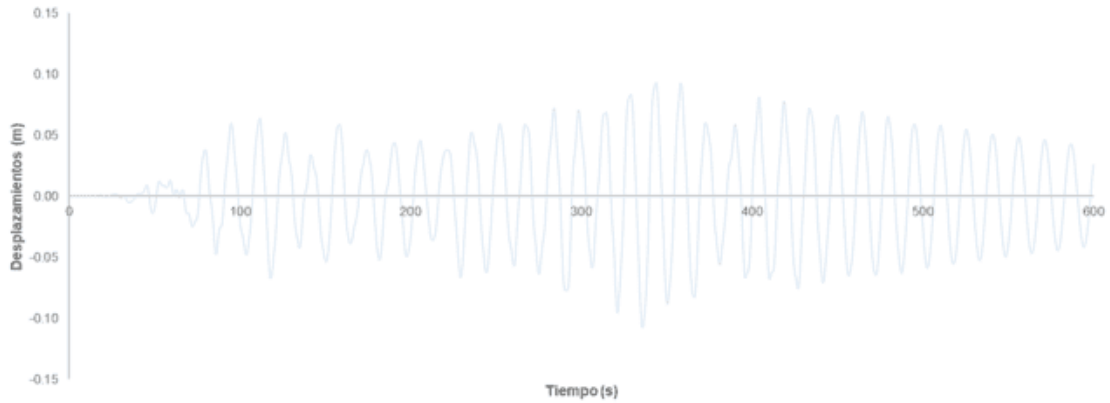


Figura 5.24. Respuesta dinámica de desplazamientos para acelerograma sintético: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10

Realizando el análisis para cada uno de los 10 acelerogramas sintéticos se obtienen las respuestas dinámicas máximas mostradas en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Respuesta dinámica para Acelerogramas Sintéticos

Acelerogramas Sintéticos	Aceleración Máxima (m/s ²)	Desplazamiento Máximo (m)
Acelerograma Sintético 1	3.940	0.096
Acelerograma Sintético 2	3.930	0.115
Acelerograma Sintético 3	3.349	0.100
Acelerograma Sintético 4	3.744	0.111
Acelerograma Sintético 5	3.712	0.093
Acelerograma Sintético 6	3.395	0.092
Acelerograma Sintético 7	3.126	0.102
Acelerograma Sintético 8	3.489	0.090
Acelerograma Sintético 9	4.336	0.102
Acelerograma Sintético 10	3.868	0.108
Promedio	3.689	0.101

5.4.4.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON AMORTIGUADOR DE MASA SINTONIZADA

Conociendo las propiedades modales de la estructura (Tabla 3.4), y los parámetros óptimos obtenidos del análisis numérico (Tabla 5.1), se obtienen las propiedades que se le asignan al elemento Link en el modelo matemático para representar el comportamiento del AMS en el análisis.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos por medio del análisis en el modelo matemático.

5.4.4.2.1 FUERZAS DE VIENTO TURBULENTO

Las propiedades que se le asignan al elemento Link para el análisis de la estructura ante fuerzas de viento turbulento se obtienen haciendo uso de las ecuaciones (3.6), (3.7) y (3.8); realizando los respectivos despejes se calculan las propiedades mencionadas.

Las propiedades para la reducción de las aceleraciones obtenidos del análisis numérico son:

$$m = 28.00 \text{ t}$$

$$k = 417.83 \text{ kN/m}$$

$$c = 43.27 \text{ kN} - \text{s/m}$$

Las propiedades para la reducción de los desplazamientos obtenidos del análisis numérico son:

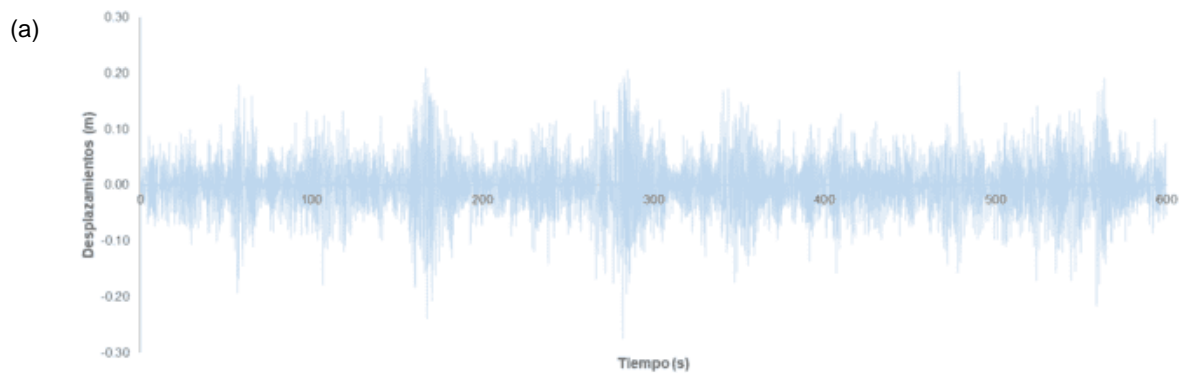
$$m = 28.00 \text{ t}$$

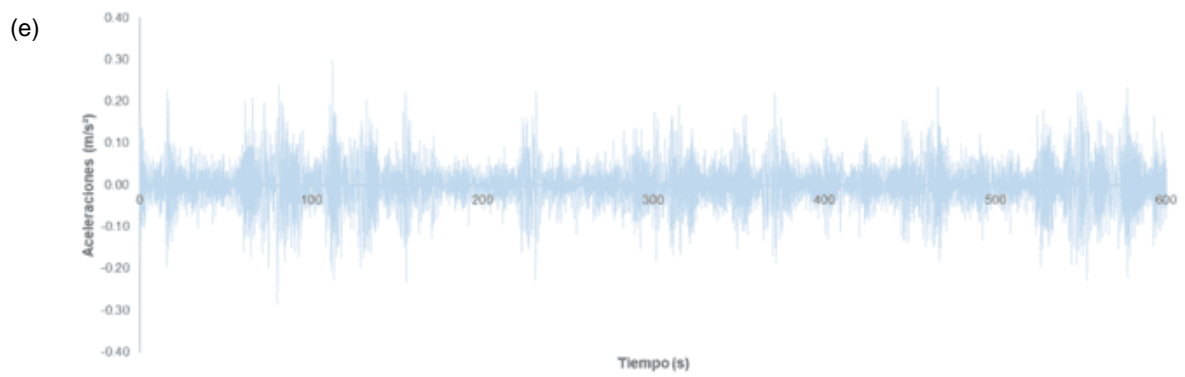
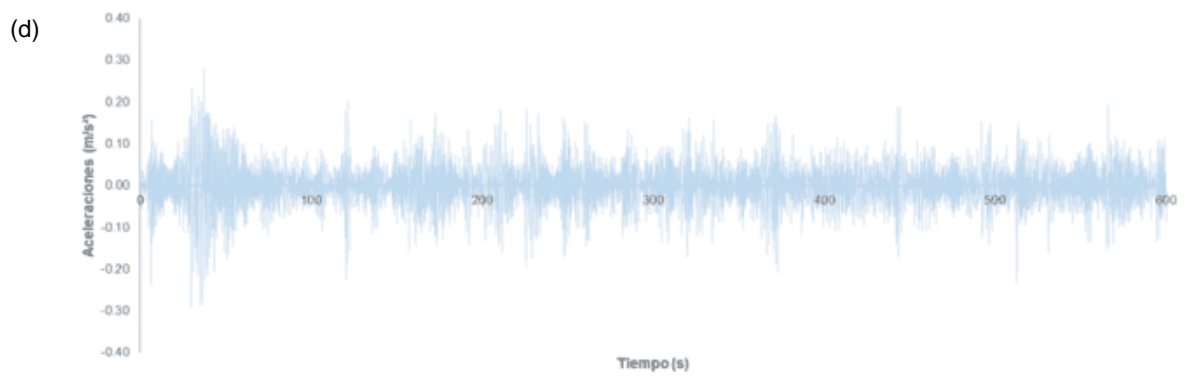
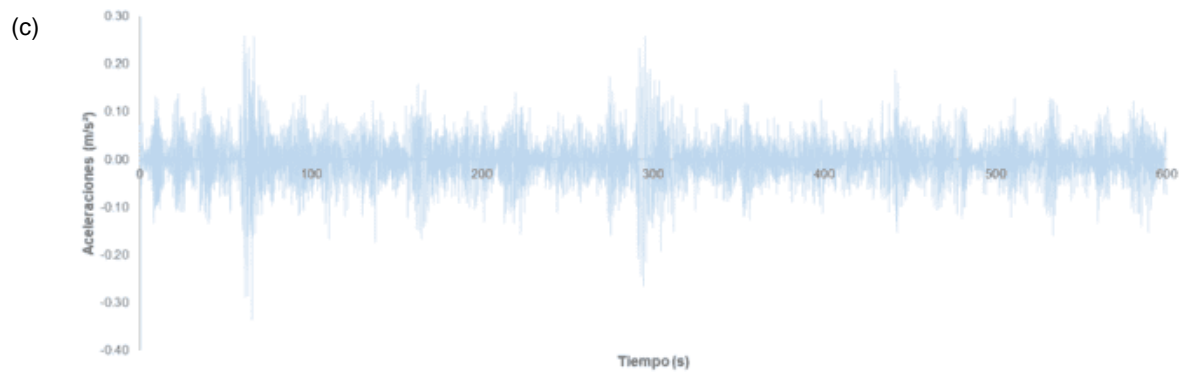
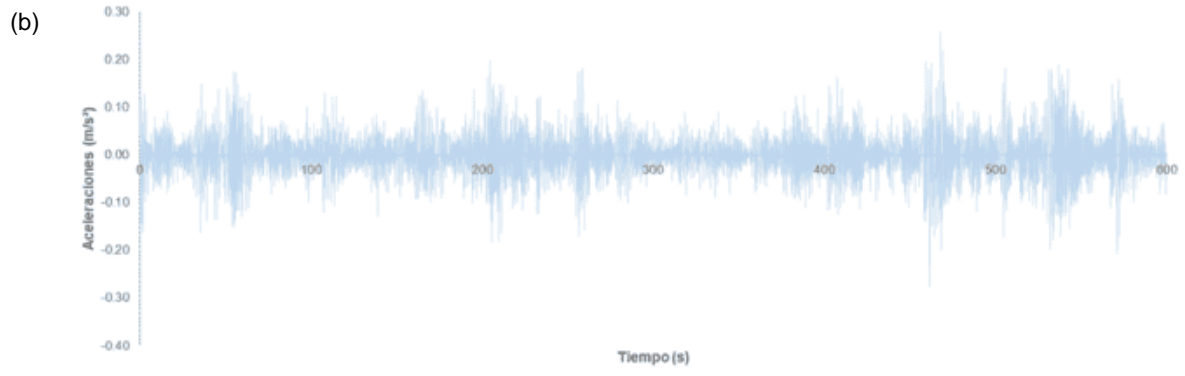
$$k = 391.58 \text{ kN/m}$$

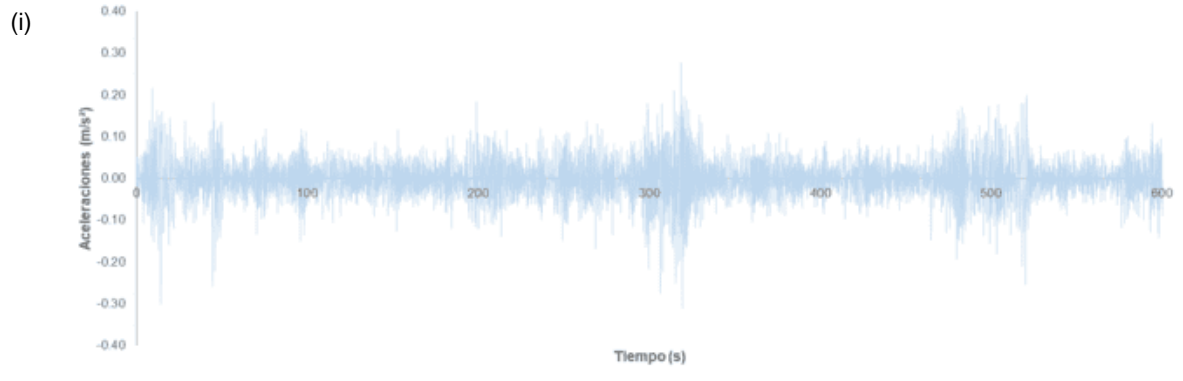
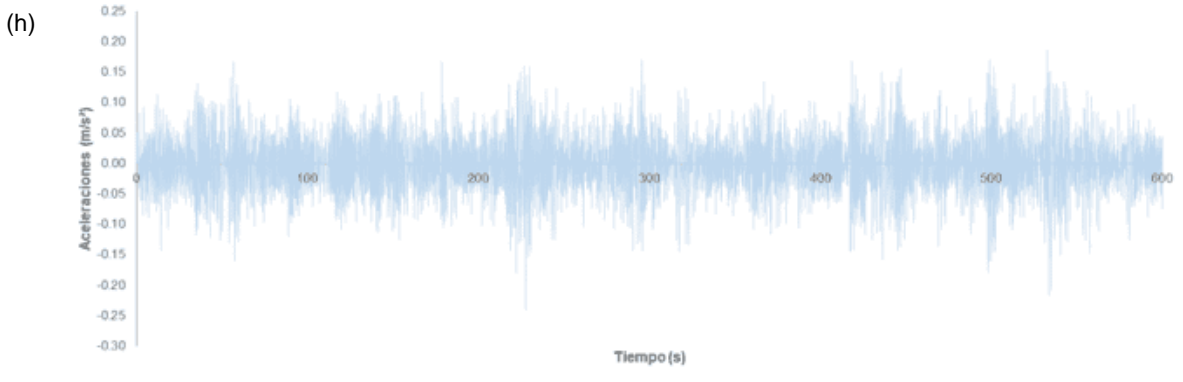
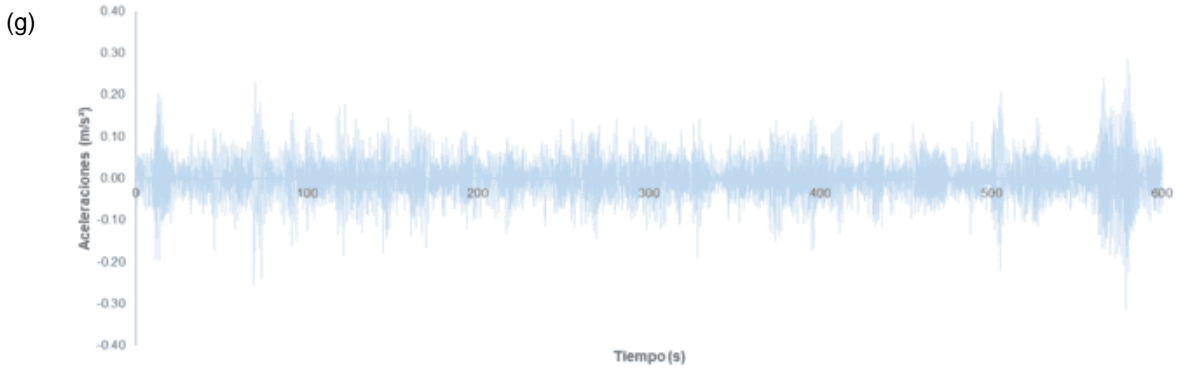
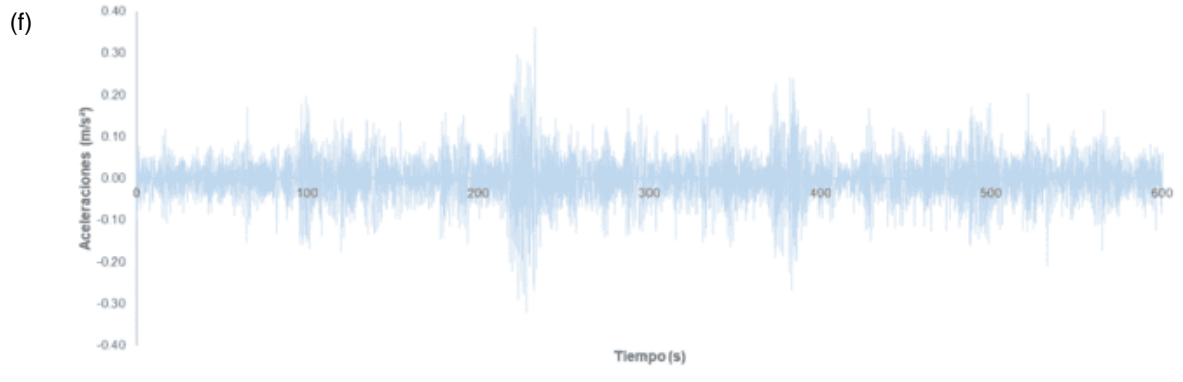
$$c = 33.51 \text{ kN} - \text{s/m}$$

Estos valores se asignan en el elemento Link siguiendo el procedimiento descrito en este capítulo.

En las Figuras 5.25 y 5.26 se muestran las respuestas dinámicas del último nivel para cada simulación de fuerzas de viento turbulento considerando el efecto del AMS en el análisis.







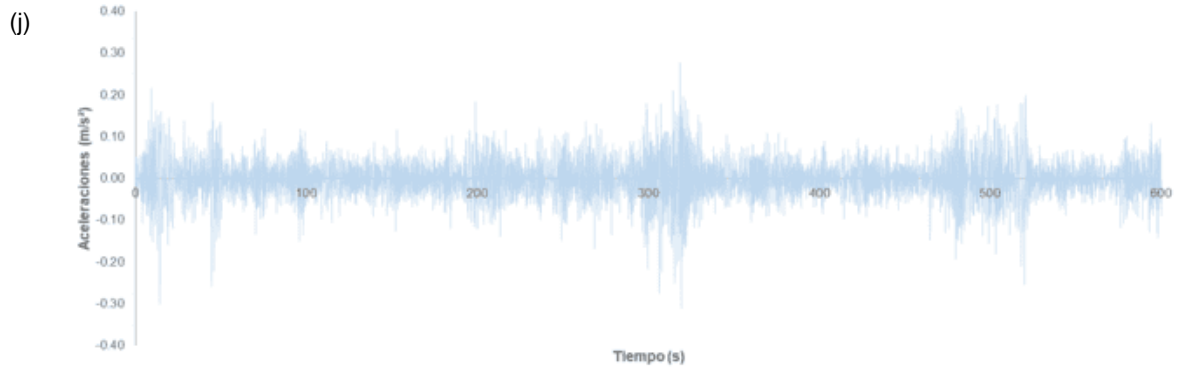
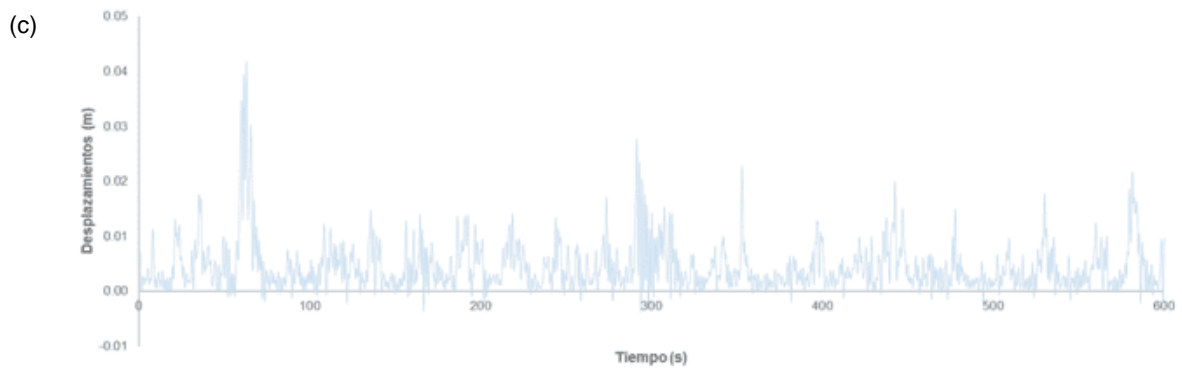
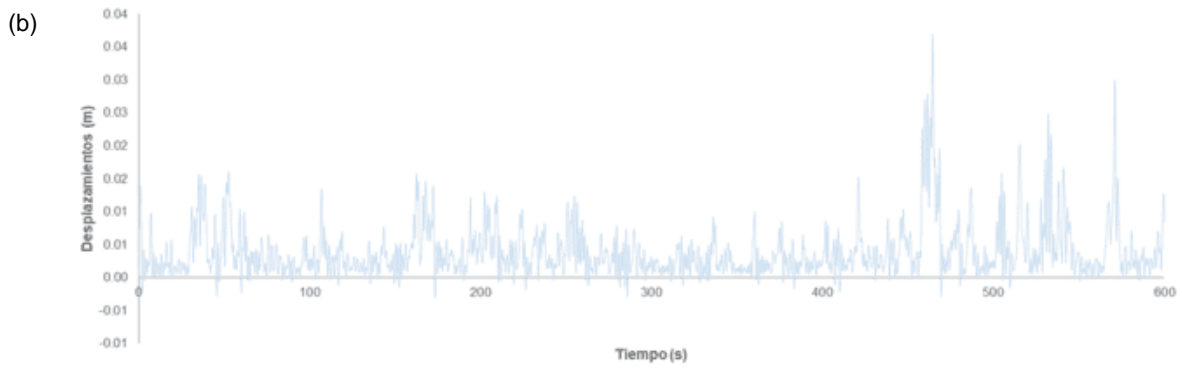
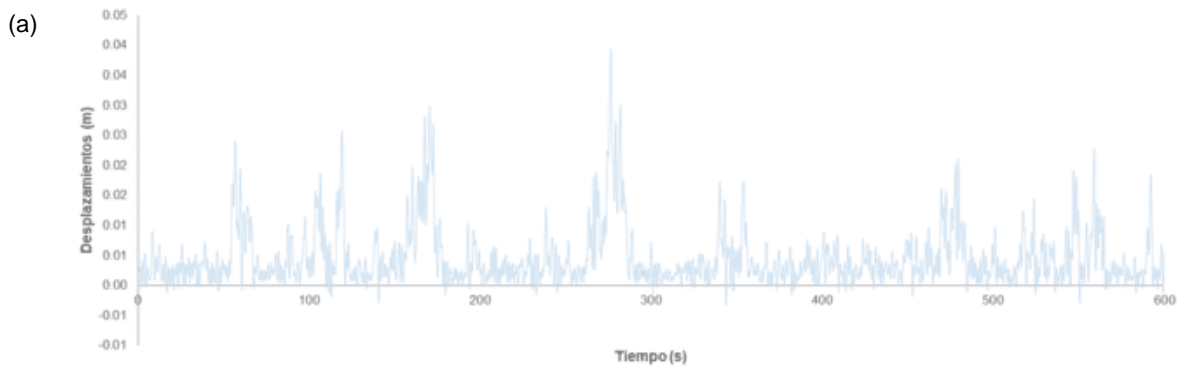
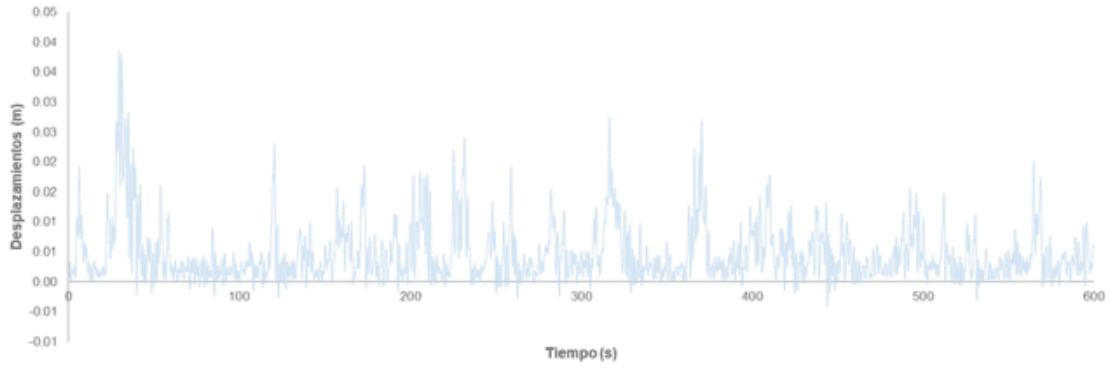


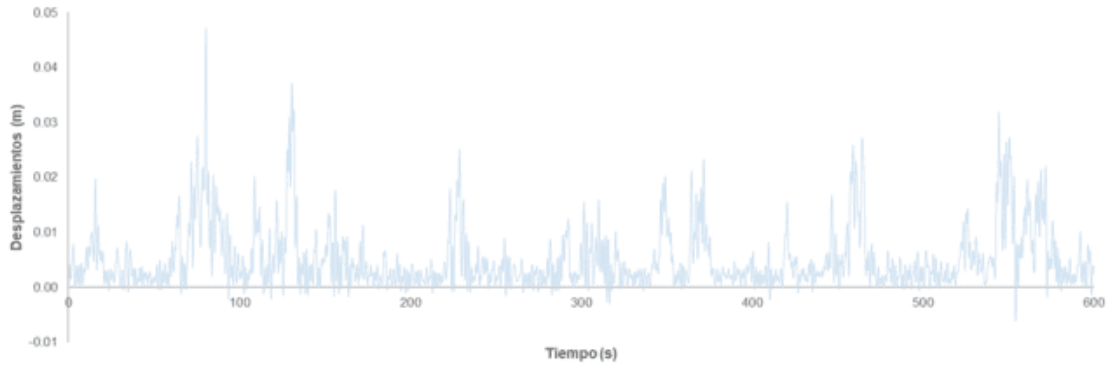
Figura 5.25. Respuesta dinámica de aceleraciones para simulación: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10



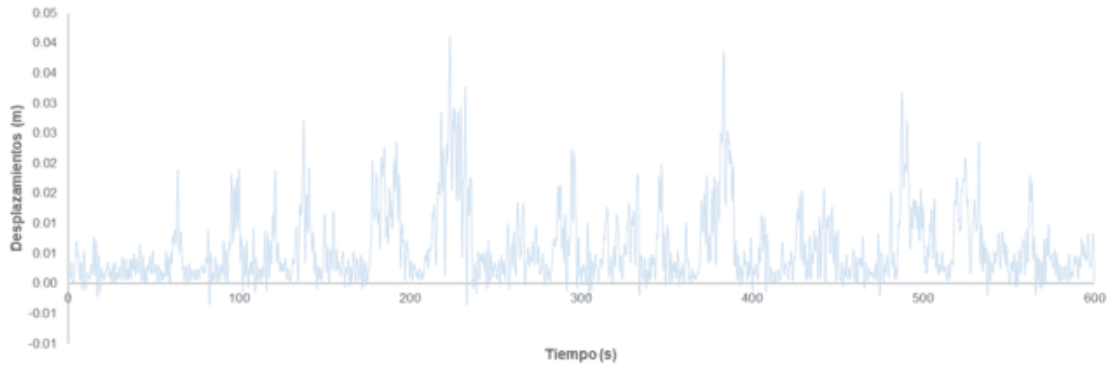
(d)



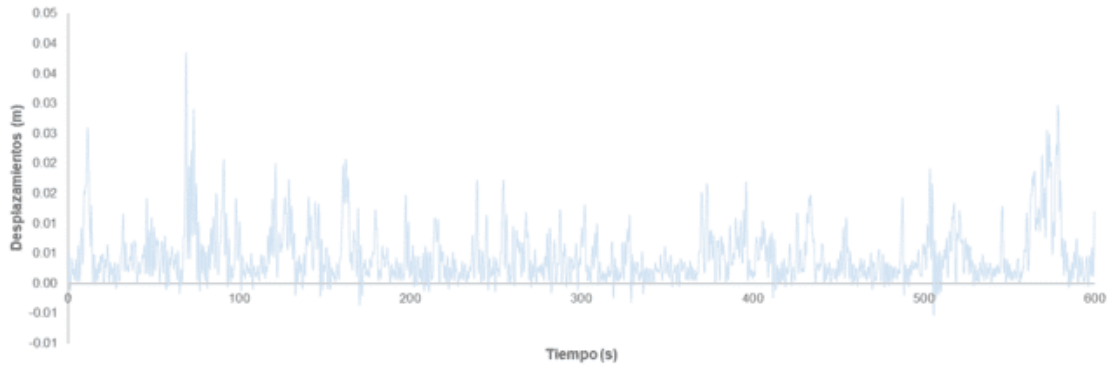
(e)



(f)



(g)



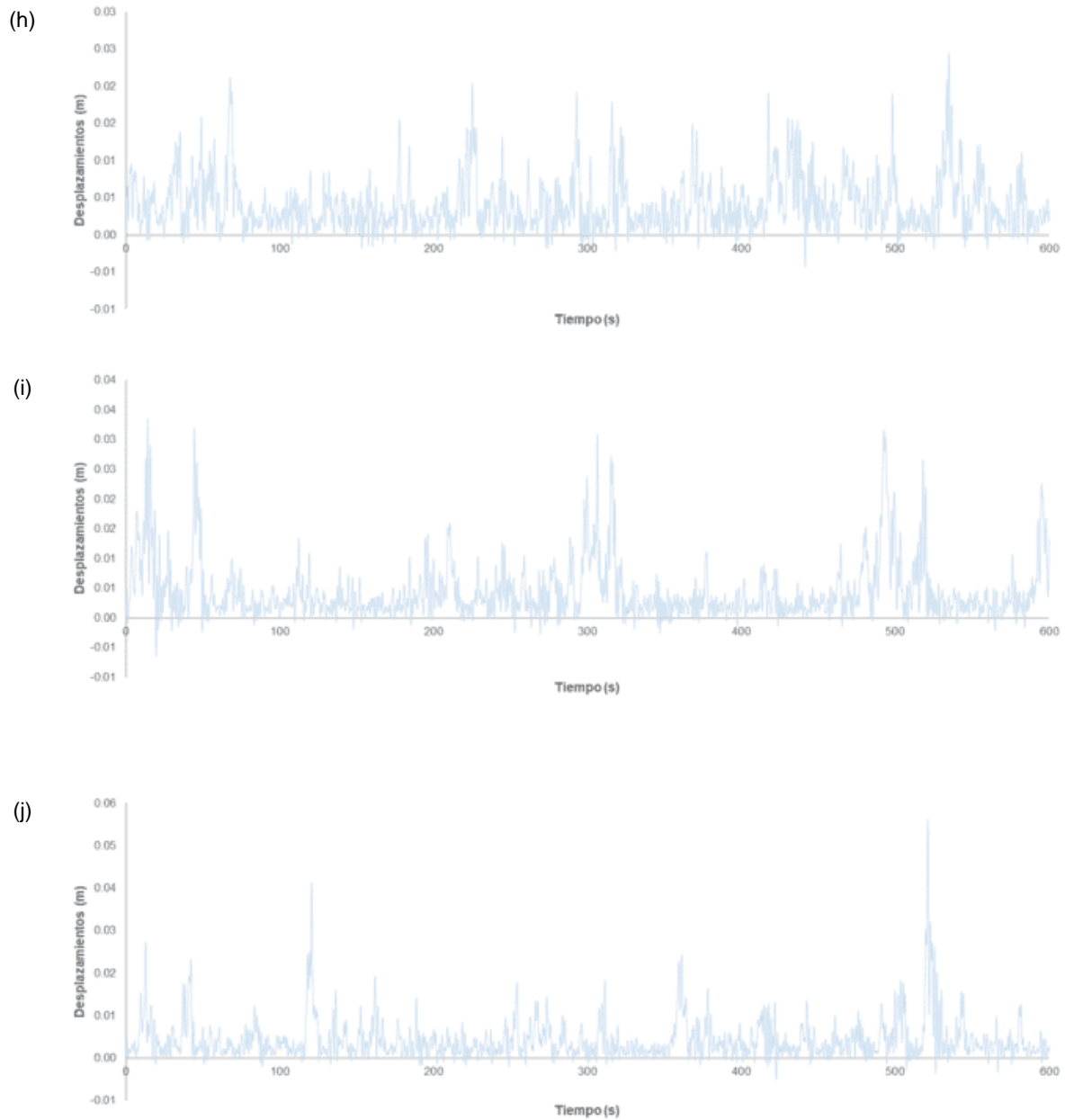


Figura 5.26. Respuesta dinámica de desplazamientos para simulación: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10

En la Tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos por medio del análisis en el modelo matemático.

Tabla 5.4. Respuesta dinámica para Simulaciones de Fuerzas de Viento Turbulento

Simulaciones	Aceleración Máxima (m/s ²)	Desplazamiento Máximo (m)
Simulación 1	0.275	0.039
Simulación 2	0.275	0.037
Simulación 3	0.336	0.042
Simulación 4	0.291	0.039
Simulación 5	0.298	0.047
Simulación 6	0.356	0.041
Simulación 7	0.314	0.039
Simulación 8	0.239	0.024
Simulación 9	0.306	0.034
Simulación 10	0.341	0.056
Promedio	0.303	0.039

5.4.4.2 ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS

Realizando el mismo procedimiento para el análisis del modelo matemático ante simulaciones de fuerzas de viento turbulento, se le asignan las propiedades las siguientes propiedades al elemento Link para los respectivos análisis mencionados.

Las propiedades para la reducción de las aceleraciones obtenidos del análisis numérico son:

$$m = 28.00 \text{ t}$$

$$k = 572.42 \text{ kN/m}$$

$$c = 2.53 \text{ kN} - \text{s/m}$$

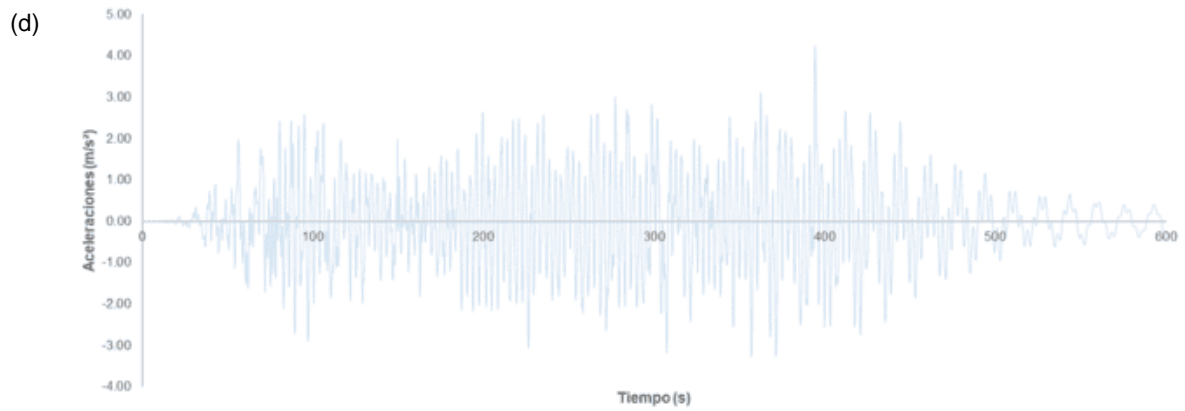
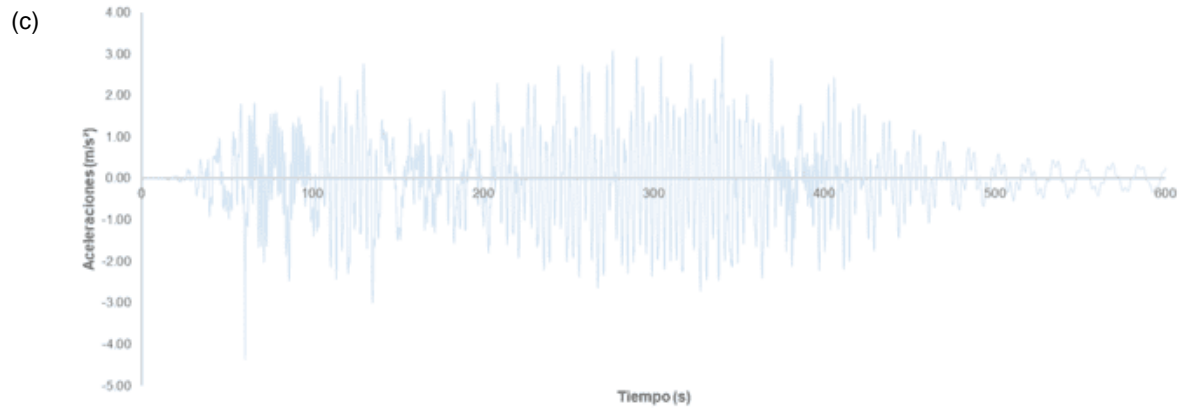
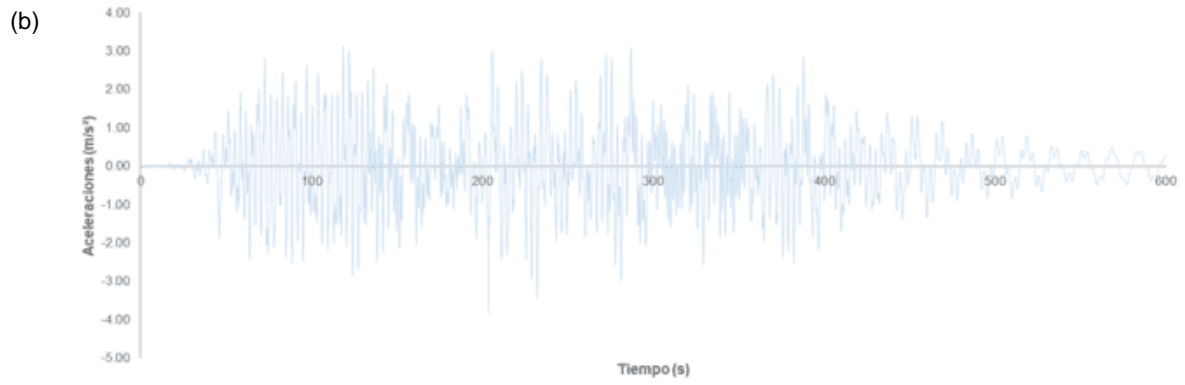
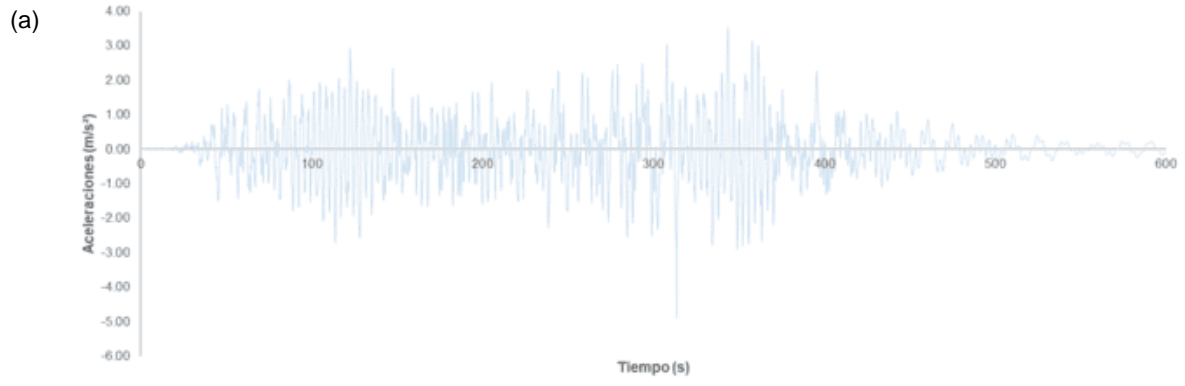
Las propiedades para la reducción de los desplazamientos obtenidos del análisis numérico son:

$$m = 28.00 \text{ t}$$

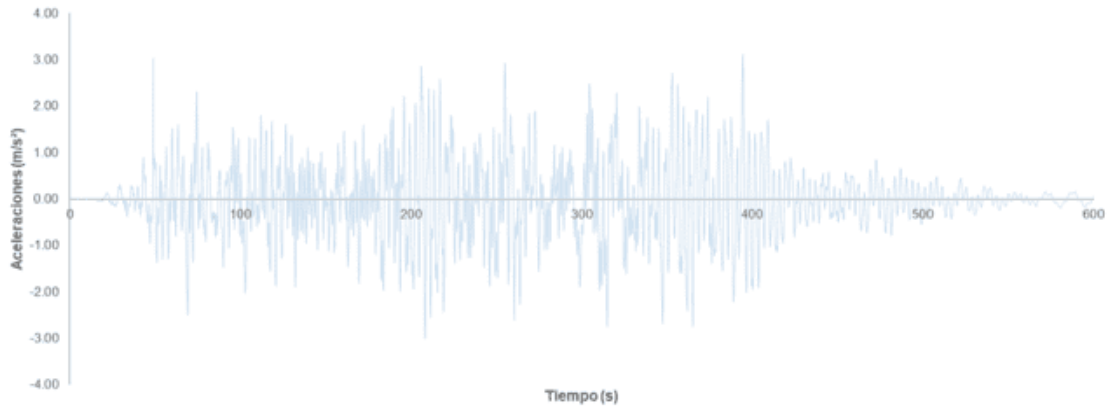
$$k = 383.19 \text{ kN/m}$$

$$c = 41.44 \text{ kN} - \text{s/m}$$

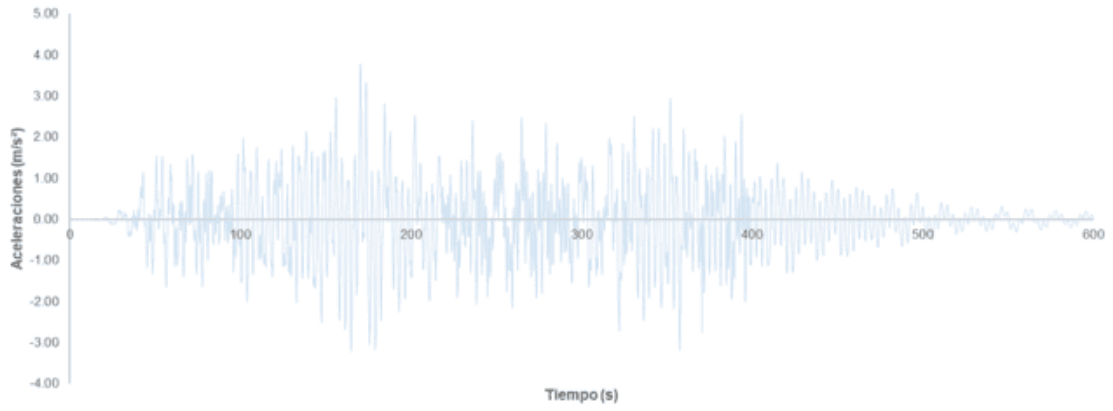
En las Figuras 5.27 y 5.28 muestran las respuestas dinámicas del último nivel para cada acelerograma sintético considerando el efecto del AMS en el análisis.



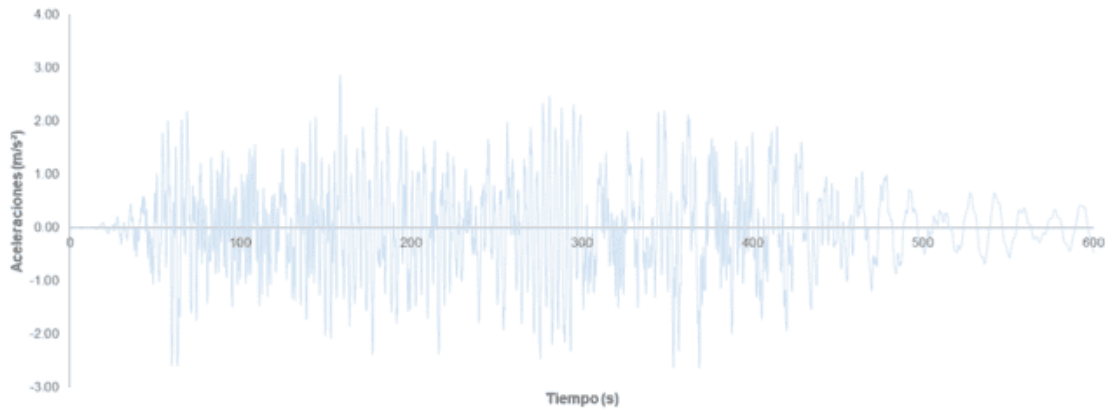
(e)



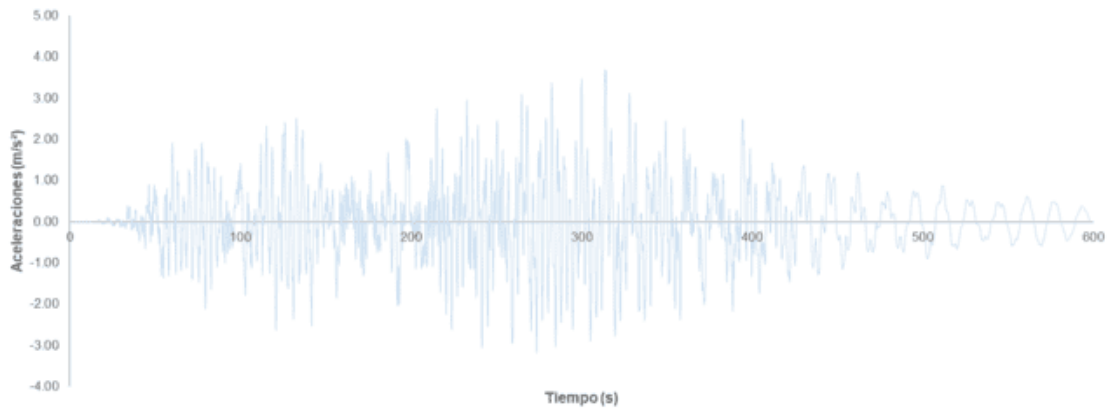
(f)



(g)



(h)



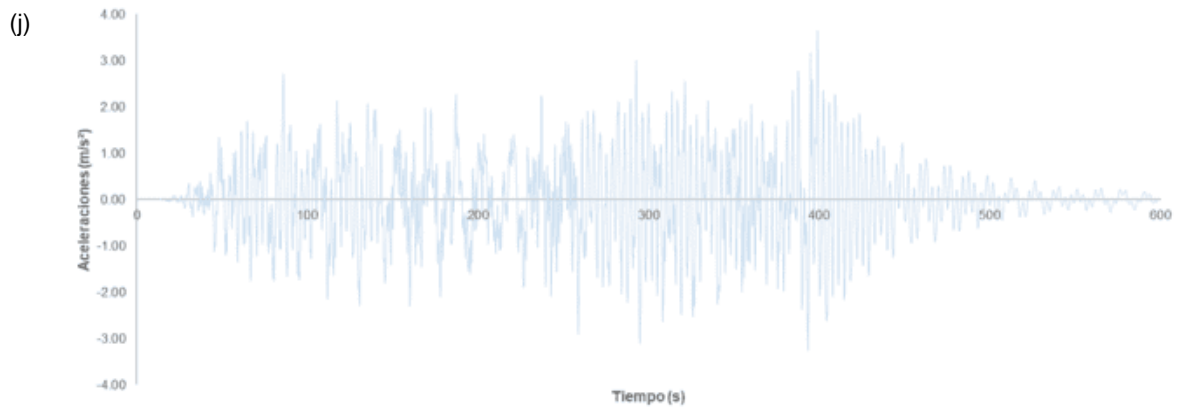
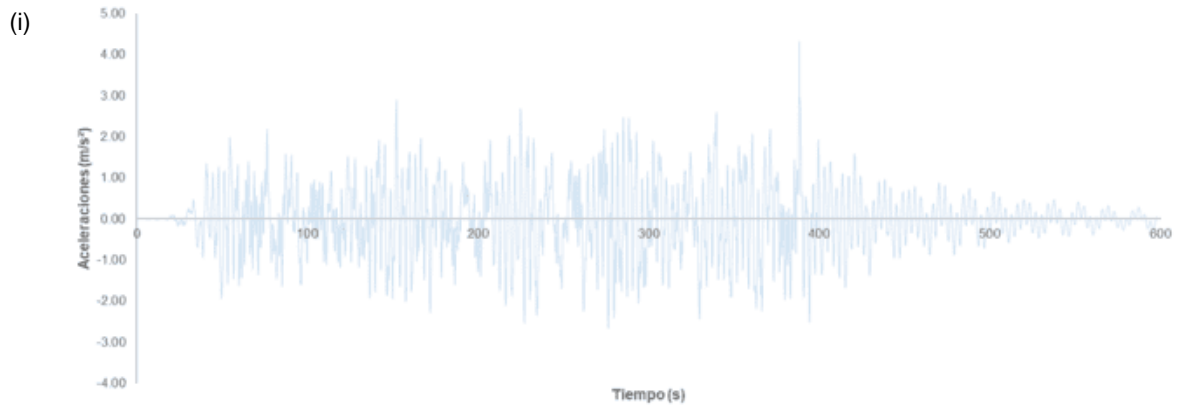
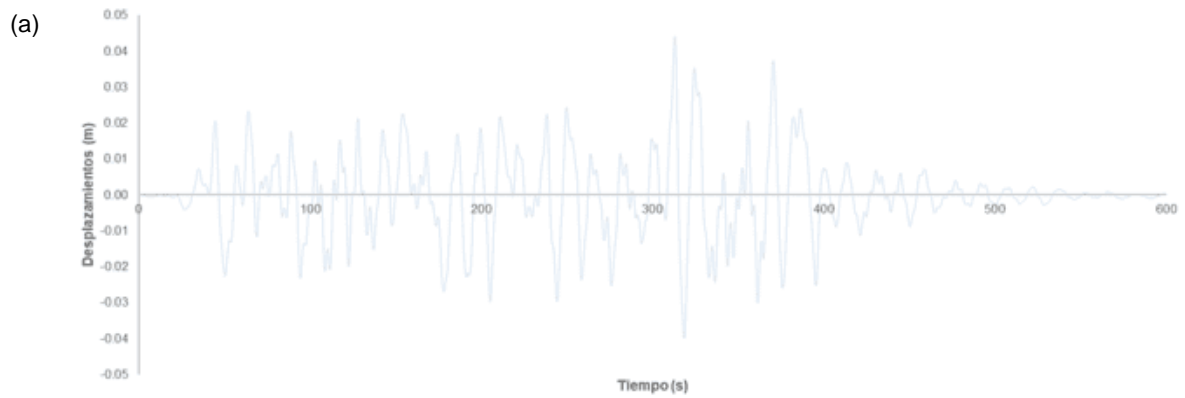
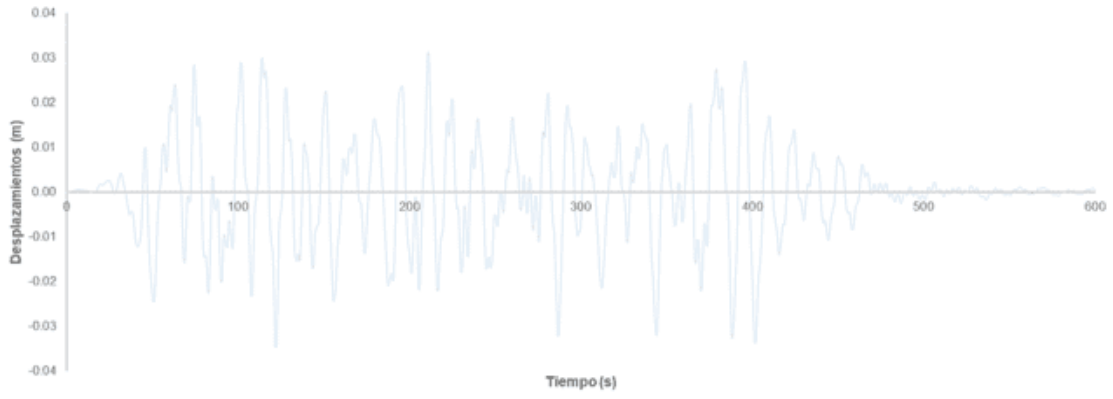


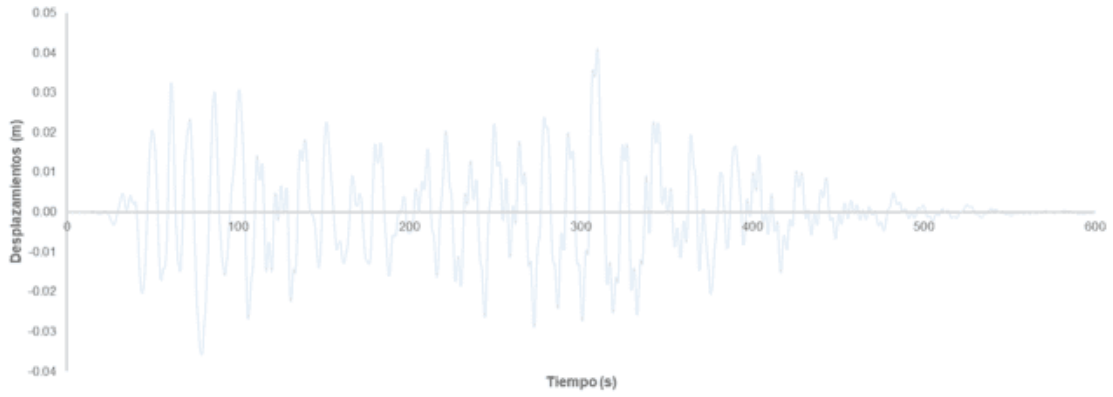
Figura 5.27. Resposta dinâmica de acelerações para acelerograma sintético: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10



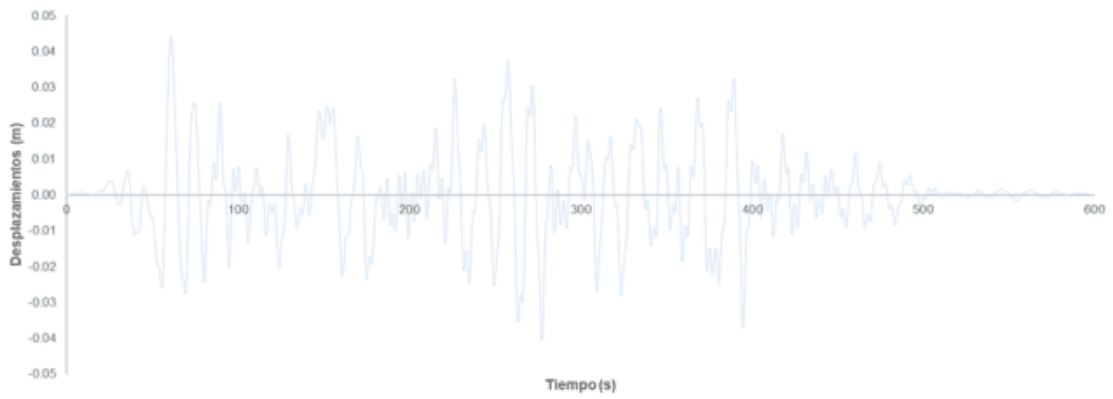
(b)



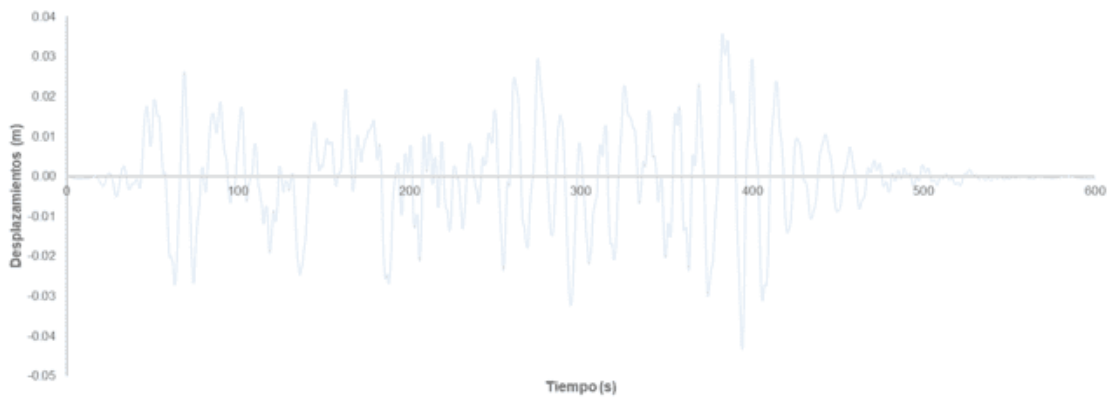
(c)



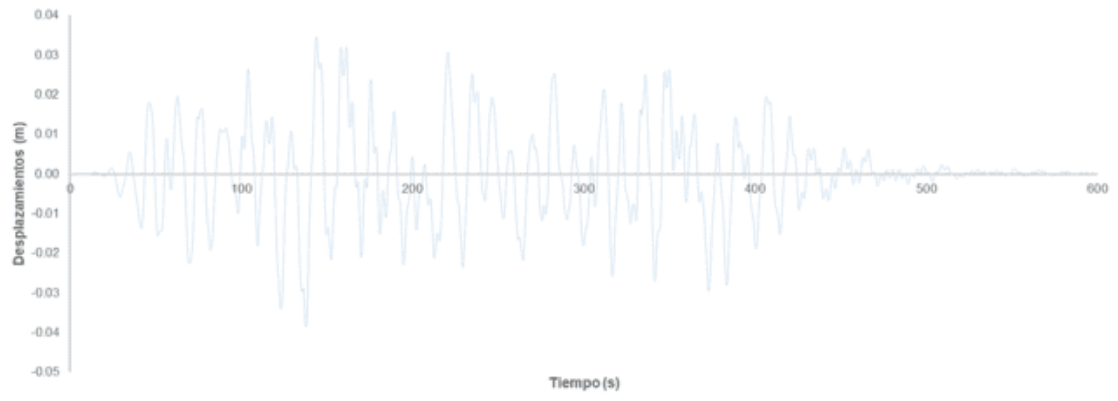
(d)



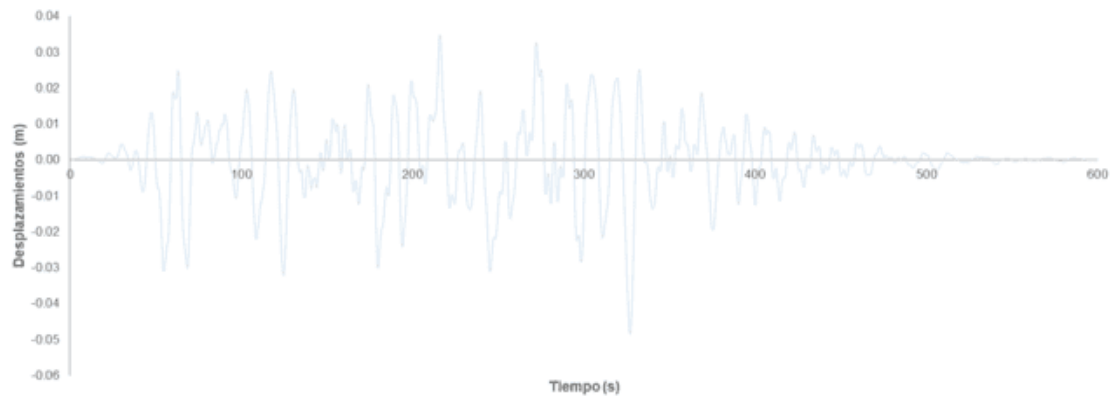
(e)



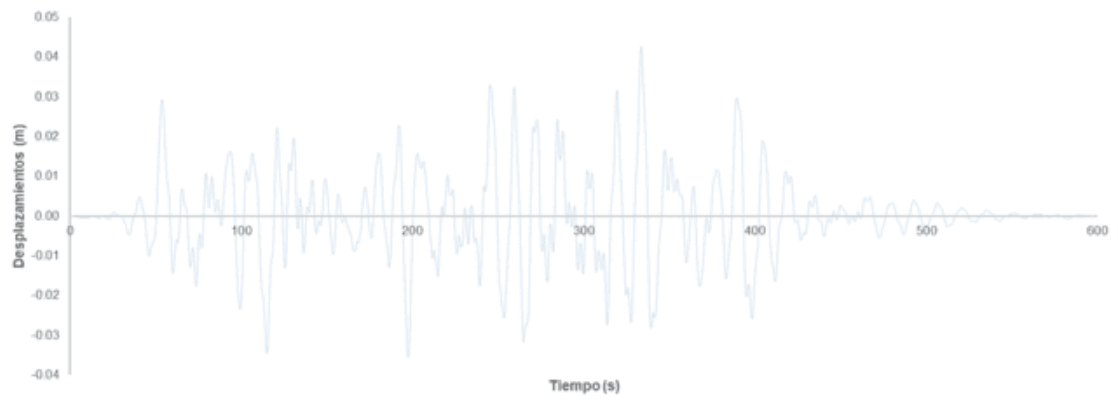
(f)



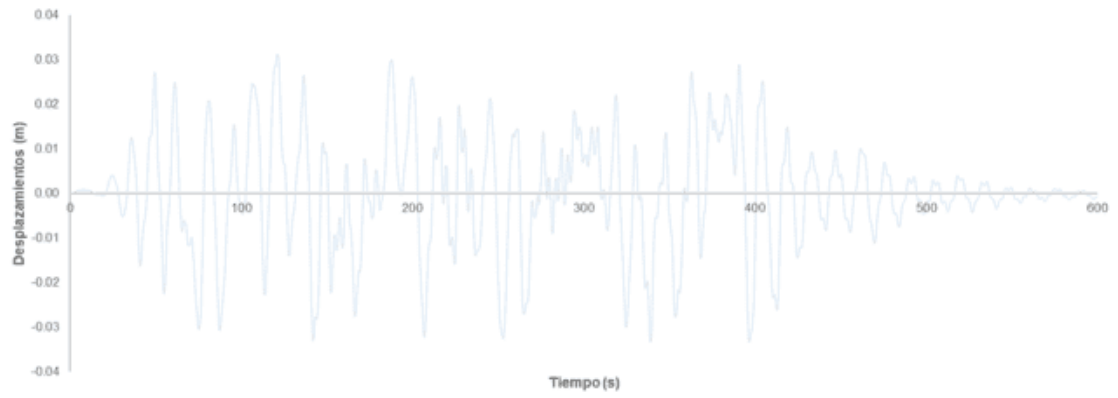
(g)



(h)



(i)



(j)

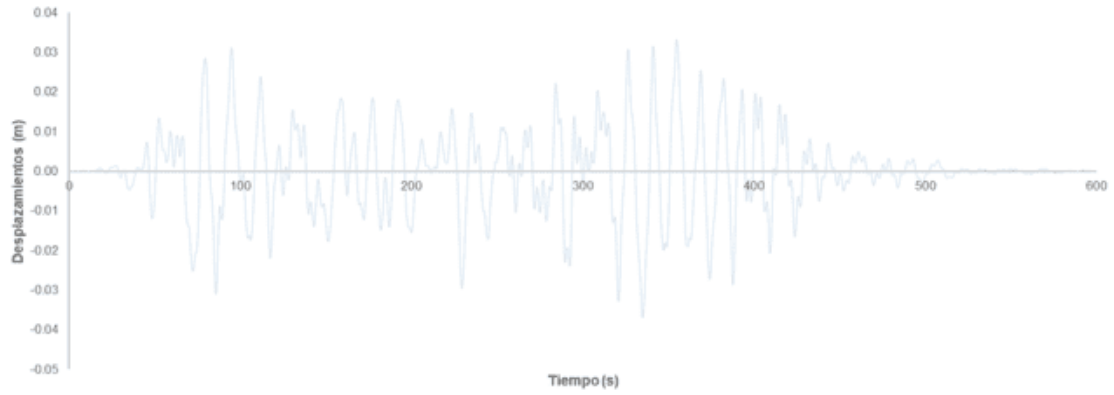


Figura 5.28. Respuesta dinámica de desplazamientos para acelerograma sintético: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10

En la Tabla 5.5 se muestran los resultados obtenidos por medio del análisis en el modelo matemático.

Tabla 5.5. Respuesta dinámica para Acelerogramas Sintéticos

Acelerogramas Sintéticos	Aceleración Máxima (m/s ²)	Desplazamiento Máximo (m)
Acelerograma Sintético 1	3.437	0.044
Acelerograma Sintético 2	3.217	0.035
Acelerograma Sintético 3	3.074	0.041
Acelerograma Sintético 4	3.865	0.044
Acelerograma Sintético 5	2.990	0.043
Acelerograma Sintético 6	3.645	0.038
Acelerograma Sintético 7	2.717	0.048
Acelerograma Sintético 8	3.422	0.043
Acelerograma Sintético 9	2.499	0.033
Acelerograma Sintético 10	3.466	0.037
Promedio	3.233	0.041

CAPÍTULO 6.- COMPARATIVA DE ANÁLISIS

6.1 ANÁLISIS EN PROGRAMA COMERCIAL

Se obtienen las respuestas dinámicas de la estructura para cada simulación de fuerzas de viento turbulento y acelerograma sintético con ayuda del programa comercial ETABS [1], así como, las respuestas dinámicas considerando los efectos del AMS en ésta.

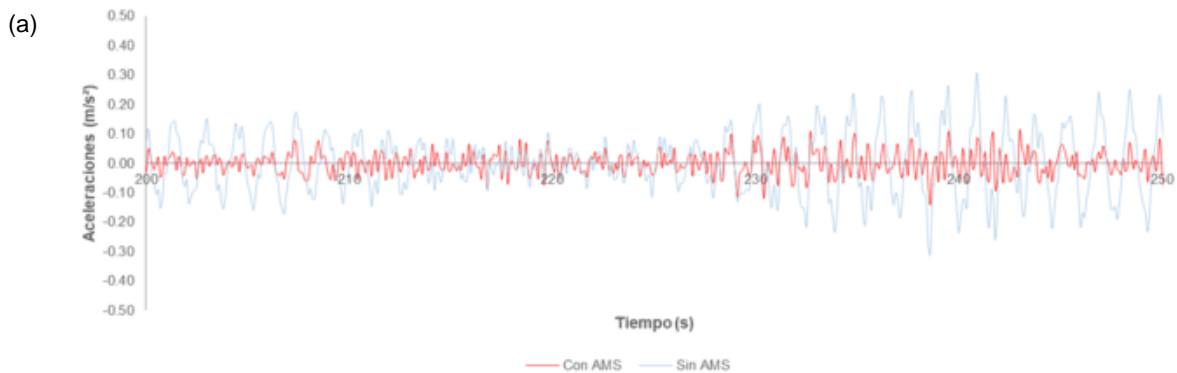
Debido a lo anterior, se realiza una comparativa de las respuestas obtenidas en el Capítulo 5 para determinar su disminución al contemplar los efectos del AMS en el análisis.

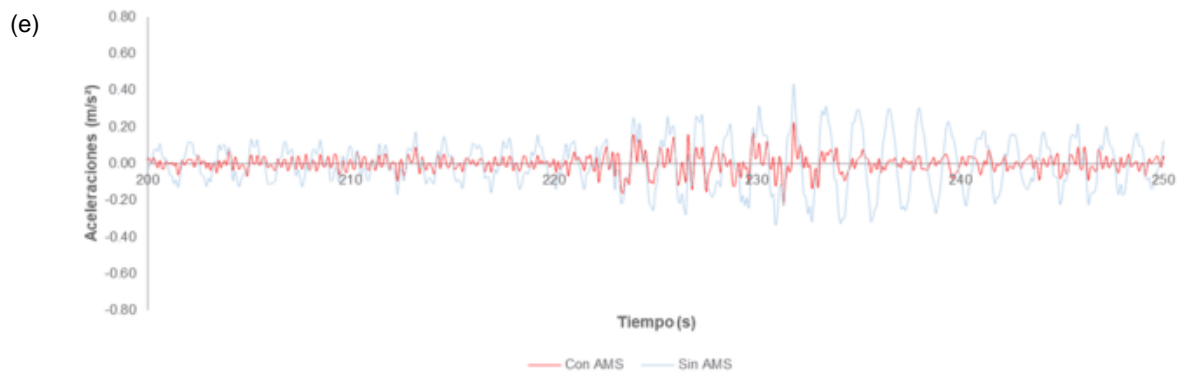
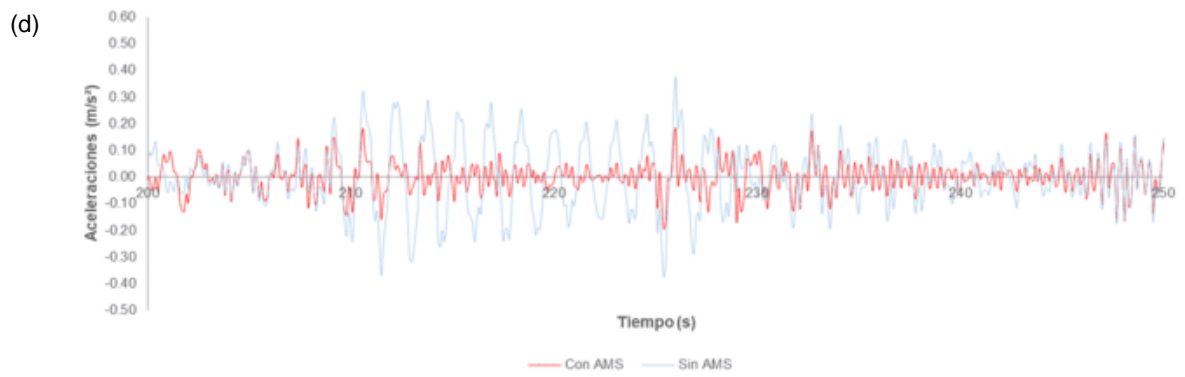
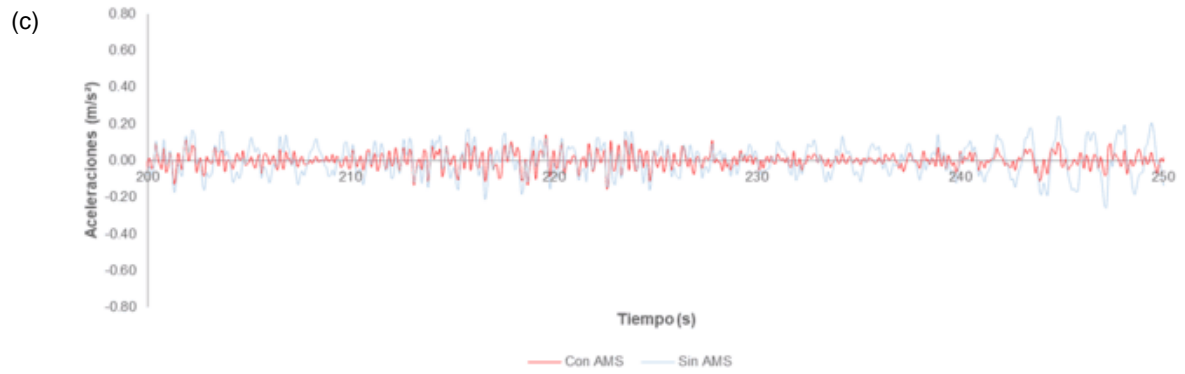
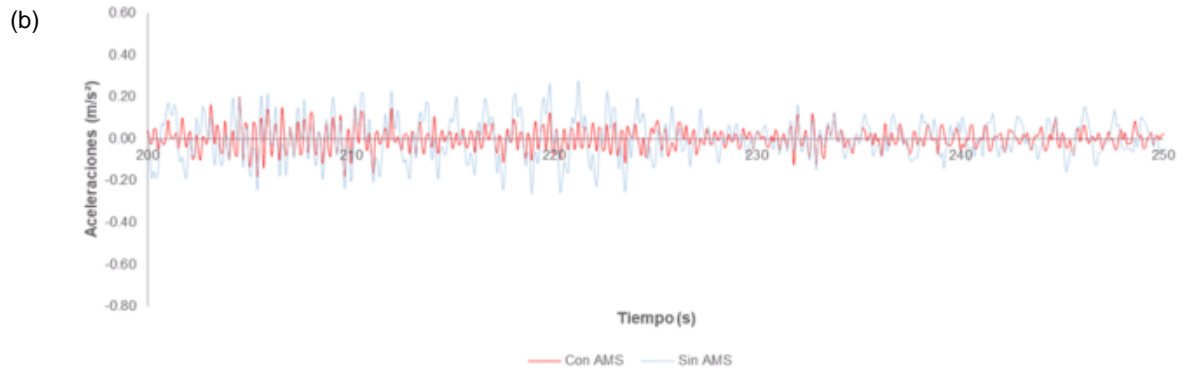
6.1.1 FUERZAS DE VIENTO TURBULENTO

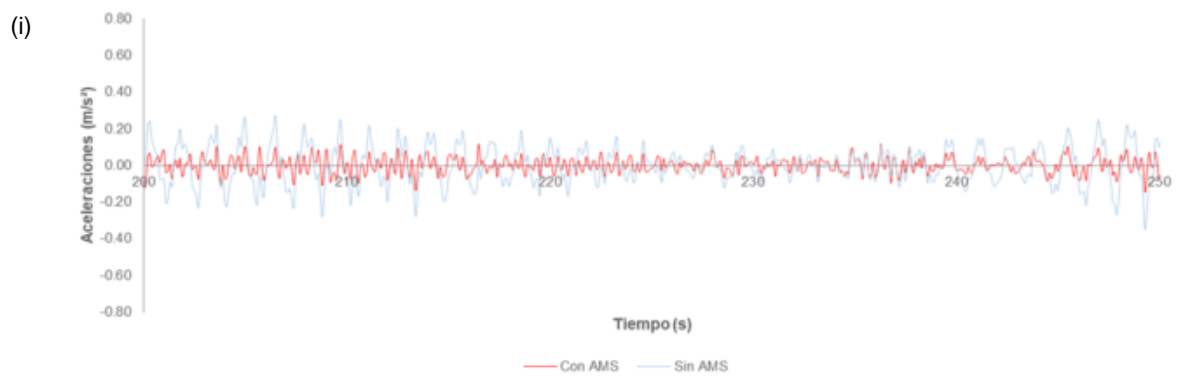
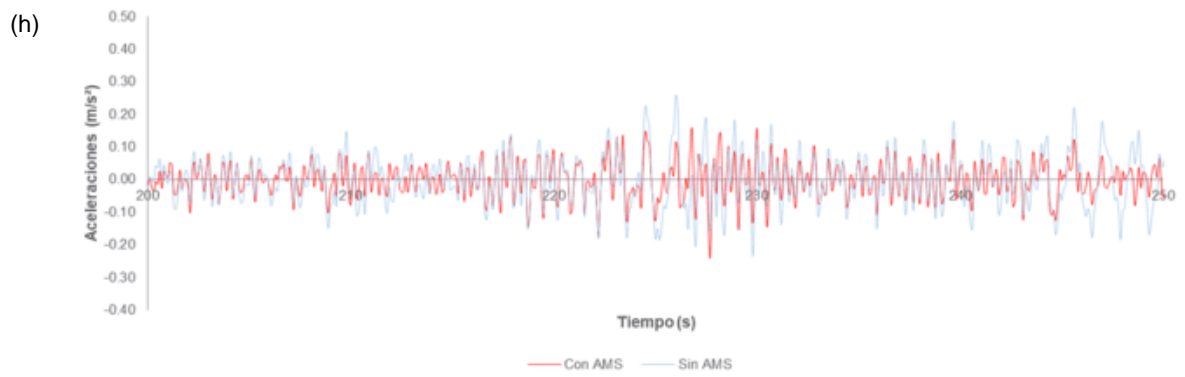
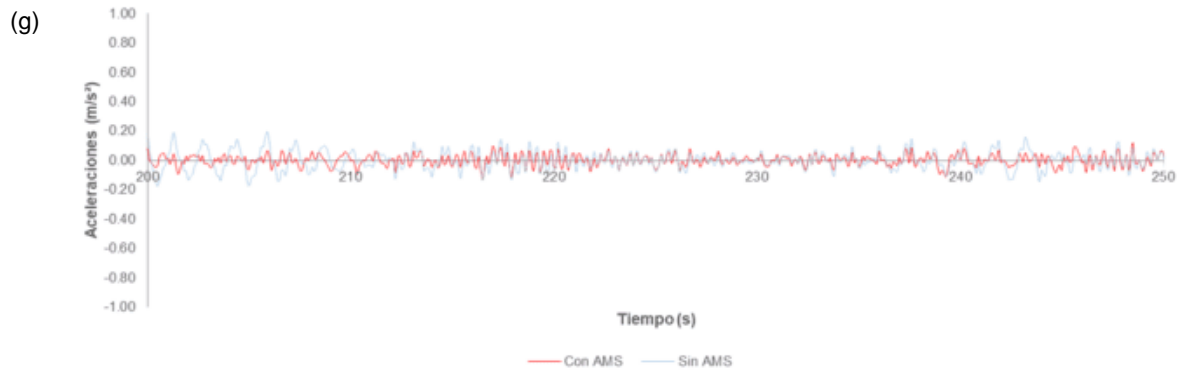
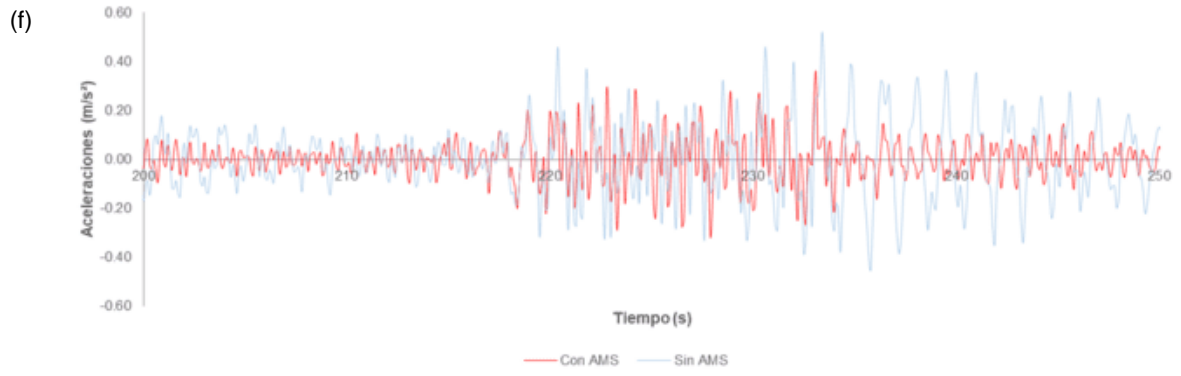
A continuación, se presentan las gráficas comparativas para las respuestas dinámicas obtenidas por efectos de fuerzas de viento turbulento; así mismo, se presentan las respuestas máximas obtenidas y los porcentajes de reducción para ambos casos de respuestas dinámicas.

Para una mayor apreciación en las gráficas se muestra el segmento de las respuestas obtenidas entre los 200 y 250 s.

La Figura 6.1 se presenta la comparación de aceleraciones.







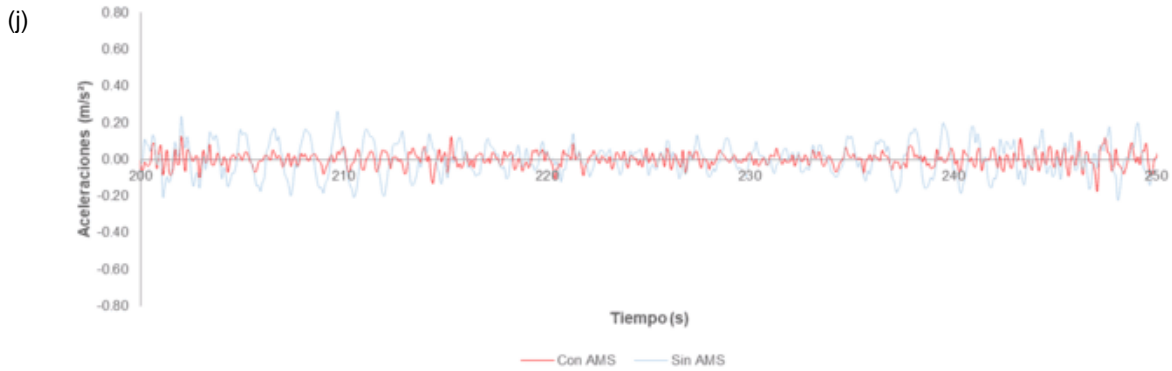


Figura 6.1. Respuesta dinámica de aceleraciones para simulación: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10

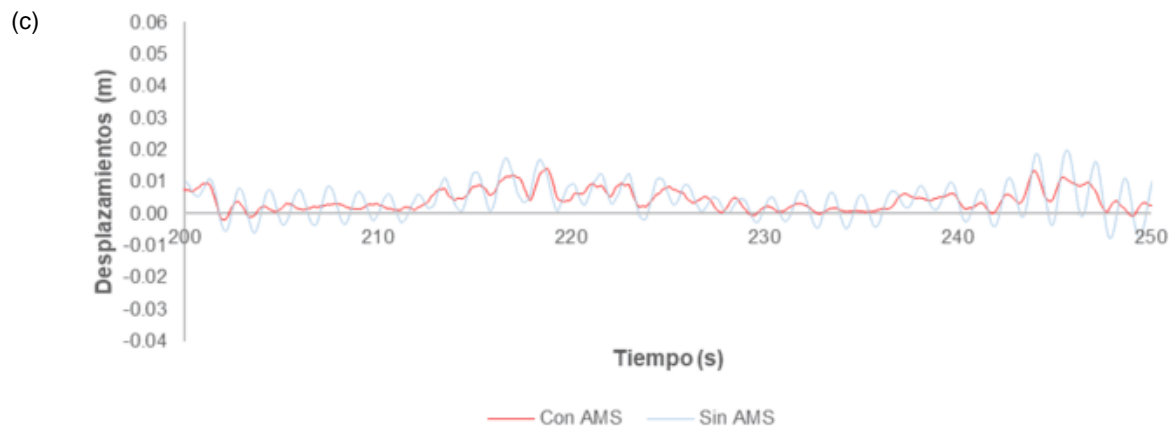
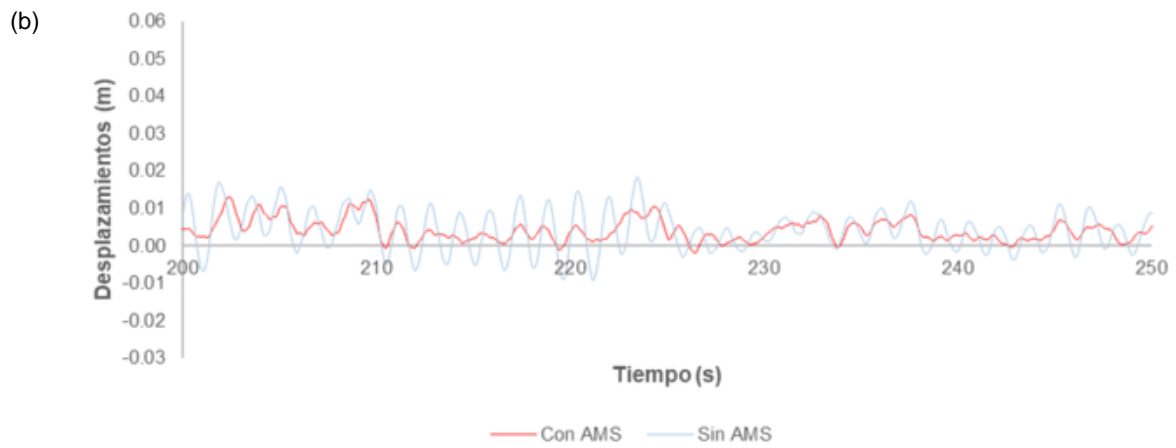
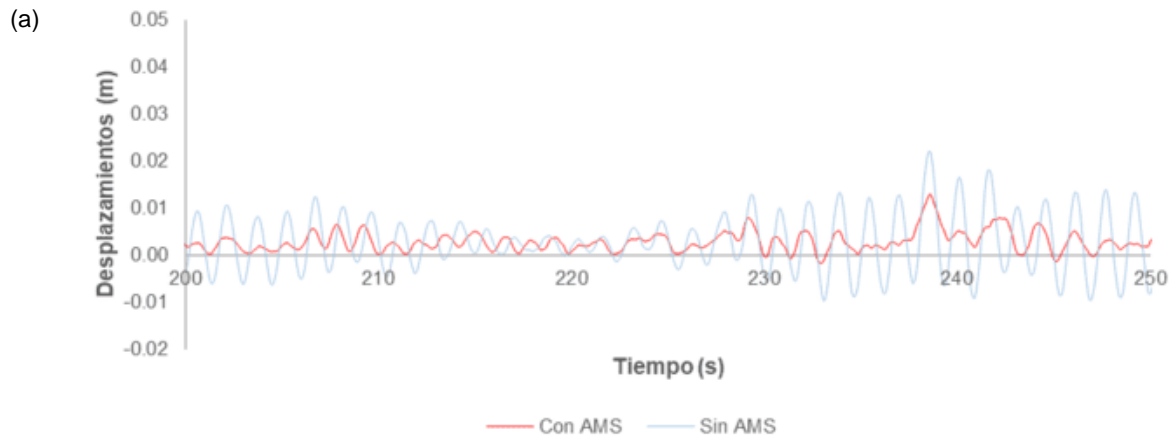
De acuerdo con los análisis, se obtienen las respuestas dinámicas máximas por aceleraciones para cada simulación de fuerzas de viento turbulento. En la Tabla 6.1 se muestra un resumen de éstas, así como, el porcentaje de reducción debido a los efectos del AMS.

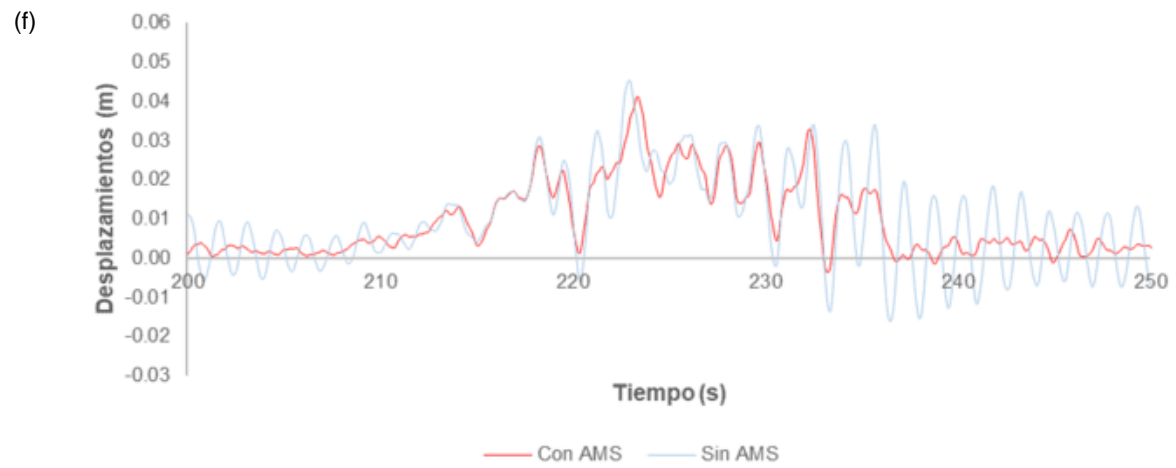
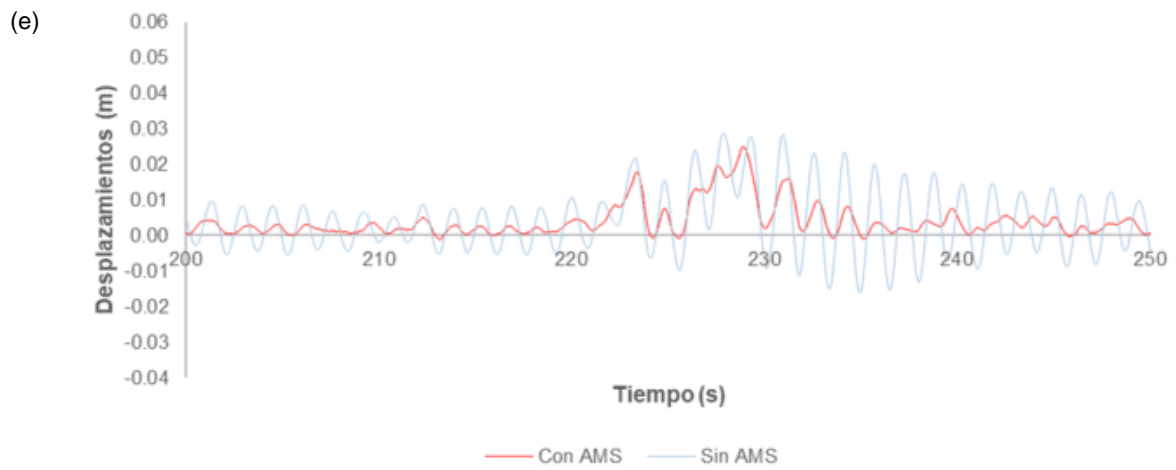
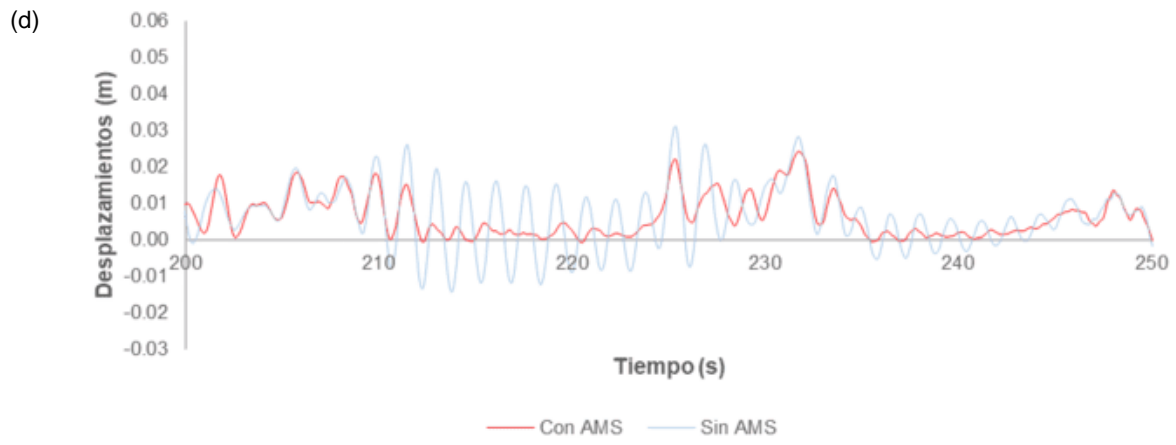
Tabla 6.1. Comparativa de respuestas dinámicas de aceleraciones para Simulaciones de Fuerzas de Viento Turbulento

Simulaciones	Sin TMD	Con TMD	Porcentaje de reducción (%)
	Aceleración Máxima (m/s ²)	Aceleración Máxima (m/s ²)	
Simulación 1	0.403	0.275	31.76%
Simulación 2	0.557	0.275	50.63%
Simulación 3	0.645	0.336	47.91%
Simulación 4	0.467	0.291	37.69%
Simulación 5	0.645	0.298	53.80%
Simulación 6	0.52	0.356	31.54%
Simulación 7	0.827	0.314	62.03%
Simulación 8	0.369	0.239	35.23%
Simulación 9	0.709	0.306	56.84%
Simulación 10	0.678	0.341	49.71%
Promedio	0.582	0.303	45.71%

En la tabla anterior se aprecia que el promedio de porcentaje de reducción para la respuesta dinámica de aceleraciones para las simulaciones de fuerzas de viento turbulento es de 45.71%.

La Figura 6.2 presenta la comparación de desplazamientos.





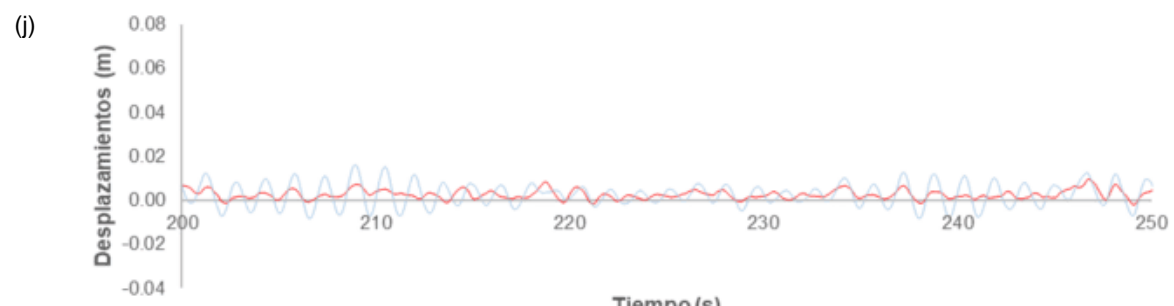
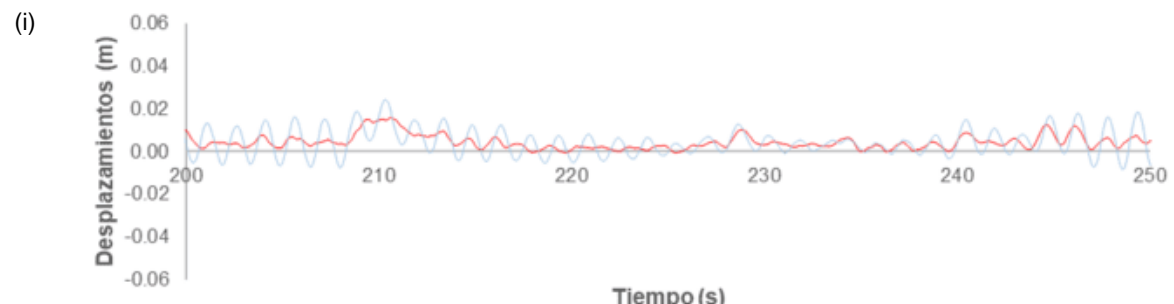
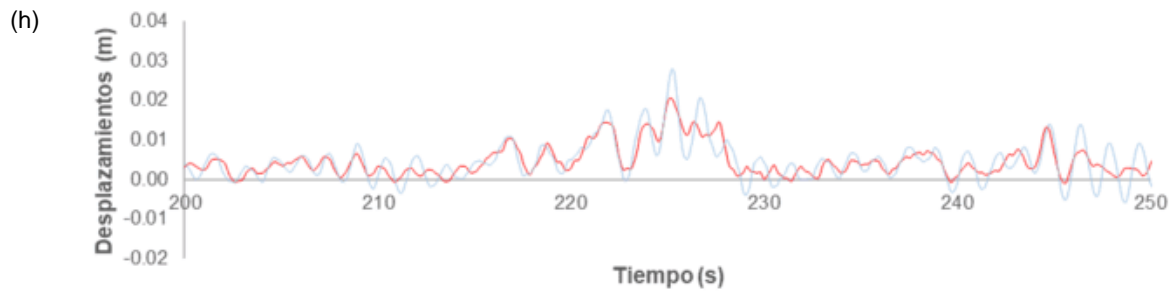
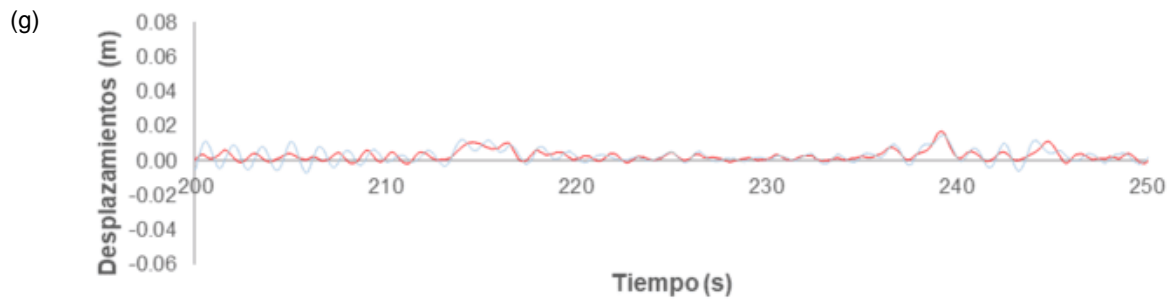


Figura 6.2. Respuesta dinámica de desplazamientos para simulación: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10

De acuerdo con los análisis, se obtienen las respuestas dinámicas máximas por desplazamientos para cada simulación de fuerzas de viento turbulento. En la Tabla 6.2 se muestra un resumen de éstas, así como, el porcentaje de reducción debido a los efectos del AMS.

Tabla 6.2. Comparativa de respuestas dinámicas de desplazamientos para Simulaciones de Fuerzas de Viento Turbulento

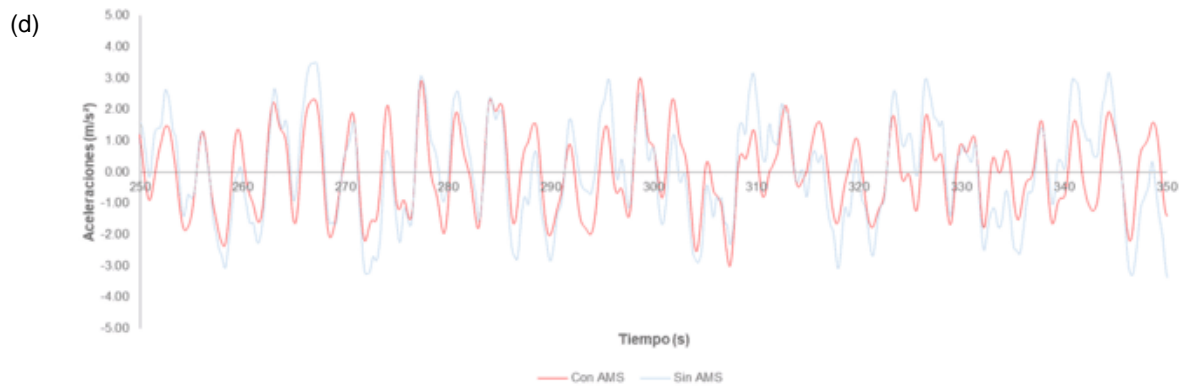
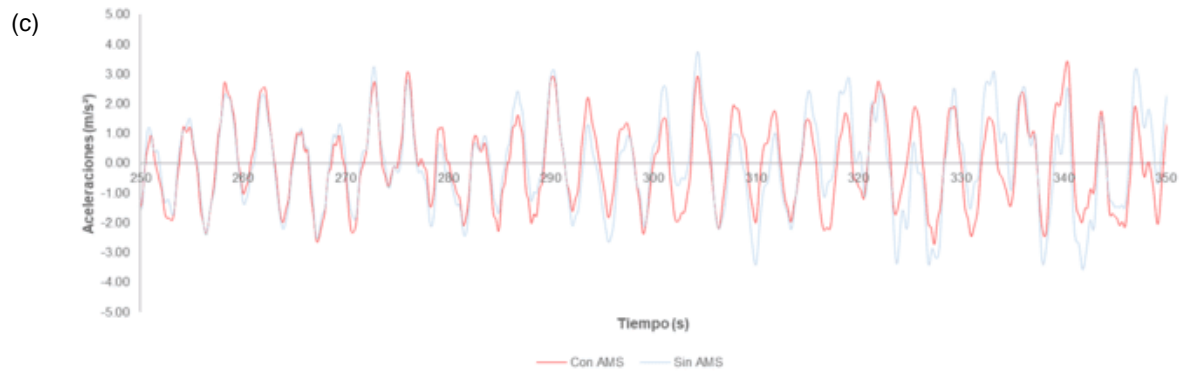
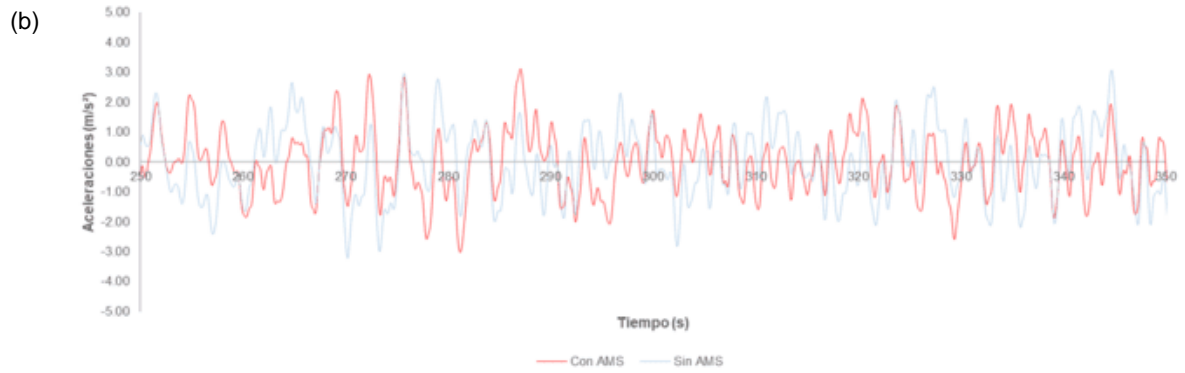
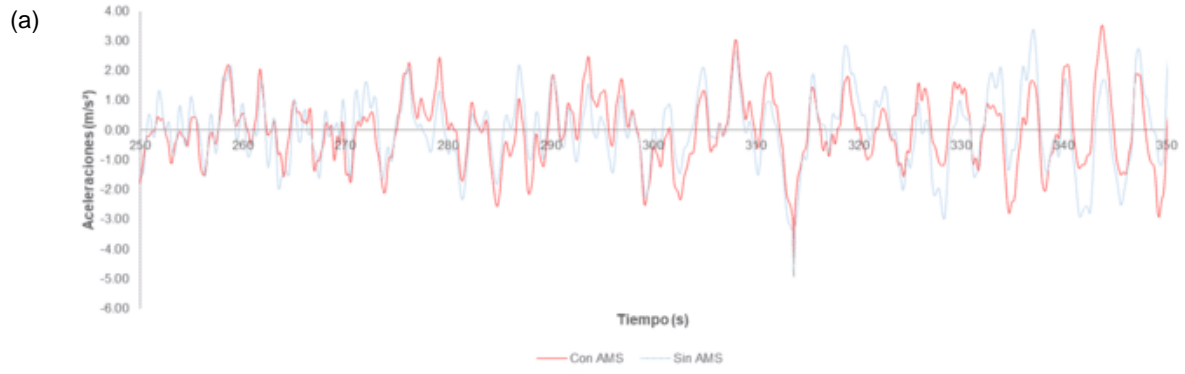
Simulaciones	Sin TMD	Con TMD	Porcentaje de reducción (%)
	Desplazamiento Máximo (m)	Desplazamiento Máximo (m)	
Simulación 1	0.044	0.039	11.36%
Simulación 2	0.054	0.037	31.48%
Simulación 3	0.051	0.042	17.65%
Simulación 4	0.051	0.039	23.53%
Simulación 5	0.05	0.047	6.00%
Simulación 6	0.05	0.041	18.00%
Simulación 7	0.062	0.039	37.10%
Simulación 8	0.03	0.024	20.00%
Simulación 9	0.051	0.034	33.33%
Simulación 10	0.06	0.056	6.67%
Promedio	0.050	0.040	20.51%

En la tabla anterior se aprecia que el promedio de porcentaje de reducción para la respuesta dinámica de desplazamientos para las simulaciones de fuerzas de viento turbulento es de 20.51 %.

6.1.2 ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS

Al igual que en el apartado anterior, se presentan las gráficas comparativas para las respuestas dinámicas obtenidas por efectos de sismo; así como, las comparativas y porcentajes de reducción que se obtienen para ambos casos de respuestas.

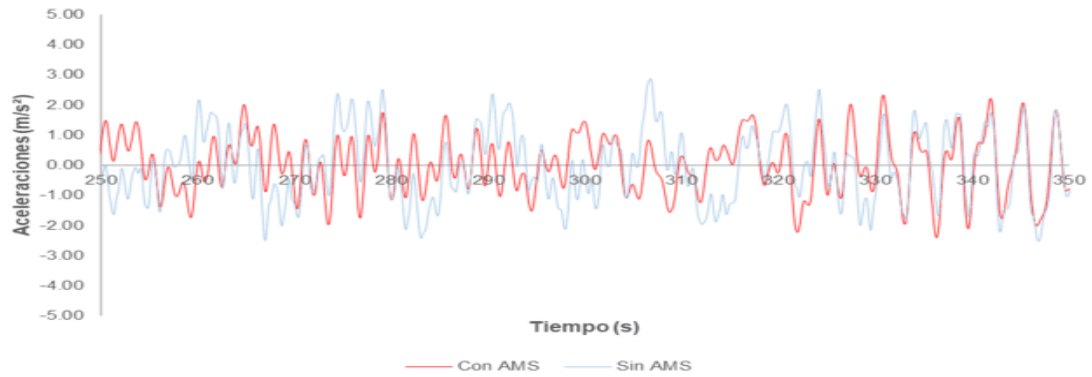
Para una mayor apreciación en las gráficas comparativas para las respuestas por efecto de viento, se muestra el segmento de las respuestas obtenidas entre los 200 y 250 s; mientras que para las gráficas comparativas para las respuestas por efecto de sismo se muestra el segmento de las respuestas obtenidas entre los 250 y 350 s.



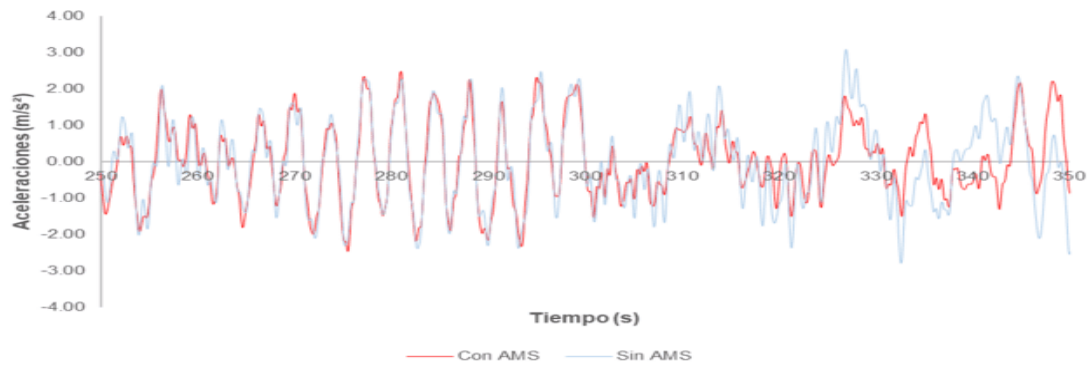
(e)



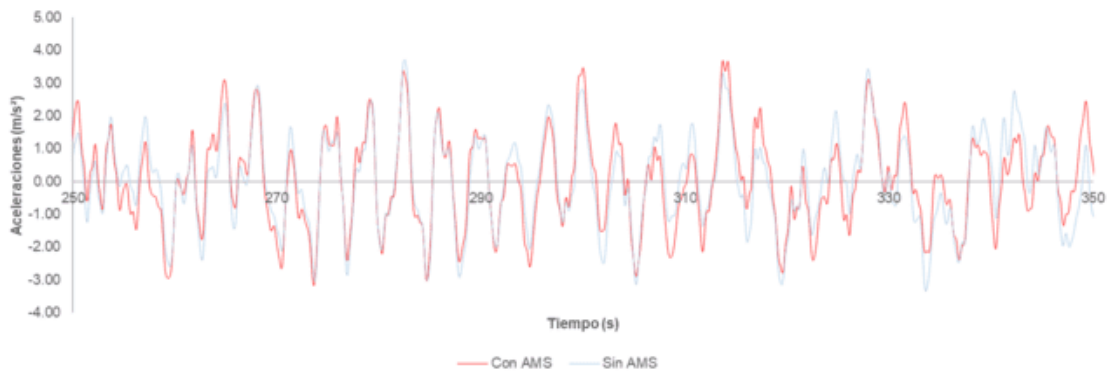
(f)



(g)



(h)



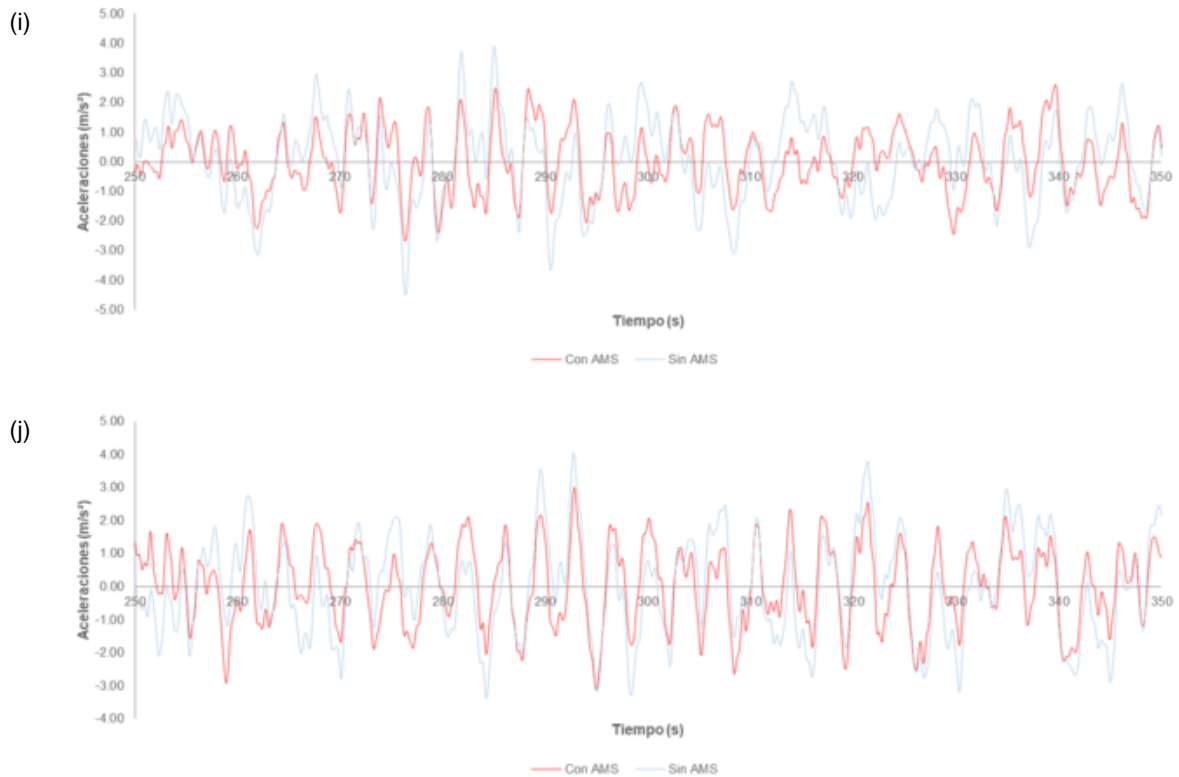


Figura 6.3. Respuesta dinámica de aceleraciones para acelerograma sintético: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10

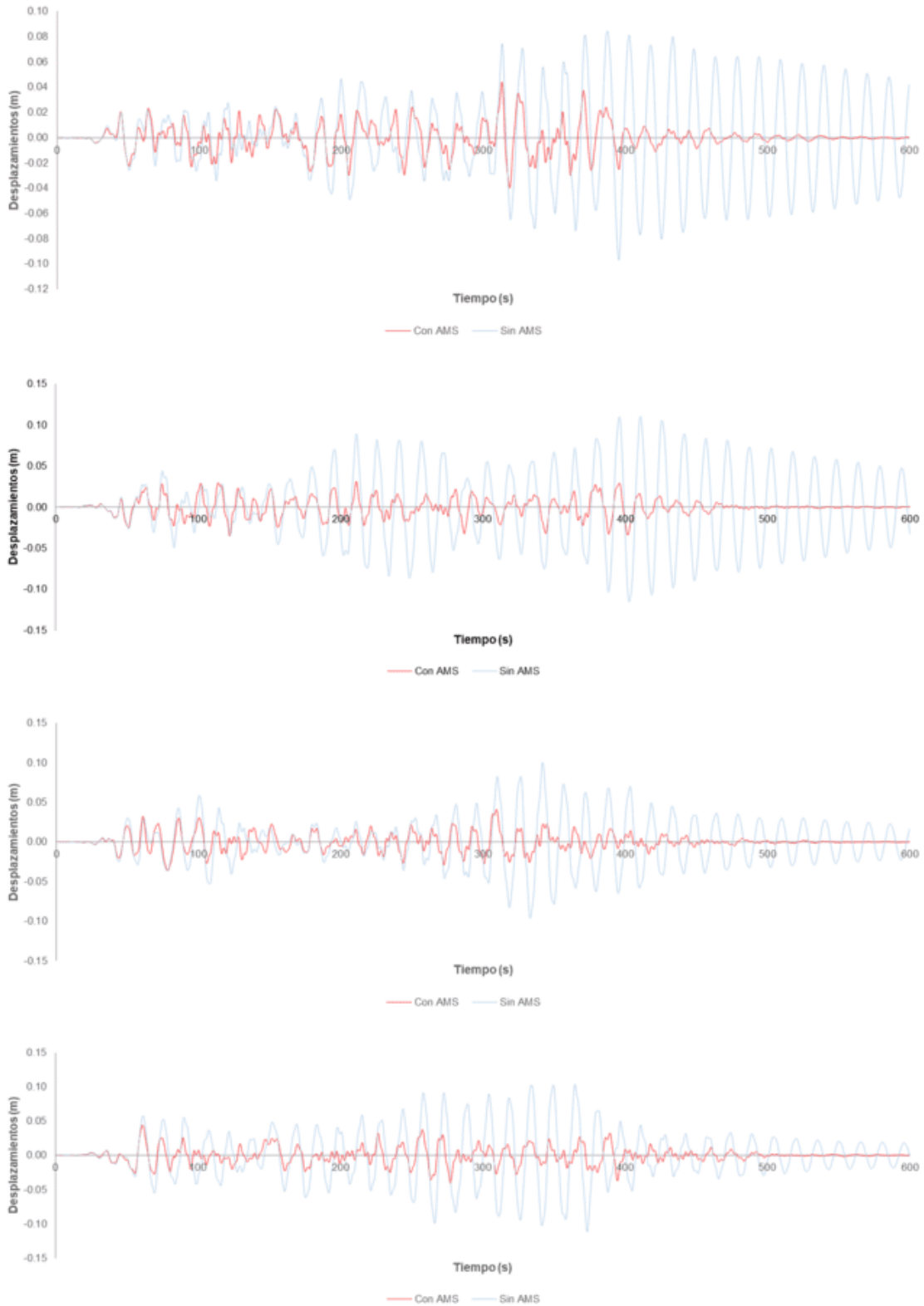
De acuerdo con los análisis, se obtienen las respuestas dinámicas máximas por aceleraciones para cada acelerograma sintético. En la Tabla 6.3 se muestra un resumen de éstas, así como, el porcentaje de reducción debido a los efectos del AMS.

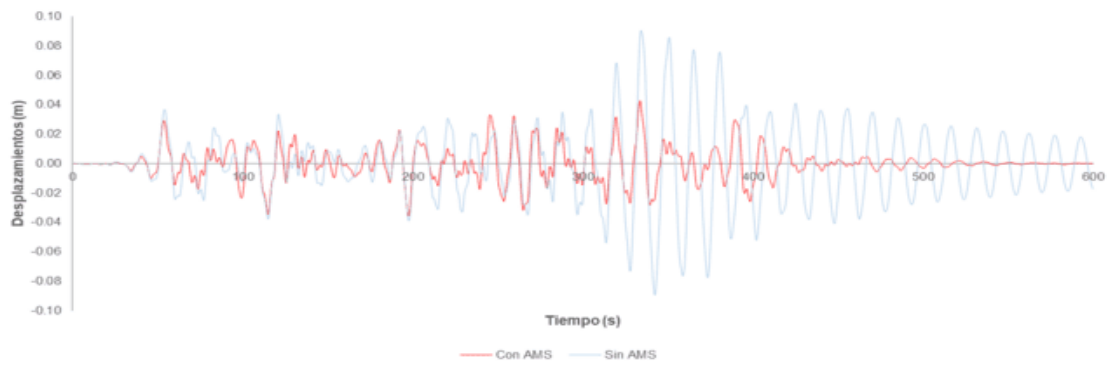
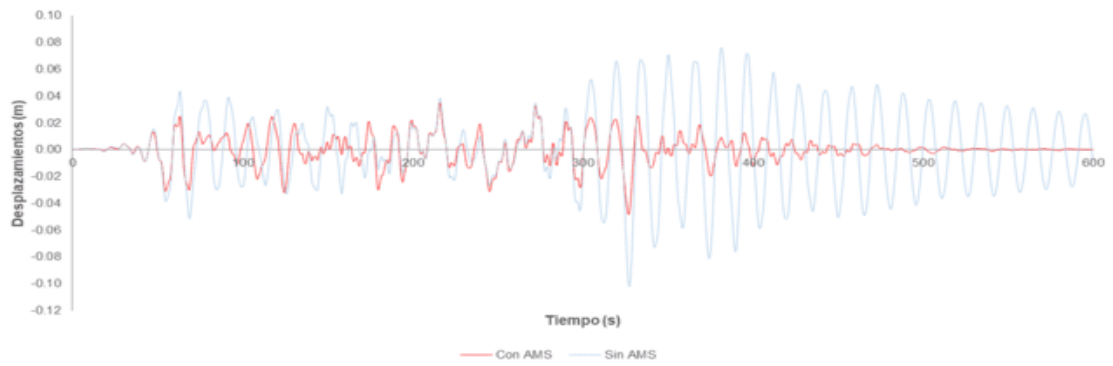
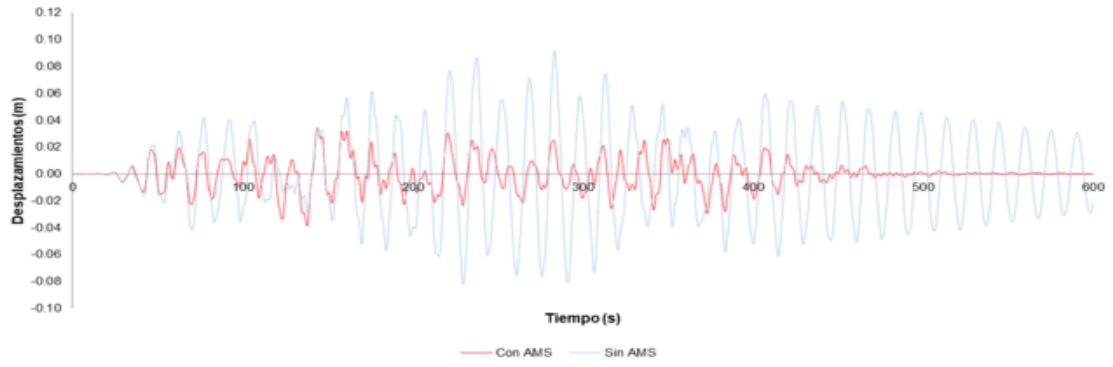
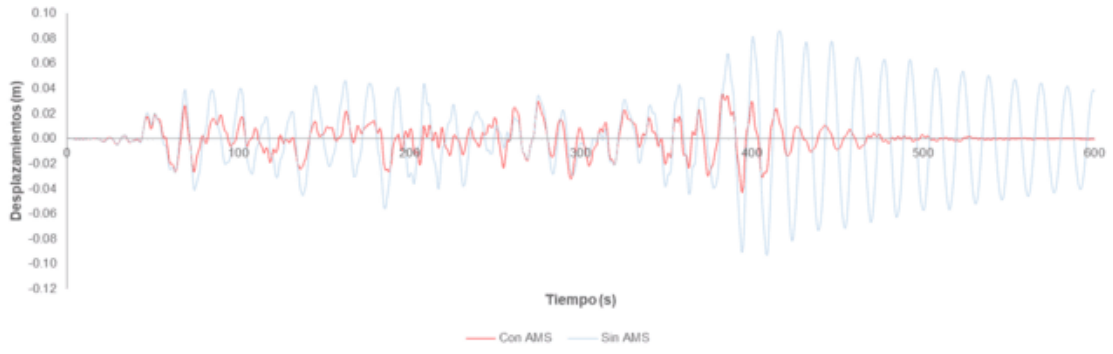
Tabla 6.3. Comparativa de respuestas dinámicas de aceleraciones para Acelerogramas Sintéticos

Acelerogramas Sintéticos	Sin TMD	Con TMD	Porcentaje de reducción (%)
	Aceleración Máxima (m/s ²)	Aceleración Máxima (m/s ²)	
Acelerograma Sintético 1	3.94	3.437	12.77%
Acelerograma Sintético 2	3.93	3.217	18.14%
Acelerograma Sintético 3	3.349	3.074	8.21%
Acelerograma Sintético 4	3.744	3.155	15.73%
Acelerograma Sintético 5	3.712	2.99	19.45%
Acelerograma Sintético 6	3.395	3.214	5.33%
Acelerograma Sintético 7	3.126	2.717	13.08%
Acelerograma Sintético 8	3.489	3.422	1.92%
Acelerograma Sintético 9	4.336	2.499	42.37%
Acelerograma Sintético 10	3.868	3.466	10.39%
Promedio	3.689	3.119	14.74%

En la tabla anterior se aprecia que el promedio de porcentaje de reducción para la respuesta dinámica de aceleraciones para los acelerogramas sintéticos es de 14.74 %.

En la Figura 6.4 se presentan los resultados para desplazamientos.





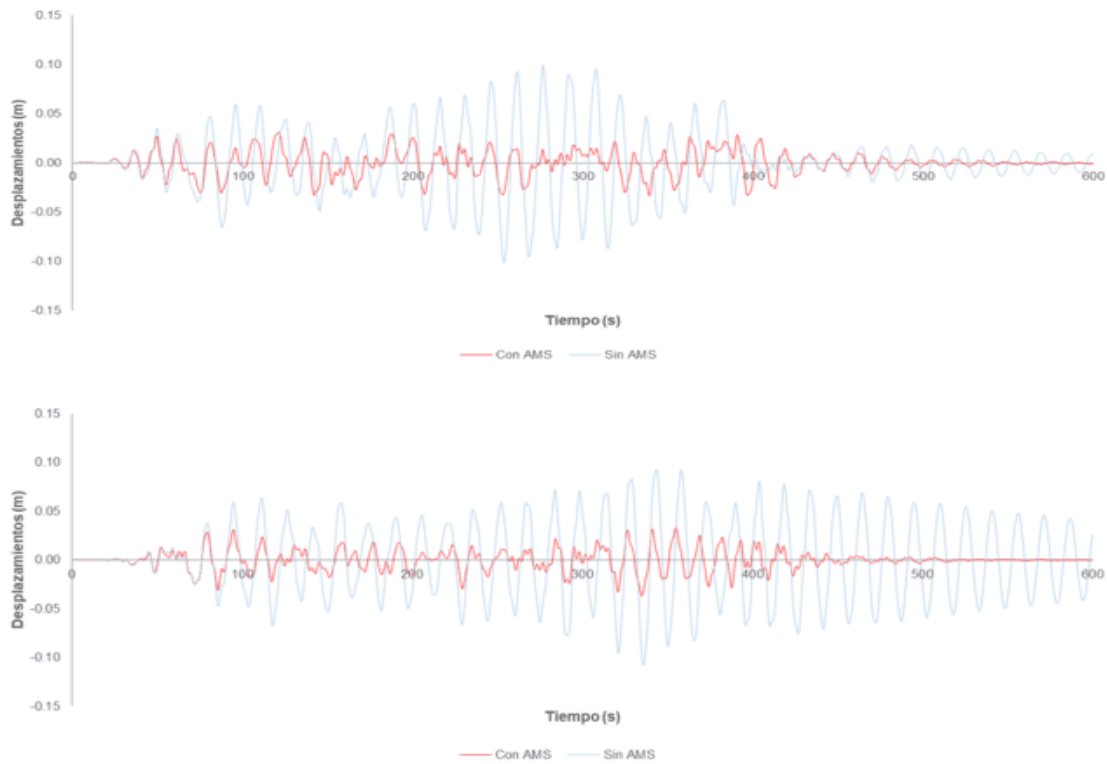


Figura 6.4. Respuesta dinámica de desplazamientos para acelerograma sintético: (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4; (e) 5; (f) 6, (g) 7; (h) 8; (i) 9; (j) 10

De acuerdo con los análisis, se obtienen las respuestas dinámicas máximas por desplazamientos para cada acelerograma sintético. En la Tabla 6.4 se muestra un resumen de éstas, así como, el porcentaje de reducción debido a los efectos del AMS.

Tabla 6.4. Comparativa de respuestas dinámicas de desplazamientos para Acelerogramas Sintéticos

Acelerogramas Sintéticos	Sin TMD	Con TMD	Porcentaje de reducción (%)
	Desplazamiento Máximo (m)	Desplazamiento Máximo (m)	
Acelerograma Sintético 1	0.096	0.044	54.17%
Acelerograma Sintético 2	0.115	0.035	69.57%
Acelerograma Sintético 3	0.100	0.041	59.00%
Acelerograma Sintético 4	0.111	0.044	60.36%
Acelerograma Sintético 5	0.093	0.043	53.76%
Acelerograma Sintético 6	0.092	0.038	58.70%
Acelerograma Sintético 7	0.102	0.048	52.94%
Acelerograma Sintético 8	0.090	0.043	52.22%
Acelerograma Sintético 9	0.102	0.033	67.65%
Acelerograma Sintético 10	0.108	0.037	65.74%
Promedio	0.101	0.041	59.76%

En la tabla anterior se aprecia que el promedio de porcentaje de reducción para la respuesta dinámica de desplazamientos para los acelerogramas sintéticos es de 59.76 %.

6.2 ANÁLISIS NÚMÉRICO VS ANÁLISIS EN PROGRAMA COMERCIAL

De acuerdo con los resultados de los respectivos análisis, tanto numérico como en programa comercial, para obtener las respuestas dinámicas de aceleraciones y desplazamientos del edificio de estudio; en las Tablas 6.5 y 6.6 se presentan las comparativas de porcentajes de reducción obtenidas.

Tabla 6.5. Comparativa de porcentajes de reducción del modelo numérico y el programa comercial para simulaciones de viento turbulento

Modelo	Aceleraciones Máximas (m/s ²)		Porcentaje de reducción (%)	Desplazamientos Máximos (m)		Porcentaje de reducción (%)
	1GDL	2GDL		1GDL	2GDL	
Modelo numérico	1GDL	15.00	57.18%	1GDL	0.96	36.99%
	2GDL	6.42		2GDL	0.61	
Programa comercial	Sin AMS	0.58	45.71%	Sin AMS	0.05	20.51%
	Con AMS	0.30		Con AMS	0.04	

Tabla 6.6. Comparación de respuestas dinámicas para acelerogramas sintéticos

Modelo	Aceleraciones Máximas (m/s ²)		Porcentaje de reducción (%)	Desplazamientos Máximos (m)		Porcentaje de reducción (%)
	1GDL	2GDL		1GDL	2GDL	
Modelo numérico	1GDL	0.18	17.07%	1GDL	0.00029	62.40%
	2GDL	0.15		2GDL	0.00010	
Programa comercial	Sin AMS	3.69	14.74%	Sin AMS	0.10	59.76%
	Con AMS	3.12		Con AMS	0.04	

En la Tabla 6.5 se observa que el modelo numérico presentó una disminución ante simulaciones de viento turbulento del 57.18% en la respuesta dinámica de aceleraciones y 36.99% de desplazamientos; para los acelerogramas sintéticos, resultó en una disminución del 17.07% y 62.40% respectivamente.

Los parámetros óptimos resultantes para la obtención de los resultados anteriores se implementaron en el modelo matemático en el programa comercial ETABS [1]. En la Tabla 6.6 se observan los resultados obtenidos, los cuales presentan una disminución de las respuestas dinámicas del 45.71% para aceleraciones y 20.51% para desplazamientos ante simulaciones de fuerzas de viento turbulento; mientras que, para los acelerogramas sintéticos, obtuvo una disminución del 14.74% y 59.76% en aceleraciones y desplazamientos respectivamente.

CAPÍTULO 7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se presentó el análisis de una estructura esbelta de acero, para emplear el dispositivo denominado Amortiguador de Masa Sintonizada, con la finalidad de obtener los parámetros óptimos necesarios para disminuir la respuesta dinámica de la estructura.

Por medio de la conceptualización del sistema mecánico equivalente a un sistema de uno y dos grados de libertad, y desarrollando un método de análisis de paso a paso en el tiempo, se llegó a la obtención de dichos parámetros por medio del software MATLAB [2].

De manera particular se concluye lo siguiente:

- De los análisis dinámicos empleando simulaciones de fuerzas de viento turbulento, así como, de acelerogramas sintéticos; se observó que la relación de masas μ fue el parámetro óptimo que obtuvo mejores resultados para la disminución de ambas respuestas, resultando $\mu = 20\%$.
- Los parámetros óptimos obtenidos dependen del tipo de respuesta de la estructura; para efecto de simulaciones de viento turbulento, la respuesta de aceleraciones presentó mayor disminución utilizando los parámetros $\mu = 20\%$, $r_f = 94\%$ y $r_\xi = 20\%$, mientras que para la respuesta de desplazamientos fueron $\mu = 20\%$, $r_f = 91\%$ y $r_\xi = 16\%$. Así mismo, para efecto de acelerogramas sintéticos, los parámetros para la respuesta de aceleraciones fueron $\mu = 20\%$, $r_f = 110\%$ y $r_\xi = 1\%$ y para la respuesta de desplazamientos $\mu = 20\%$, $r_f = 90\%$ y $r_\xi = 20\%$.
- En cuanto a la comparación con los resultados obtenidos por medio del programa comercial ETABS [1], se observó que el programa arrojó resultados similares a los obtenidos por el análisis numérico; sin embargo, aunque se presentaron ligeramente mayores porcentajes de disminución de respuesta en este último, se logró demostrar que pueden obtenerse las propiedades del AMS para cualquier estructura mediante este tipo de análisis.
- Se obtuvieron porcentajes de reducción considerables; sin embargo, se presentó una mayor disminución de la respuesta de aceleraciones para efectos de viento turbulento, caso contrario a la respuesta de desplazamientos que presentó mayor disminución para efectos de sismo.

7.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con el estudio de los parámetros óptimos del dispositivo AMS en otro tipo de estructuras para verificar la efectividad de este en la disminución de la respuesta dinámica; también, realizar la investigación presentada en este documento para el dispositivo AMS del tipo péndulo.

REFERENCIAS

- [1] ETABS Software Version 20.0.0, Computers and Structures, Inc. Integrated Building Design Software
- [2] MATLAB Version R2021a, The Language of Technical Computing, The Math Works, Inc.
- [3] Servicio Sismológico Nacional. (2010). Reporte especial 4 de abril del 2010.
- [4] Connor, J. (2002). Introduction to Structural Motion Control. Pearson Education, United States, 1ra edición.
- [5] Cahís, F. (2001). Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sismorresistente. Análisis numérico y validación experimental de su comportamiento.
- [6] Kitamura, H; Teramoto, T. & Kobori, T. (1991) Advanced technology in response control of high-rise buildings. Second Conference on Tall Building in Seismic Regions.
- [7] Dargush, G. F. & Soong, T. T. Recent structural applications of passive energy dissipation in North America. Workshop Technical Papers. ATC-15-5.
- [8] Higashino, M. & Okamoto, S. (2006). Response control and seismic isolation of buildings. CIB/TG44. Taylor and Francis.
- [9] Nagase, T (2000) Earthquake records observed in tall buildings with tuned pendulum mass damper. In: Proceedings from the 12th world conference on earthquake engineering, Auckland, New Zealand
- [10] Soto, M.G. & H. Adeli, Tuned mass dampers. Archives of Computational Methods in Engineering, 2013. 20(4): p. 419-431
- [11] Frahm, H. (1991). Device for damping vibrations of bodies. United States Patent Office.

- [12] Ormondroyd, J; Den Hartog, J.P (1928). The theory of dynamic vibration absorber.
- [13] Den Hartog, J. P. (1956). Mechanical Vibration. McGraw-Hill
- [14] Gupta, Y.P & Chandrasekaren. (1969). Absorber system for earthquake excitation. Fourth world conference on earthquake engineering, Santiago, Chile, Vol. II, 139-148
- [15] Wirsching, P.H & Yao, J.T.P. (1973). Safety design concepts for seismic structures. Computers & structures.3:4, 809-826
- [16] Warburton, G.B & Ayorinde, E.O (1980). Optimum absorber parameters for simple systems. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 8: p.197-217
- [17] Warburton, G.B (1980). Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters
- [18] Thompson, A.G (1981). Journal of Sound and Vibration. 77(3), 403-415
- [19] Sladek, J.R & Klingner, R.E (1983). Using Tuned-Mass Dampers to reduce seismic response
- [20] Villaverde, R. (1985). Reduction in seismic response with heavily-damped vibration absorbers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 13:1, 33-42
- [21] Setareh, M. (1990). Use of tuned mass dampers for the vibration control of floors subjected to human movements [Tesis de Doctorado, Universidad de Michigan].
- [22] Tsai, H; Lin, G.C (1993). Explicit formulae for optimum absorber parameters for force-excited and viscously damped systems. Journal of Sound and Vibration (1994) 176(5), 585-596
- [23] Fujino, Y. & Abé, M. (1993). Design formulas for tuned mass dampers based on a perturbation technique. Earthquake engineering and structural dynamics. Vol 22, 833-854.
- [24] Sadek, F; Mohraz, B; Taylor; A.W. & Chung, R.M. (1997). A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 26:6, 617-635.

[25] J. Osvaldo Martín del Campo, Adrián Pozos-Estrada and Oscar Pozos-Estrada. (2020). Development of fragility curves of land-based wind turbines with tuned mass dampers under cyclone and seismic loading. *Wind Energy*.

[26] Normas Técnicas Complementarias Estructurales de la Ley de Edificaciones de Baja California (2017)

[27]. Ortegón, J. & Pozos, A. (2016). SVTpro Version 1.5. Programa para la simulación de Viento Turbulento en el espacio empleando el modelo ARMA y diferentes FDPE.

[28] Vanmarcke, E. & Gasparini, D. (1990) Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra. SIMQKE-I Software and Manuals. NISEE e-Library, Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

[29] Anil K, Chopra (2014). *Dinámica de Estructuras*. Pearson Education, México. 4ta Edición.