



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTOS DE LOS
AMORTIGUADORES DE MASA
SINTONIZADA EN LA RESPUESTA
SÍSMICA DE ESTRUCTURAS DE
LA CIUDAD DE MÉXICO**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

Ileana Elizabeth Monsalvo Franco

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

*A José Luis, por ti y para ti papá, porque nada hubiera sido posible sin tu apoyo
y porque siempre te llevo en mi mente y en mi corazón.*

*A Teresa, mi felicidad, la persona que más admiro y la mejor mamá del mundo,
por tu apoyo y amor incondicional.*

*A Alondra y Hugo, por todo su apoyo y su confianza en mí. Por las risas, las
locuras y por estar conmigo en las buenas y sobre todo en las malas.*

*A mi abuelita Teresa, porque siempre tengo presente tu enorme cariño y tus
enseñanzas, por ser mi más bonito recuerdo de la infancia.*

*A mi abuelita Rosario, por el enorme cariño, por ser mi ejemplo de fortaleza, el
pilar de la familia y por siempre estar para nosotros.*

*A mi padrino Mario, por estar conmigo incondicionalmente, por el apoyo
infinito y por ser un gran ejemplo para mí en todos los aspectos.*

*A Alam, mi ejemplo, mi motivación y mi compañero de vida, por siempre creer
en mí; por llenar mi vida de felicidad, amor y apoyo incomparables.*

Reconocimientos

A mi asesor de tesis Dr. Héctor Guerrero Bobadilla, por la paciencia, las enseñanzas y por el tiempo que me compartió. Por haber aceptado guiar este trabajo.

A Alam Garcidueñas, por las recomendaciones y por su disposición al enseñarme varias herramientas de ingeniería que me ayudaron a realizar este trabajo.

A todos mis profesores de la Facultad de Ingeniería con los que tuve el placer de tomar clase, por los conocimientos y los consejos transmitidos.

A la Facultad de Ingeniería, por instruir mi desarrollo profesional y por las increíbles experiencias que me regaló.

Y finalmente agradezco enormemente a la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi segundo hogar, por todas las facilidades que permitieron mi crecimiento profesional y sobre todo por los conocimientos tanto académicos como culturales que he tenido desde que ingresé a esta hermosa institución.

Declaración de autenticidad

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Ileana Elizabeth Monsalvo Franco. México, Ciudad de México, 2019

Resumen

En este trabajo se llevó a cabo una investigación sobre la efectividad en el uso de los amortiguadores de masa sintonizada (AMS) en el control de la respuesta lateral en las estructuras debido a excitaciones sísmicas. Particularmente, se enfoca en los AMS del tipo péndulo, presentándolos como una opción factible para aumentar la seguridad en las estructuras. Se presentaron las ecuaciones que definen el movimiento de un sistema estructural de un grado de libertad con este tipo de dispositivos. Realizando ciertas simplificaciones, estas ecuaciones se resolvieron mediante el uso de un método numérico y para el movimiento sísmico de mayor intensidad registrado en la Ciudad de México. Los resultados obtenidos permitieron encontrar valores óptimos en los parámetros del AMS, los cuales indicaron que, efectivamente, es una opción factible para disminuir los desplazamientos laterales en las estructuras. Los resultados obtenidos con el método propuesto también fueron comparados con modelos hechos en un programa comercial; comprobando la efectividad del método y del AMS para modelos de uno y varios grados de libertad.

Abstract

In this work a study on the effectiveness that a tuned mass damper (TMD) has in the control of the lateral displacement due to seismic excitations is presented. Particularly, this work focuses on the pendulum TMD as a feasible option to increase safety of structures. The equations of motion for a single degree of freedom structural system with these kind of devices were defined. These equations were solved making some simplifications with a numerical method and for the largest ever recorder seismic ground motion in Mexico City. The obtained results allowed finding the optimal parameters of the TMD, and showed that, in fact, it is a feasible alternative for reducing lateral displacements of structures. The obtained results were also compared against those obtained in a finite element program, showing the effectiveness of both the proposed method and the TMD for a single and multi-degree-of-freedom systems.

Índice general

Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XVII
Nomenclatura	XIX
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivo	3
1.3. Alcances y limitaciones	3
1.4. Organización de la tesis	4
2. Revisión Bibliográfica	5
2.1. Antecedentes	5
2.1.1. Conceptos de Dinámica Estructural	5
2.1.2. Grados de libertad	6
2.1.3. Ecuaciones del movimiento	8
2.2. Sistemas de control de vibraciones	10
2.2.1. Amortiguador de masa sintonizada	11
2.2.2. Tipos de AMS	12
2.2.2.1. Amortiguador de masa sintonizada traslacional	12
2.2.2.2. Amortiguador de masa sintonizada tipo péndulo	24
3. Selección y filtrado de movimiento sísmico	33
4. Modelo de estructura de un grado de libertad	35
4.1. Análisis numérico	35
4.2. Análisis con programa comercial de elementos finitos	40
5. Modelo de estructura de varios grados de libertad	43
5.1. Análisis numérico	43

ÍNDICE GENERAL

5.2. Análisis sísmico	43
6. Análisis numérico con el método propuesto	49
6.1. Estructura de un grado de libertad con $T_n = 1.4s$	49
6.2. Estructura de un grado de libertad con $T_n = 2s$	59
7. Análisis con programa comercial de elementos finitos	73
7.1. Estructura de un grado de libertad con $T_n = 1.4s$	73
7.1.1. Estructura de un grado de libertad con $T_n = 2s$	74
7.2. Estructura de varios grados de libertad con $T_n = 1.4s$	77
7.2.1. Estructura de varios grados de libertad con $T_n = 2s$	80
8. Conclusiones y recomendaciones	83
Referencias	87

Índice de figuras

2.1. Ejemplo de vibración mecánica.	6
2.2. Sistema de un grado de libertad.	7
2.3. Componentes de un sistema de un grado de libertad con fuerza externa actuante.	8
2.4. Torre CN.	15
2.5. Torre Hancock.	15
2.6. City Group Center.	16
2.7. Torre Taipei.	16
2.8. Diagrama sistemático de un amortiguador de masa sintonizada traslacional.	17
2.9. Sistema de un grado de libertad acoplado a un AMS.	17
2.10. Amortiguador dinámico de vibraciones propuesto por Frahm.	18
2.11. Amortiguador de masa sintonizada tipo péndulo simple con excitación sísmica.	24
2.12. Sistema AMS mixto sujeto a una fuerza lateral.	25
2.13. Sistema AMS mixto sujeto a una aceleración en la base.	26
2.14. Geometría sistemática del modelo AMS tipo péndulo con amortiguador y resorte auxiliar.	27
2.15. Torres delta con AMS tipo péndulo adaptado.	28
2.16. Torres delta con AMS tipo péndulo adaptado, sistema mecánico simplificado análogo.	28
2.17. AMS tipo péndulo simple.	29
2.18. AMS tipo péndulo incorporado a una estructura de un grado de libertad.	30
3.1. Registro sísmico 19 de septiembre 2017, estación Culhuacán.	34
3.2. Espectro de respuesta sismo 19 de septiembre de 2017, estación Culhuacán.	34
4.1. Diagrama de modelo de marco bidimensional con AMS tipo péndulo	37

ÍNDICE DE FIGURAS

4.2. Método de Diferencia Central aplicado a un sistema estructural con AMS tipo péndulo incorporado	38
4.3. Modelo en SAP2000[1] de estructura de un grado de libertad con AMS tipo péndulo.	41
5.1. Distribución de elementos estructurales para el modelo de edificio con $T_n = 1.4s$	44
5.2. Distribución de elementos estructurales para el modelo de edificio con $T_n = 2s$	45
5.3. Estructura de 11 niveles con AMS tipo péndulo modelada en SAP2000[1], $T_n = 1.4s$	46
5.4. Estructura de 17 niveles con AMS tipo péndulo modelada en SAP2000[1], $T_n = 2s$	47
6.1. Desplazamientos máximos del sistema vs longitud del AMS para $T_n = 1.4s$	50
6.2. Desplazamientos máximos del AMS vs longitud del AMS para $T_n = 1.4s$	53
6.3. Desplazamientos de la estructura principal lo largo del tiempo con y sin AMS $T_n = 1.4s$	54
6.4. Desplazamientos de la estructura principal lo largo del tiempo con y sin AMS $T_n = 1.4s$	56
6.5. Espectros de respuesta con y sin AMS para longitudes de 132, 128 y 112 centímetros.	58
6.6. Desplazamientos máximos del sistema vs longitud del AMS para $T_n = 2s$	60
6.7. Desplazamientos máximos del sistema vs longitud del AMS para $T_n = 2s$	62
6.8. Desplazamientos de la estructura principal lo largo del tiempo con y sin AMS $T_n = 2s$	64
6.9. Desplazamientos AMS y estructura principal a lo largo del tiempo para $T_n = 2s$	66
6.10. Espectro de respuesta con y sin AMS para longitudes de 24, 28 y 43 cm.	68
6.11. Comparación de espectro de respuesta con y sin AMS entre las longitudes óptimas de cada relación de masas.	71
7.1. Desplazamientos estructurales mediante SAP2000[1] con y sin AMS $T_n = 1.4s$	75
7.2. Desplazamientos estructurales mediante SAP2000[1] con y sin AMS $T_n = 2s$	76

7.3. Desplazamientos estructurales mediante SAP2000[1] para edificio con $T_n = 1.4s$	78
7.4. Desplazamientos estructurales mediante SAP2000[1] para edificio con $T_n = 2s$	82

Índice de tablas

2.1. Sistemas de control de vibraciones.	11
2.2. Aplicaciones de amortiguadores de masa sintonizada.	13
2.3. Aplicaciones de amortiguadores de masa sintonizada.	14
4.1. Propiedades dinamicas del marco en 2D con $T_n = 1.4$ segundos . .	36
4.2. Propiedades dinámicas del marco en 2D con $T_n = 2$ segundos . . .	36
5.1. Propiedades dinamicas de edificio de 11 niveles	44
5.2. Propiedades dinamicas de edificio de 17 niveles	45

Nomenclatura

Símbolos griegos

α	ángulo de llegada del viento
β_d	fracción de amortiguamiento del amortiguador de masa sintonizada
$\ddot{\Delta}_r$	aceleraciones en la estructura principal excepto del punto de suspensión
$\ddot{\Delta}$	vector de aceleraciones del sistema principal
$\ddot{\theta}$	aceleración rotacional
Δ	vector de desplazamientos de la estructura principal
Δ_r	desplazamientos en la estructura principal excepto del punto de suspensión
$\dot{\Delta}_r$	velocidades en la estructura principal excepto del punto de suspensión
$\dot{\Delta}$	vector de velocidades del sistema principal
$\dot{\theta}$	velocidad rotacional
μ	relación de masas, masa del amortiguador de masa sintonizada sobre masa estructura principal
ω	frecuencia de excitación (rad/s)
ω_d	frecuencia natural de vibración del péndulo
ω_e	frecuencia de la excitación por viento (rad/s)
θ	rotación del péndulo alrededor de un eje horizontal
φ	rotación respecto al eje vertical
ζ	fracción de amortiguamiento

NOMENCLATURA

Otros

\ddot{u}_d	aceleración del amortiguador de masa sintonizada
\ddot{u}_g	aceleración del terreno (o de un apoyo)
\ddot{u}	aceleración
\dot{u}_d	velocidad del amortiguamiento del amortiguador de masa sintonizada
\dot{u}	velocidad
C	coeficiente de amortiguamiento del sistema estructural principal
c	coeficiente de amortiguamiento
c_d	coeficiente de amortiguamiento del amortiguador de masa sintonizada
c_x	coeficiente de amortiguamiento en la dirección x
c_y	coeficiente de amortiguamiento en la dirección y
E	modulo de elasticidad
f_D	fuerza de amortiguamiento
f_I	fuerza de inercia
f_S	fuerza restauradora elástica o inelástica
g	aceleración debida a la gravedad
I	momento de inercia
I_d	momento de inercia del amortiguador de masa sintonizada
K	rigidez del sistema estructural principal
k	rigidez
k_d	rigidez del amortiguador de masa sintonizada
k_{eq}	rigidez equivalente del péndulo
k_x	rigidez en la dirección x
k_y	rigidez en la dirección y
L	longitud del péndulo

M	masa del sistema estructural principal
m	masa
m_d	masa del amortiguador de masa sintonizada
P	fuerza externa
P_0	amplitud de $P(t)$
P_r	fuerza de excitación arbitraria en la estructura principal excepto del punto de suspensión
T	tensión
t	tiempo
T_d	periodo natural de vibración del péndulo
u	desplazamiento; deformación; desplazamiento relativo al terreno
u_d	desplazamiento del amortiguador de masa sintonizada
v	velocidad
w_d	peso del péndulo

1.1. Planteamiento del problema

En la Ciudad de México, que se ubica sobre el ex-lago de Texcoco, se han presentado varios eventos sísmicos de diferentes características y diversas intensidades; que han provocado grandes pérdidas materiales y humanas. Pese a su ubicación, con gran distancia epicentral (280 a 600 km), la ciudad es particularmente vulnerable ante sismos de subducción porque el tipo de ondas que llegan son ricas en periodos largos que sufren menos atenuación y experimentan gran amplificación al atravesar las arcillas del lago [2]. Por ello, prácticamente cualquier sismo grande que ocurra en la zona de subducción, desde Jalisco hasta Oaxaca, representa un peligro importante para las estructuras erigidas en la zona lacustre de la ciudad [2]. Aunque estos sismos sean más conocidos y estudiados, existen también sismos intraplaca y locales que podrían provocar daños significativos en la zona de lomas y de transición. Sin embargo, a pesar de la vulnerabilidad, la ciudad crece de manera exponencial, por ello se requiere cada vez más construir verticalmente, cada vez está más presente la necesidad de construir edificios más resistentes a eventos sísmicos, edificios que presenten menos efectos indeseables

1. INTRODUCCIÓN

ante estas acciones. Hoy en día existen distintos métodos para lograrlo.

El aislamiento de base, por ejemplo, es un sistema que ayuda a reducir los efectos indeseables asociados a toda vibración. Un sistema de aislamiento de vibraciones puede ser activo o pasivo, dependiendo de si se precisa una fuente externa de energía o no para que lleve a cabo su función [3]. Un sistema pasivo no depende de una fuente externa de energía para su funcionamiento; lo que representa una ventaja sobre los sistemas activos.

Por otro lado, los amortiguadores de masa sintonizada (AMS) son dispositivos que consisten en una masa que es incorporada a una estructura con el fin de reducir la respuesta dinámica por medio de un elemento de rigidez conocida. La frecuencia del amortiguador es sintonizada a una frecuencia estructural de la estructura principal y así, cuando esa frecuencia es excitada el amortiguador resonará en contrafase con el movimiento estructural; la energía es disipada mediante la fuerza de inercia del amortiguador actuando en la estructura [4].

En estas técnicas de disipación de energía las edificaciones se complementan con sistemas adicionales a sus componentes estructurales, los cuales modifican las características dinámicas de la estructura, controlando o disipando parte de la energía impuesta por el sismo. El uso de estas técnicas de control de respuesta sísmica tiene como objetivo reducir la demanda sísmica de la propia estructura controlando su deformación y, por lo tanto, su daño [5].

En el presente trabajo se estudia el efecto de la incorporación de amortiguadores de masa sintonizada tipo péndulo en dos sistemas estructurales, uno de un grado de libertad y otro de varios grados de libertad. Dichos sistemas estructurales se suponen en la Ciudad de México. Dado que no existen estudios certeros acerca de la efectividad de estos dispositivos en el Valle de México, se pretende

contribuir a los trabajos ya desarrollados sobre este tema para así tener cada vez más información que permita la posibilidad de desarrollar esta tecnología en una zona tan vulnerable como es la capital de nuestro país.

1.2. Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el uso de amortiguadores de masa sintonizada tipo péndulo para controlar la respuesta lateral de sistemas estructurales sujetos a una excitaciones sísmicas características de la Ciudad de México. Se hace uso del registro de aceleraciones con mayor intensidad registrado en la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre del 2017. Como objetivo secundario se busca también incentivar la continuación del estudio de amortiguadores de masa sintonizada para poder tener certeza sobre su desempeño y ampliar el número de alternativas que permita una mayor resiliencia de las estructuras de la Ciudad de México.

1.3. Alcances y limitaciones

De acuerdo a los objetivos planteados, en este trabajo se presentan los efectos que tienen los amortiguadores de masa sintonizada (AMS) del tipo péndulo en estructuras de uno y varios de grados de libertad bajo excitaciones sísmicas registradas en la Ciudad de México. Se considera que tanto el amortiguador como la estructura principal permanecen elásticos durante la excitación. Se realiza un análisis de equilibrio dinámico y los resultados se comparan con los obtenidos con el programa SAP2000[1]. Se usa el movimiento sísmico registrado en la estación

sísmologica Culhuacán el 19 de septiembre de 2019. Se estudian estructuras de uno y varios grados de libertad.

1.4. Organización de la tesis

Esta tesis inicia con este capítulo introductorio.

En el capítulo 2 se describen conceptos necesarios sobre dinámica estructural, además, se se realiza una revisión de resultados que han tenido diversos autores en cuanto la efectividad del Amortiguador de Masa Sintonizada (AMS).

El capítulo 3 presenta el desarrollo de un método numérico propuesto para representar el comportamiento de un sistema estructural con AMS tipo pédulo integrado. Se describe la forma en que se realizaron los análisis y las características y consideraciones de los modelos utilizados.

En el Capítulo 4 se presentan y analizan los resultados de aplicar el método numérico propuesto en estructuras de varios grados de libertad. También se presentan los resultados obtenidos en SAP2000[1] y se realizan las comparaciones.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas con el desarrollo de este trabajo.

Revisión Bibliográfica

2.1. Antecedentes

2.1.1. Conceptos de Dinámica Estructural

La dinámica, dentro del contexto de la mecánica, es el estudio de los cuerpos, o conjuntos de partículas, en movimiento. La dinámica se divide en dos campos: la cinemática y la cinética. La cinemática estudia la geometría del movimiento, relacionando el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y el tiempo, sin hacer referencia a las causas del movimiento. La cinética estudia la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, la masa del cuerpo y su movimiento, permitiendo predecir los movimientos que causan las fuerzas, o determinar las fuerzas necesarias para producir un movimiento dado [6].

Cuando un cuerpo se desplaza de una posición de equilibrio estable éste tiende a volver a esta posición al verse afectado por la acción de fuerzas que tienden a restablecer la situación de equilibrio, presentándose una oscilación alrededor del denominado punto de equilibrio. Estas oscilaciones en el campo de la mecánica se denominan vibraciones mecánicas [6]. Un ejemplo de vibración mecánica se

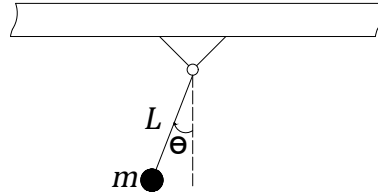


Figura 2.1: Ejemplo de vibración mecánica. El péndulo simple es una estructura, idealizada, compuesta por una masa que está suspendida en un punto fijo, mediante un hilo inextensible sin peso. Si le imponemos un desplazamiento a la masa esta oscilará alrededor del punto fijo que es el punto de equilibrio de manera indefinida y sin llegar al estado de reposo (adaptada de[4]).

puede observar en la figura 2.1.

Si el cuerpo se considera como una unidad y se desprecian las deformaciones relativas entre sus diferentes partes, se aplican los principios de la dinámica de cuerpos rígidos. Cuando es apropiado tener en cuenta los desplazamientos relativos entre las diferentes partes del cuerpo, se aplican los principios de la dinámica de cuerpos flexibles.

La dinámica estructural estudia las vibraciones de cuerpos flexibles. Aunque en muchos casos las deformaciones relativas entre algunas partes de la estructura son de un orden de magnitud tan pequeño, pueden aplicarse los principios de la dinámica de cuerpos rígidos [6].

2.1.2. Grados de libertad

El número de grados de libertad de un sistema, desde el punto de vista de la dinámica, corresponde al número mínimo de coordenadas necesarias para definir la posición en el espacio y en el tiempo de todas las partículas de masa del sistema. Cuando se trata de sistemas rígidos, en los cuales no puede haber des-

plazamiento relativo entre las partículas de masa, las propiedades de la masa se pueden describir referidas a su centro de masa. Esto conduce a lo que se conoce como sistemas de masa concentrada. Cuando se habla de la masa de un elemento flexible tenemos un sistema de masa distribuida y por consiguiente se puede hablar de un número infinito de grados de libertad [7].

Para el análisis dinámico puede considerarse que una estructura de un nivel tiene un solo grado de libertad cuando asumimos a la masa concentrada en un punto, que generalmente está en el nivel del techo.

La figura 2.2 es un modelo idealizado de una estructura de un nivel, la cual sólo puede moverse en la dirección de la excitación y aunque en realidad cada elemento estructural (viga, columna, muro, etcétera) contribuye a las propiedades inerciales (masa), elásticas (rigidez o flexibilidad) y de disipación de la energía (amortiguamiento) de la estructura, aquí la rigidez, masa y amortiguamiento se representan con un solo elemento distinto [8].

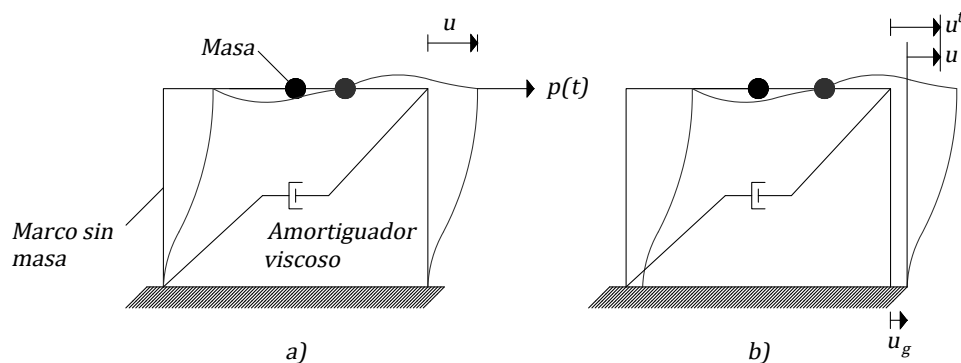


Figura 2.2: Sistema de un grado de libertad: (a) fuerza aplicada $p(t)$; (b) movimiento del terreno inducido por un sismo (adaptada de [8]).

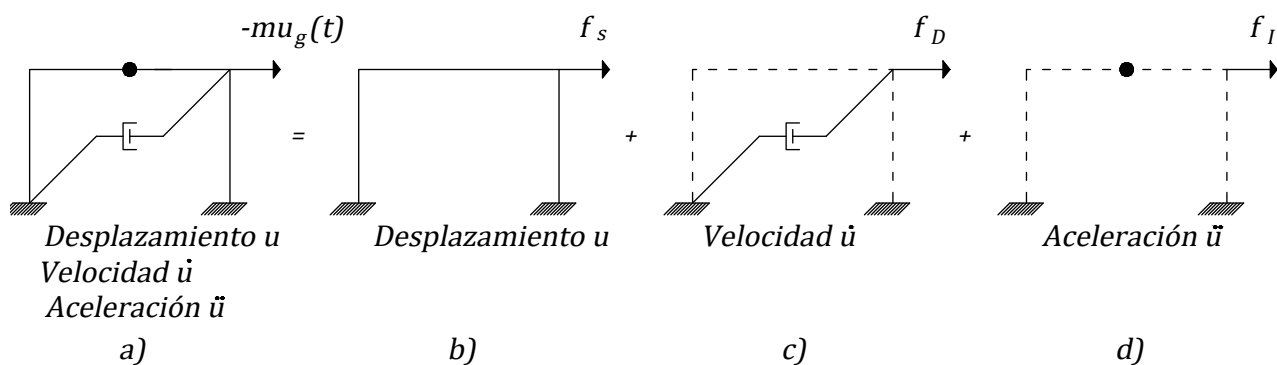


Figura 2.3: Componentes de un sistema de un grado de libertad con fuerza externa actuante: (a) Sistema; (b) componente de rigidez; (c) componente de amortiguamiento; (d) componente de masa (adaptada de [8]).

2.1.3. Ecuaciones del movimiento

Cuando una estructura de un grado de libertad es sometida a un movimiento del terreno en el que se apoya, se generan fuerzas en la estructura que se oponen al movimiento. Estas fuerzas se muestran en la figura 2.3 y son: 1) Las fuerzas de la estructura (f_s); 2) Las fuerzas disipadoras (f_D) y 3) Las fuerzas de inercia (f_I).

Las fuerzas de este sistema, considerado un sistema lineal, se describen mediante las relaciones de desplazamiento $u(t)$, velocidad $\dot{u}(t)$ y aceleración $\ddot{u}(t)$. La ecuación del movimiento es:

$$f_I + f_D + f_s = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.1)$$

De acuerdo a la figura 2.3 y a la ecuación 2.1, la fuerza externa está distribuida

en tres componentes puros del sistema:

- Componente de rigidez. Representada por el marco sin amortiguamiento o masa, figura 2.3 b. Dado que el sistema es elástico lineal la relación entre la fuerza lateral f_S y la deformación resultante u es lineal, es decir,

$$f_S = ku \quad (2.2)$$

Donde k es la rigidez lateral del sistema.

- Componente de amortiguamiento: Representada por el marco con su propiedad de amortiguamiento, pero sin rigidez o masa, figura 2.3 c. La fuerza de amortiguamiento de f_D se relaciona con la velocidad \dot{u} a través del amortiguador viscoso lineal por:

$$f_D = c\dot{u} \quad (2.3)$$

Donde c es el coeficiente de amortiguamiento viscoso y está dado por:

$$c = 2\zeta km \quad (2.4)$$

y ζ es un porcentaje de amortiguamiento crítico, menor a 0.10 generalmente para sistemas subamortiguados.

- Componente de masa: La masa del techo sin la rigidez o el amortiguamiento del marco, figura 2.3 d. La fuerza externa f_I sobre el componente de masa se relaciona con la aceleración \ddot{u} por:

$$f_I = m\ddot{u} \quad (2.5)$$

2.2. Sistemas de control de vibraciones

El control de la vibración estructural contra las fuerzas naturales es un campo en rápido crecimiento y hoy en día se ha ideado una familia de sistemas y tecnologías de control que incluye los sistemas pasivos, activos, semi-activos e híbridos [9].

Los sistemas pasivos se componen de dispositivos mecánicos que disipan una parte de la energía que entra a una estructura, de esta forma se reduce su respuesta y por lo tanto posibles daños estructurales. Son usados para mitigar vibraciones estructurales provocadas por excitaciones sísmicas y por viento. Estos sistemas no requieren una fuente externa de energía ni tampoco algún tipo de mecanismo que monitoree o mida la respuesta estructural [9].

Los sistemas de control activo se definen como sistemas que requieren una fuente de energía relativamente grande para su funcionamiento.

Un sistema semi-activo es básicamente un dispositivo pasivo de control de vibraciones, al cual se le adaptan distintos sistemas que mejoran su funcionamiento y permiten mayor eficiencia. Estos sistemas obtienen información acerca de la excitación y de la respuesta estructural en tiempo real, para así ajustar el comportamiento del amortiguador pasivo y mejorar su rendimiento [9].

Los sistemas híbridos son una combinación de sistemas pasivos y activos actuando en conjunto.

Como resumen, la Tabla 2.1 muestra la familia de sistemas de control de vibraciones y sus subcategorías.

Tabla 2.1: Sistemas de control de vibraciones (adaptado de [9]).

Pasivos	Activos	Semi-activos	Híbridos
Disipadores de energía	Control adaptativo	Disipadores de energía semi-activos	Refuerzo Híbrido
Aislamiento de base	Refuerzo activo	Aislamiento semi-activo	Aislamiento activo
Amortiguador de masa sintonizada	Amortiguamiento de masa activa	Amortiguamiento de masa semi-activa	Amortiguamiento de masa Híbrida

2.2.1. Amortiguador de masa sintonizada

Un amortiguador de masa sintonizada (AMS) es un dispositivo de control pasivo que consiste en un resorte que actúa como elemento de rigidez, al cual se le incorpora una masa y generalmente algún elemento amortiguador viscoso incorporado a un sistema principal con la intención de reducir vibraciones indeseables que se puedan presentar [9]. La idea central detrás de los amortiguadores de masa sintonizados es adjuntar un oscilador secundario cuidadosamente elegido a un oscilador primario, de modo que una parte de la energía vibratoria del oscilador primario se transfiera al oscilador secundario que disipará esta energía [10].

Es recomendable usar un AMS como un sistema de control de vibraciones debido a que algunas estructuras tienen un diseño muy robusto; los AMS no se afectan por altas temperaturas, proporciona un amortiguamiento considerable a la estructura y además es relativamente de bajo costo [9]. Pero la principal ventaja es que pueden ser colocados en estructuras existentes con problemas de

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

vibraciones excesivas que son perceptibles por las personas o para el mejoramiento de la seguridad sísmica en estructuras levemente dañadas o sanas [11].

Estos dispositivos están siendo ampliamente usados aplicaciones reales para proteger las estructuras contra acciones sísmicas y de viento. Algunos ejemplos de estructuras con AMS integrado que podemos encontrar y que usan este sistema para los dos tipos de acciones mencionadas son: la Torre C N en Toronto, Canadá; Torre John Hancock en Boston, Estados Unidos; Citicorp Center en la Ciudad de Nueva York, Estados Unidos; Torre Taipei 101 en Taipei, Taiwan; y Puente Millennium en Londres, Inglaterra; mostrados en las figuras 2.4 a 2.7. Las Tablas 2.2 y 2.3 presentan algunos otros edificios alrededor del mundo que cuentan con AMS.

2.2.2. Tipos de AMS

Existen dos principales tipos de amortiguadores de masa sintonizada, los traslacionales y los tipo péndulo.

2.2.2.1. Amortiguador de masa sintonizada traslacional

La manera típica de representar este tipo de sistema es mediante una masa, que descansa sobre unas ruedas que la permiten trasladarse lateralmente respecto al piso. Entre la masa y los miembros adjuntos de soporte vertical se insertan resortes y amortiguadores que transmiten la fuerza que se encuentra fuera de fase al nivel del piso y luego al marco estructural [4]. La figura 2.8 muestra un diagrama sistemático de un AMS traslacional.

Para poder obtener las ecuaciones del movimiento de un sistema como este, consideremos el diagrama del sistema completo que se muestra en la figura 2.9,

Tabla 2.2: Aplicaciones de amortiguadores de masa sintonizada (adaptado de [9]).

Nombre	Ciudad/País	Altura	Año	Frecuencia/Masa
Torre CN	Toronto, Canadá	553	1973	-
John Hancock	Boston, EUA	244	1977	0.14Hz/2x300t
City Corp Center	Nueva York, Estados Unidos	278	1978	0.16Hz/370t
Torre Sydney	Sydney, Australia	305	1980	0.19, 0.50Hz/20t
Torre de Al Khobar	Saudi Arabia	120	1982	0.44Hz/7t
Ruwais Utilities chimney	Abu Dhabi	-	1982	0.49Hz/10t
Torre Deutsche Bundespost Cooling	Nurnberg, Alemania	278	1982	0.67Hz/1.5t
Yanbu Cement Plant Chimney	Saudi Arabia	81	1984	0.49Hz/10t
Generador eólico Hydro-Quebec	Canadá	-	1985	0.7-1.2Hz/18t
Torre Chiba Port	Chiba, Japón	125	1986	0.43-0.44Hz/10,15t
Puente Aratsu	Japan	-	1987	-
Puente Yokohama	Yokohama, Japón	-	1988	-
Central de energía térmica Bin Qasim	Pakistan	70	1988	0.99Hz/4.5t
Tiwest Rutile Plant Chimney	Australia	43	1989	0.92Hz/0.5t
Torre Fukuoka	Fukuoka, Japón	151	1989	0.31-0.33Hz/25,30t
Rascacielos Higashiyama	Nagoya, Japón	134	1989	0.49-0.45Hz/20t
Puente Bannaguru	Japón	-	1990	-
Torre Crystal	Osaka, Japón	157	1990	0.24-0.28Hz/180,360t
Huis Ten Bosch Domtoren	Nagasaki, Japón	-	1990	0.65-0.67Hz/7.8t
Rascacielos Hibikiryokuchi	Kitakyushu, Japón	135	1991	-
HKW Chimney	Frankfurt, Alemania	120	1992	0.86Hz/10t
BASF Chimney	Antwerp Bélgica	100	1992	0.34Hz/8.5t

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Tabla 2.3: Aplicaciones de amortiguadores de masa sintonizada (adaptado de [9]).

Central eléctrica Siemens	Killingholme, Reino Unido	70	1992	0.88Hz/7t
Rokko Island P and G	Kobe, Japón	117	1993	0.33-0.62Hz/270t
Torre Chifley	Sydney, Australia	209	1993	400t
Al Taweeiah Chimney	Abu Dhabi	70	1993	1.4Hz/1.35t
Akita Tower	Akita, Japón	112	1994	0.41Hz
Burj Al-Arab	Dubai	-	1999	-
Puente Millennium	Londres, Inglaterra	-	2001	1.2Hz/1t
Spire of Dublin	Dublin, Irlanda	-	2003	-
Taipei 101	Taiwan	-	2004	730t
Torre Air Traffic Control (ATC)	Delhi, India	102	2015	50t

el cual está compuesto por una estructura principal de un grado de libertad con masa, M , y componentes de amortiguamiento y rigidez, C y K , respectivamente, a la que se le agrega un AMS con masa, m_d , amortiguamiento, c_d , y rigidez, k_d . La estructura principal está sometida a una excitación provocada por la aceleración del suelo \ddot{u}_g y el AMS describe un desplazamiento u_d , velocidad \dot{u}_d y aceleración \ddot{u}_d .

Las ecuaciones que describen el movimiento del sistema de la figura 2.9 son:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku - c_d\dot{u}_d - k_d u_d = -m\ddot{u}_g \quad (2.6)$$

$$m_d\ddot{u}_d + c_d\dot{u}_d + k_d u_d + m_d\ddot{u} = -m_d\ddot{u}_g \quad (2.7)$$



Figura 2.4: Torre CN (tomado de [9]).



Figura 2.5: Torre Hancock (tomado de [9]).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA



Figura 2.6: City Group Center (tomado de [9]).

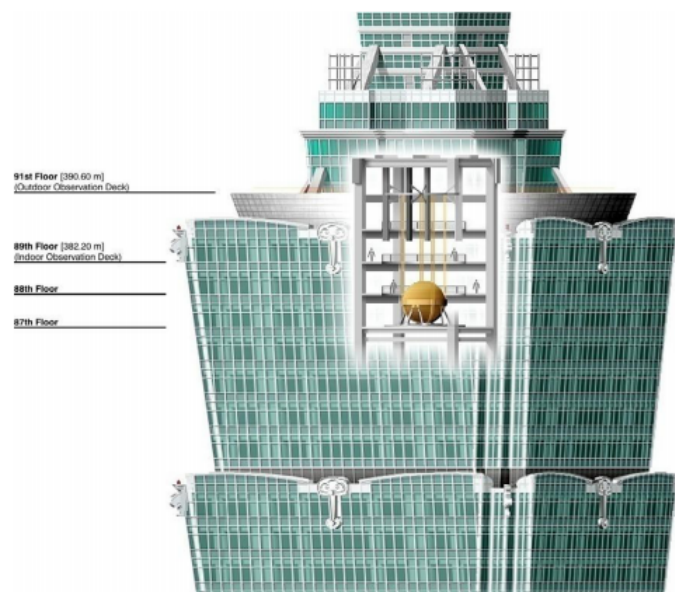


Figura 2.7: Torre Taipei (tomado de [9]).

Las cuales se resuelven por algún método numérico para obtener la respuesta de la estructura principal que se espera sea reducida.

Los AMS traslacionales han sido bastante estudiados por una gran cantidad

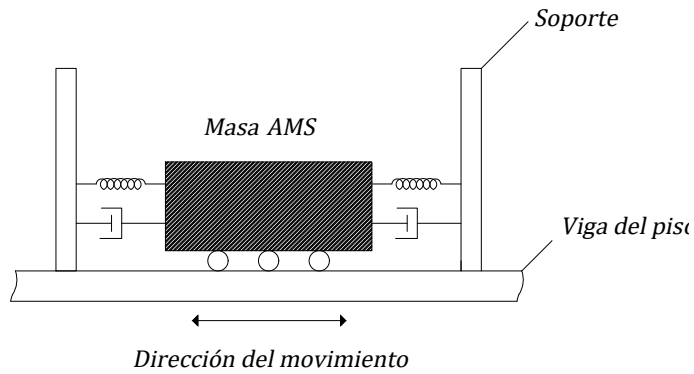


Figura 2.8: Diagrama sistemático de un amortiguador de masa sintonizada traslacional (adaptado de [4])

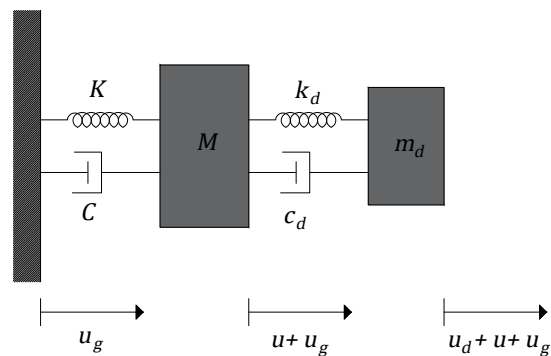


Figura 2.9: Sistema de un grado de libertad acoplado a un AMS (adaptado de [4]).

de autores. Desde el siglo pasado se han hecho estudios numéricos y experimentales para evaluar la efectividad de este sistema en la reducción de la respuesta sísmica de las estructuras [12]. Su estudio comenzó con Frahm en 1909, quien intentó usar un amortiguador de resorte para controlar el balanceo de los barcos. Un sistema masa-resorte sin amortiguamiento demostró ser el adecuado para es-

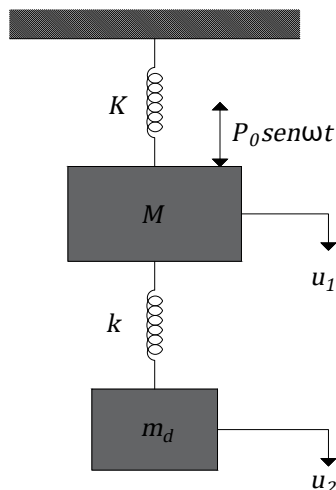


Figura 2.10: Amortiguador dinámico de vibraciones propuesto por Frahm (adaptado de [13]).

tabilizar la amplitud del sistema principal casi a cero para una sola frecuencia [9]. El amortiguador diseñado por Frahm se muestra en la figura 2.10, en el cual se muestra la máquina sobre la que actúa la fuerza $P_0 \text{sen} \omega t$. El amortiguador de vibraciones consiste en un sistema $k_d - m_d$ que es incorporado a la masa M y cuya frecuencia $\sqrt{k/m_d}$ tenía que ser sintonizada a la frecuencia de la excitación [13]. Ambas frecuencias tenían que conocerse con certeza y es una de las razones por las que su uso era muy limitado [3].

Den Hartog [13] continuó con el estudio del sistema de la figura 2.10 y demostró que cuando el amortiguador se sintoniza a la frecuencia de la excitación, la amplitud de vibración del sistema principal de masa M es nula y se dice que toda la energía fué transferida al amortiguador. Además, él y Ormondroyd [14] dedujeron que para un sistema de un grado de libertad no amortiguado existen dos valores de frecuencia en los cuales su respuesta es independiente del valor

de amortiguamiento del AMS incorporado. Gracias a ello, desarrollaron expresiones para determinar parámetros óptimos de sintonización y abrieron paso a numerosos estudios enfocados en determinar los valores óptimos de absorción.

Crandall y Mark [15] también discutieron la eficiencia de estos dispositivos en cuanto al control de la vibración aleatoria en sistemas mecánicos. Ellos obtuvieron como resultado que el AMS reduce la vibración de una estructura de un grado de libertad, que es excitada en su base por medio de ruido blanco (como modelo de excitación sísmica). Los dos componentes del sistema fueron considerados con amortiguamiento del tipo viscoso.

Wirsching y Campbell [16] también estudiaron la reducción de la respuesta de los sistemas estructurales bajo una excitación aleatoria, mediante el uso de AMS. Se concluyó que el sistema era efectivo en la reducción de las deformaciones de la estructura para sistemas de uno y varios grados de libertad teniendo una excitación de ruido blanco en la base (como modelo de excitación sísmica). Los autores encontraron que para sistemas de un grado de libertad se puede reducir la respuesta hasta un 31 % con una relación de masas (masa del AMS/masa de la estructura principal) de 0.1 y un coeficiente de amortiguamiento de la estructura principal de 0.05. Incluso, mencionan la posibilidad del uso de este sistema de control de vibraciones tanto para reducir la probabilidad de falla estructural bajo excitaciones sísmicas como para su uso en sistemas de naves espaciales para disminuir las tensiones entre los miembros estructurales y la interferencia de ciertos componentes de la nave con la cubierta durante la fase de impulsión. Se da pie también al estudio de la posibilidad de uso de componentes ya existentes en ambos casos para funcionar como AMS.

Warburton [17] investigó el uso de AMS para reducir la respuesta armónica de

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

tanques cilíndricos, demostrando la efectividad del sistema y encontrando valores óptimos de sintonización para dos tipos de cargas, una fuerza armónica radial simple y presión armónica distribuida en la superficie del tanque.

Warburton y Ayonride [18], obtuvieron como resultado en sus investigaciones que el amortiguamiento del sistema principal no influye en el valor de las propiedades óptimas de los AMS.

En los estudios realizados por Kaynia y Veneziano [19] en la respuesta del modo fundamental de estructuras de varios grados de libertad, concluyeron que los periodos naturales de vibrar de el sistema principal y del AMS deben ser iguales para obtener las mayores reducciones en las respuestas sísmicas. Además, encontraron que mientras más se aumenten el periodo y el amortiguamiento de la estructura, la eficiencia del uso del AMS disminuye.

Sladek y Klingner [20] analizaron la respuesta de un edificio de 25 pisos con AMS ante cierto evento sísmico. Ellos obtuvieron como resultado que los valores óptimos de sintonización propuestos por tres autores diferentes, entre ellos Den Hartog[13] y Wirsching[16] daban resultados idénticos y además que el uso de AMS en edificios altos no contribuían a disminuir las deformaciones estructurales.

Villaverde [21] demostró que al aumentar el amortiguamiento propio del AMS se disminuía en gran medida la respuesta de la estructura principal, por lo tanto obtuvo que el uso de pequeños AMS fuertemente amortiguados en resonancia trabajan eficientemente disminuyendo las vibraciones provocadas por excitaciones sísmicas. Interessantemente, Villaverde concluyó que los valores óptimos determinados utilizando una excitación armónica o ruido blanco actuando en la masa de la estructura principal no equivale a sistemas con aceleración en la base como excitación y, por ello, estos valores propuestos como óptimos no son aplicables

para cargas sísmicas, pues sobreestiman la eficiencia del AMS.

En México, basandose en la teoría del AMS, Paniagua, Gómez e Iglesias [22] propusieron un sistema amortiguador sencillo que consiste en un tanque con propiedades hidrodinámicas definidas colocado en la parte superior de la estructura. Ellos analizaron el sistema mediante registros sísmicos en la Ciudad de México y obtuvieron que la mayor reducción de la respuesta de la estructura principal corresponde a estructuras que se encuentran en la zona del lago; zona donde los movimientos sísmicos presenten características armónicas. Concluyeron también que el dispositivo propuesto es más eficiente cuando es colocado en estructuras con un periodo cercano al periodo dominante del terreno.

Miyama [23] concluyó en sus investigaciones que los amortiguadores de masa sintonizada con poca masa no reducen significativamente los desplazamientos de los edificios debidos a acciones sísmicas. También encontró que 80% de la energía que entra al sistema se podría disipar en el entrepiso superior del sistema estructural. Por lo cual, se debe contar con una resistencia, una capacidad de deformación y un amortiguamiento adecuados.

Esteva [24] observó también que los AMS podrían ser más efectivos en edificios ubicados en la zona del lago de la Ciudad de México, en relación con otros terrenos. Es por ello que determinó que para el diseño de un AMS debe considerarse la duración y el contenido de frecuencias de la excitación sísmica, debido a que los movimientos generados en la zona del lago tienen características muy diferentes a las de otro tipo de terreno.

Sacks y Swallow [25] demostraron que los AMS son eficientes en el control de la respuesta de torres y edificios.

Lin et. al. [26] investigaron el efecto de los AMS en estructuras sujetas a

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

ruido blanco estacionario filtrado, actuando en la base que simulaba también la excitación sísmica o del viento. Obtuvieron que los AMS con valores óptimos de masa, amortiguamiento y rigidez pueden reducir la respuesta sísmica hasta un 60 %. Además, para un valor determinado de relación de masas desarrollaron una nueva propuesta de diseño óptimo que reduce la respuesta estructural más que las propuestas de otros investigadores. Concluyeron también que los AMS son más efectivos para reducir los efectos provocados por acciones del viento que por excitaciones sísmicas y más eficientes reduciendo la amplitud de la respuesta en aceleración que los desplazamientos. Por último, demostraron que los AMS son más útiles para las estructuras ligeramente amortiguadas.

Soong and Dargush [27] concluyeron que un AMS es efectivo cuando la respuesta una estructura de varios grados de libertad está dominada por el modo fundamental de vibración.

Soto-Brito y Ruiz [28] estudiaron la respuesta sísmica de un edificio ubicado en la zona de lago de la Ciudad de México, el cual tenía un periodo natural de vibrar coincidente con el periodo característico del suelo. Ellos encontraron que el AMS es menos eficiente cuando el sistema estructural tiene un comportamiento no lineal.

Rasouli [29] demostró que incrementando la relación entre las masas del AMS y de la estructura principal, el amortiguamiento del edificio aumenta linealmente. El desplazamiento de la estructura se reduce particularmente cuando la frecuencia de la excitación es cercana a la de la estructura y entonces el AMS es muy efectivo. Realizó su análisis utilizando datos de sismos reales y también observó que un AMS es menos efectivo cuando la frecuencia de la estructura es diferente a la del AMS.

Wong y Chee [30] realizaron un análisis con dos registros sísmicos en varios modelos estructurales y obtuvieron que un AMS no es muy efectivo al reducir las respuestas de energía de las estructuras con un período natural de vibración corto, menor a 1.3 s, pero es efectivo si el período natural de vibración de la estructura es mayor a 2s. Además, concluyeron que la relación de sintonización (período de vibrar del AMS/período de vibrar de la estructura) es muy sensible a la excitación del terremoto, pues las características de cada terremoto demandan diferentes características de un AMS. Por otro lado, ellos encontraron que el AMS es muy efectivo para reducir tanto la energía cinética máxima como la energía de deformación de la estructura, mientras que también fue efectivo para reducir la cantidad de energía que debe disiparse a través del amortiguamiento propio de la estructura principal.

Moutinho [31] demostró que los edificios con AMS que tienen una relación de masas grande tendrían una reducción significativa en la respuesta sísmica del edificio en términos de desplazamientos relativos y aceleraciones absolutas. También propuso un nuevo método para sintonizar un AMS a las cargas sísmicas y demostró una gran proximidad de los resultados obtenidos por el método simplificado propuesto comparándolo con un análisis de tiempo riguroso.

En general, estas investigaciones han estado enfocadas en dos aspectos. El primero es el determinar parámetros óptimos de diseño (frecuencia y amortiguamiento del AMS) y estimar el redimiento que resulta. El segundo es mejorar la eficiencia y la robustez de los AMS pasivos adaptando a ellos elementos que brinden rigidez y amortiguamiento ajustados a través de mecanismos de control auxiliares al AMS [32]. Se ha llegado a la conclusión de que el uso de AMS del tipo traslacional para aumentar la resistencia de las estructuras bajo excitaciones

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

sísmicas es efectivo mediante el estudio de modelos traslacionales en términos de deformación y aceleración, dependiendo de ciertas características del sistema AMS-estructura principal y también dependiendo de las características del sismo que se esté estudiando.

2.2.2.2. Amortiguador de masa sintonizada tipo péndulo

La masa amortiguadora ahora ya no está sobre algún elemento que le permita rodar sino es soportada con cables que brindan al sistema un comportamiento igual al de un péndulo. El péndulo es excitado por el movimiento del piso sobre el que está soportado, este movimiento relativo del péndulo respecto al piso produce una fuerza horizontal que se opone al movimiento del piso (véase la figura 2.11 a). Esta acción puede ser representada por un sistema de un grado de libertad equivalente que es incorporado al piso, como se muestra en la figura 2.11 b).

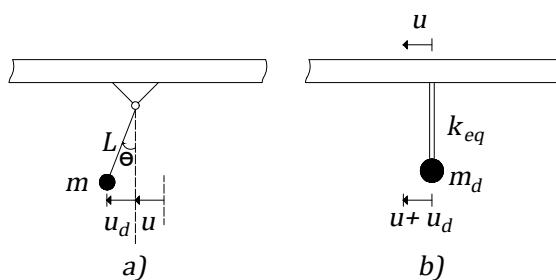


Figura 2.11: Amortiguador de masa sintonizada tipo péndulo simple con excitación sísmica: a) Sistema real; b) Sistema equivalente (adaptado de [4]).

A pesar de la cantidad de publicaciones y aplicaciones y a la simplicidad de instalación y mantenimiento de este tipo de sistema de control, los amortiguadores de masa sintonizada tipo péndulo han recibido menos atención. Asuntos relacionados con su modelado, simulación, determinación de parámetros óptimos

de diseño y análisis de respuesta no han sido muy explorados [32]. Algunos autores, inclusive han establecido el modelo de AMS traslacional como una forma equivalente de representar un AMS tipo péndulo.

Gerges y Vickery [33] utilizaron un modelo de AMS combinado, traslacional y tipo péndulo para poder obtener las ecuaciones del movimiento del sistema y estudiar la eficiencia del AMS para disminuir la respuesta de la estructura principal debido a excitaciones sísmicas y de viento modeladas como una excitación de ruido blanco aleatoria, las figuras 2.12 y 2.13 muestran los modelos utilizados. Ellos obtuvieron como resultado que el AMS tipo péndulo es más efectivo para disminuir los efectos del viento que los sísmicos.

Las ecuaciones de movimiento que utilizaron para evaluar los efectos sísmicos en su investigación fueron las siguientes:

$$(M + m_d)\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + m_d\ddot{u} + m_d\ddot{\theta}z = -(M + m_d)\ddot{u}_g \quad (2.8)$$

$$I_d\ddot{\theta} + c_d\dot{\theta}h^2 + k_d\theta h^2 + m_d\ddot{u}z = -m_d\ddot{u}_gz \quad (2.9)$$

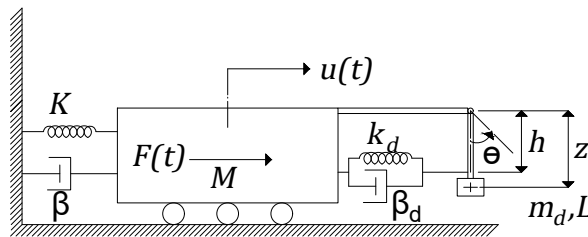


Figura 2.12: Sistema AMS mixto sujeto a una fuerza lateral (adaptado de [33]).

Roffel et. al. [32] estudiaron las respuestas dinámicas de una estructura flexible de varios grados de libertad acoplado a un AMS tipo péndulo con movimiento tanto

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

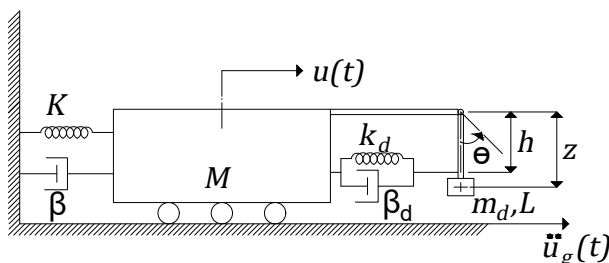


Figura 2.13: Sistema AMS mixto sujeto a una aceleración en la base (adaptado de [33]).

plano como esférico y comportamiento no lineal. Ellos obtuvieron las ecuaciones de este sistema utilizando mecánica Lagrangiana, introduciendo en el AMS un amortiguador viscoso lineal y un resorte lineal auxiliar, que se fijan a lo largo de la longitud del péndulo y a la estructura principal como se observa en la figura 2.14. Compararon los resultados obtenidos con el nuevo modelo y los obtenidos con un modelo tipo planar y obtuvieron que para relaciones de masas pequeñas los modelos planos representaban exactamente el movimiento del sistema, mientras que para relaciones de masas grandes convenía usar un modelo plano-esférico, todo esto para una excitación debida al viento.

Las ecuaciones de movimiento utilizadas en esta investigación fueron:

$$\left(M_x + \begin{bmatrix} m_d & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\Delta}_{r,x} \end{Bmatrix} + C_x \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\Delta}_{r,x} \end{Bmatrix} + K_x \begin{Bmatrix} u \\ \Delta_{r,x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_u - m_d L \ddot{\theta} \\ P_{r,x} \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

$$m_d L^2 \ddot{\theta} + c_x h_x^2 \dot{\theta} + (m_d g L + k_x h_x^2) \theta + m_d L \ddot{u} = 0 \quad (2.11)$$

Por otro lado, Battista et al. [34], desarrollaron un nuevo modelado numérico-

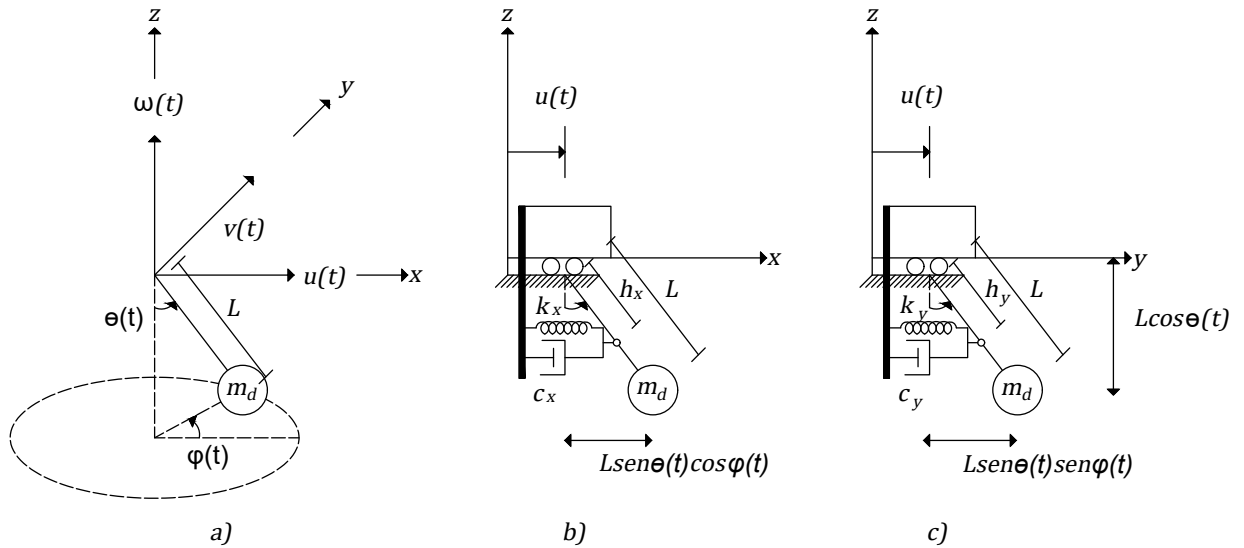


Figura 2.14: Geometría sistemática del modelo AMS tipo péndulo con amortiguador y resorte auxiliar: a) vista isométrica; b) dirección x; c) dirección y (adaptado de [32]).

análítico para el análisis estructural de torres de transmisión, proponiendo un AMS tipo péndulo no lineal como solución a los problemas de desplazamientos debidos al viento que presentan este tipo de estructuras en su parte superior. Ellos obtuvieron como resultado que la incorporación de AMS tenía una eficiencia del 90 % cuando era sintonizado para funcionar en resonancia con el movimiento inducido por el viento en el primer modo de oscilación del sistema.

Las ecuaciones del movimiento estudiadas fueron:

$$(M + m_d)\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + m_dL(\text{sen}\theta)^n = F_0\text{sen}(\omega_e t + \alpha) \quad (2.12)$$

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

$$m_d L^2 \ddot{\theta} + c_d \dot{\theta} + k_d \theta + m_d g L \sin \theta + m_d L \ddot{\cos} \theta = 0 \quad (2.13)$$

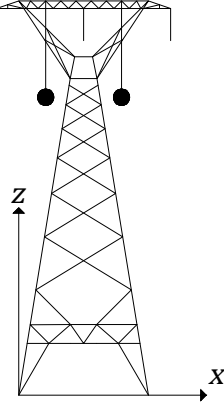


Figura 2.15: Torres delta con AMS tipo péndulo adaptado (adaptado de [34]).

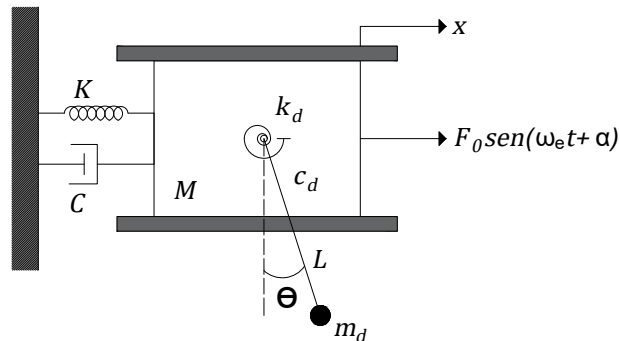


Figura 2.16: Torres delta con AMS tipo péndulo adaptado, sistema mecánico simplificado análogo (adaptado de [34]).

Generalmente, los estudios de los AMS tipo péndulo se han enfocado a su eficiencia en cuanto a la reducción de las respuestas estructurales debidas al viento. En este trabajo, se analizaron los efectos que los AMS de tipo péndulo tienen en una estructura movimiento sísmico en la base.

La figura 2.17a muestra un péndulo simple incorporado a la parte superior

de una estructura. El movimiento de la estructura provoca el movimiento del péndulo y este movimiento relativo del péndulo produce una fuerza horizontal que se opone a su vez al movimiento de la estructura. Esta acción puede ser representada por un sistema equivalente de un grado libertad unido a otro, como se muestra en la figura 2.17b.

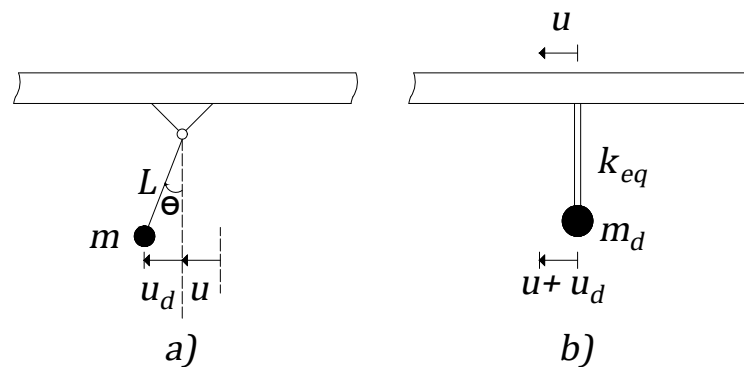


Figura 2.17: AMS tipo péndulo simple. a) Sistema real b) Sistema equivalente (adaptado de [4]).

Si se considera el sistema mostrado en 2.17b ahora incorporado en una estructura sometida a una aceleración sísmica, se tiene el nuevo sistema de la figura 2.18. La ecuación que describe el movimiento para la dirección x del AMS es:

$$T \operatorname{sen} \theta + \frac{w_d}{g} (\ddot{u} + \ddot{u}_d) = 0 \quad (2.14)$$

en donde T es la tensión del cable, w_d es el peso del péndulo, g es la aceleración debida a la gravedad, \ddot{u} se refiere a la aceleración del sistema de un grado de libertad, \ddot{u}_d es la aceleración del AMS y θ es el ángulo de rotación del péndulo respecto a un eje horizontal.

Para ángulos pequeños se pueden hacer las siguientes aproximaciones:

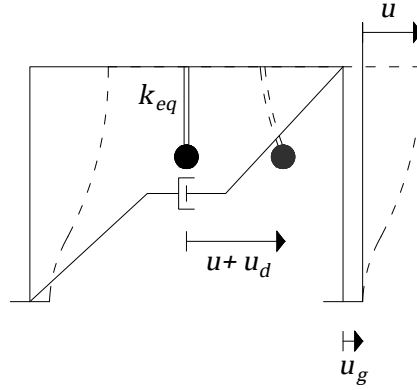


Figura 2.18: AMS tipo péndulo incorporado a una estructura de un grado de libertad.

$$T = w_d \quad (2.15)$$

$$u_d = L \sin \theta = L \theta \quad (2.16)$$

Sustituyendo (2.15) y (2.16) en (2.14) se tiene:

$$m_d \ddot{u}_d + \frac{w_d}{L} u_d = -m_d \ddot{u} \quad (2.17)$$

La rigidez equivalente del sistema AMS está dada por:

$$k_{eq} = \frac{w_d}{L} \quad (2.18)$$

La frecuencia natural de vibración del péndulo se relaciona con la k_{eq} mediante:

$$\omega_d^2 = \frac{k_{eq}}{m_d} = \frac{g}{L} \quad (2.19)$$

De acuerdo con la ecuación 2.19 tenemos que el periodo natural del péndulo es:

$$T_d = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \quad (2.20)$$

La ecuación que representa el movimiento de la estructura principal es:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_g + \frac{w_d}{L}u_d \quad (2.21)$$

Por lo que el sistema de ecuaciones a resolver es:

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku &= -M\ddot{u}_g + \frac{w_d}{L}u_d \\ m_d\ddot{u}_d + \frac{w_d}{L}u_d &= -m_d\ddot{u} \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

Estas son las ecuaciones que se usan en el Capítulo 4 para obtener la respuesta del sistema, las particularidades del modelado se describen en el capítulo 3.

Selección y filtrado de movimiento sísmico

Se seleccionó y escaló el movimiento sísmico con mayor aceleración registrada en la Ciudad de México durante el sismo del 19 de Septiembre de 2017. Éste fue registrado en la estación Culhuacán ubicada en la delegación Coyoacán, que pertenece a la zona geotécnica IIIa de la Ciudad de México. La figura 3.1 muestra el registro de aceleraciones y la figura 3.2 muestra el espectro de pseudo-aceleración, para un porcentaje de amortiguamiento de 5%. Se observa que el espectro tiene una banda angosta, lo que es característico de movimientos sísmicos de suelo blando. La aceleración máxima del terreno es de 226 gal (cm/s^2) y la aceleración espectral máxima de 1548 gal para un periodo de 1.42 segundos.

De acuerdo con estos datos, la respuesta dinámica será analizada para dos casos: caso 1) para un periodo natural de vibrar de 1.4 s (zona de resonancia); y caso 2) para un periodo natural de vibración de 2 segundos, que corresponde a una ordenada de respuesta estructural mucho menor a la máxima.

Las estructuras se analizan numéricamente mediante un método que se desarrolló en esta tesis y que se describe en la sección 3.2.1. Las estructuras también

3. SELECCIÓN Y FILTRADO DE MOVIMIENTO SÍSMICO

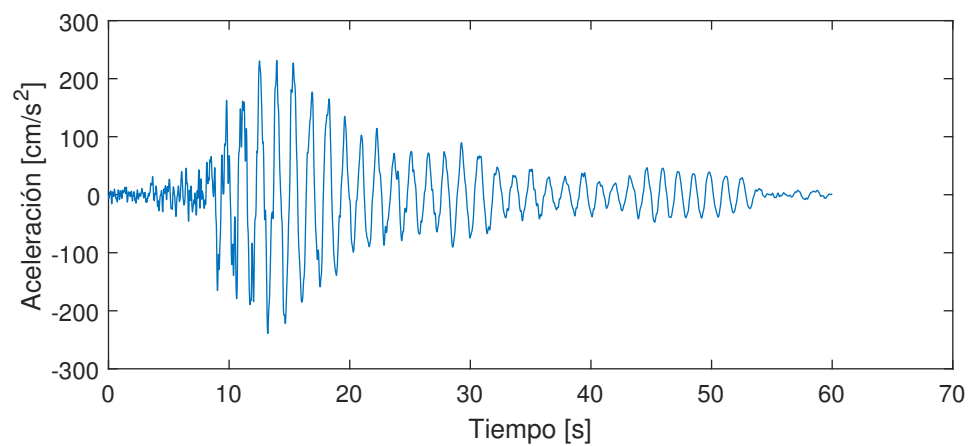


Figura 3.1: Registro sísmico 19 de septiembre 2017, estación Culhuacán.

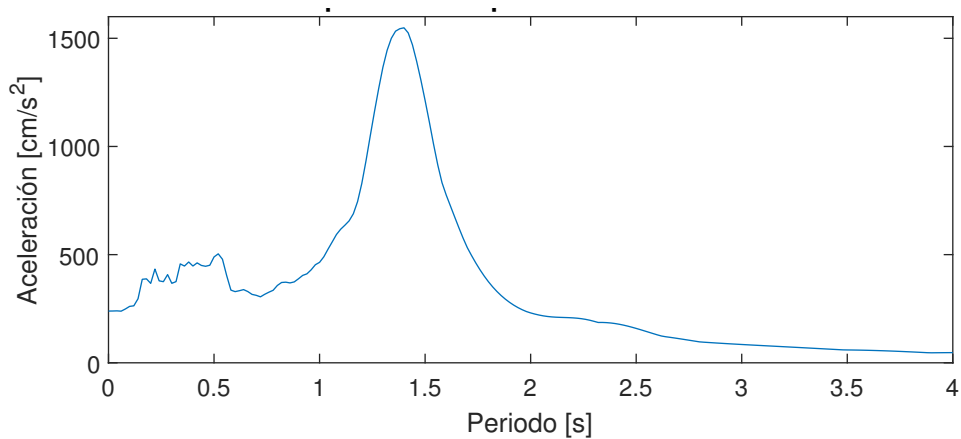


Figura 3.2: Espectro de respuesta sismo 19 de septiembre de 2017, estación Culhuacán.

se modelan en SAP2000[1], con el objetivo de comparar y comprobar el método desarrollado.

Modelo de estructura de un grado de libertad

4.1. Análisis numérico

La estructura de un grado de libertad con AMS incorporado que se analiza está formada por un marco de acero en 2D que se muestra en la figura 4.1. Cuenta con dos columnas cuadradas de 3 metros de altura y una viga, también cuadrada, con un claro de 6 metros. La estructura tiene una masa de $M = 60kg/cm^2$, y una rigidez K , que se calcula de tal forma que el periodo natural de vibrar es de $1.4s$ y $2s$, de acuerdo a lo establecido anteriormente. Las Tablas 4.1 y 4.2 muestran respectivamente las propiedades para ambos casos. Se considera que la rigidez lateral del sistema únicamente la aportan las columnas. El modulo de elasticidad, E , del acero es $2100000kg/cm^2$ y el coeficiente de amortiguamiento del sistema está calculado con la ecuación 2.4.

Para el análisis, se varió el periodo natural del péndulo, haciéndolo pasar por un periodo igual al de la estructura principal. Como se puede ver en la ecuación

4. MODELO DE ESTRUCTURA DE UN GRADO DE LIBERTAD

Tabla 4.1: Propiedades dinámicas del marco en 2D con $T_n = 1.4$ segundos

Masa M	$60 \frac{kg s^2}{cm}$
Rigidez K	$1208.5 \frac{kg}{cm}$
Coefficiente de amortiguamiento C	$26.93 \frac{kg s}{cm}$
Periodo natural T_n	$1.4 s$

Tabla 4.2: Propiedades dinámicas del marco en 2D con $T_n = 2$ segundos

Masa M	$60 \frac{kg s^2}{cm}$
Rigidez K	$592.18 \frac{kg}{cm}$
Coefficiente de amortiguamiento C	$18.85 \frac{kg s}{cm}$
Periodo natural T_n	$2 s$

2.20, el periodo natural del AMS sólo depende de su longitud L y del valor de la gravedad. Por lo tanto, se proponen diversos valores de L y se busca el valor que proporcione el valor menor de respuesta sísmica, en términos de desplazamientos máximos de la estructura principal.

La relación de masas μ se define como:

$$\mu = m_d/M \quad (4.1)$$

donde m_d es la masa del AMS y M la masa de la estructura.

De acuerdo a esto, se estudian tres valores de masa del péndulo, m_d , para $\mu = 0.05$, $\mu = 0.1$ y $\mu = 0.2$. También se busca el valor de relación de masa que minimice la respuesta del sistema principal en términos de desplazamientos máximos. La rigidez equivalente del péndulo k_{eq} se calculó mediante la ecuación 2.18.

La solución analítica de la ecuación de movimiento para un sistema de un grado de libertad no es posible si la excitación (fuerza $p(t)$ o aceleración del

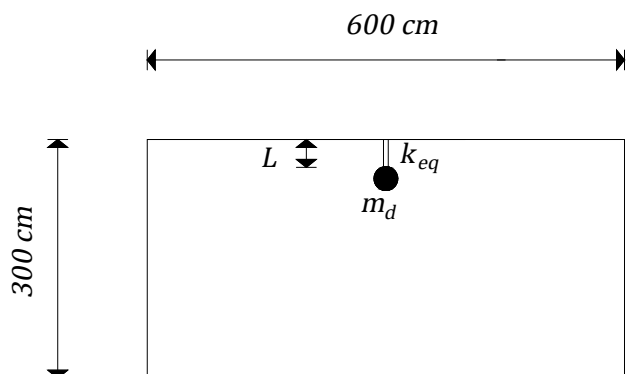


Figura 4.1: Diagrama de modelo de marco bidimensional con AMS tipo péndulo

terreno \ddot{u}_g) varía arbitrariamente con el tiempo o si el sistema no es lineal. Tal problema se puede abordar mediante métodos numéricos tipo paso a paso en el tiempo [8].

Para resolver la ecuación del movimiento del sistema se utilizó el método numérico de Diferencia Central. Este método se basa en una aproximación por diferencias finitas de las derivadas temporales del desplazamiento (es decir, la velocidad y la aceleración) tomando pasos de tiempo constantes, $t_i = \Delta t$ [8]. En este estudio, se tomaron pasos de tiempo de $\Delta t = 0.01s$ para definir la aceleración del terreno \ddot{u}_g con precisión.

El método de Diferencia Central aplicado a un sistema estructural con AMS tipo péndulo incorporado, desarrollado en este trabajo se describe a continuación con ayuda de la figura 4.2.

Para poder comenzar a resolver este método se necesita conocer los valores de velocidad y desplazamiento del AMS y de la estructura principal en el tiempo cero. Estos valores permiten calcular los valores de aceleración para cada uno de los componentes de este sistema, es decir, llevar a cabo los pasos 1 y 2. Calculados

4. MODELO DE ESTRUCTURA DE UN GRADO DE LIBERTAD

1.

$$\ddot{u}_0 = \frac{-M\ddot{u}_{g0} - C\dot{u}_0 - Ku_0 + \frac{w}{L}u_{d0}}{M}$$

2.

$$\ddot{u}_{d0} = \frac{-m_d\ddot{u}_0 - \frac{w_d}{L}u_0}{m_d}$$

3.

$$u_{-1} = u_0 - \Delta t\dot{u}_0 + \frac{\Delta t^2}{2}\ddot{u}_0$$

4.

$$u_{d-1} = u_{d0} - \Delta t\dot{u}_{d0} + \frac{\Delta t^2}{2}\ddot{u}_{d0}$$

5.

$$A = \frac{w_d}{L}$$

6.

$$B = \frac{2M}{\Delta t^2} - K$$

7.

$$C = \frac{C}{2\Delta t} - \frac{M}{\Delta t^2}$$

8.

$$D = \frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C}{2\Delta t}$$

9.

$$E = \frac{m}{\Delta t^2}$$

10.

$$u_{i+1} = \frac{-M\ddot{u}_{g_i} + Au_{d_i} + Bu_i + Cu_{i-1}}{D}$$

11.

$$u_{d_{i+1}} = 2u_i - u_{i-1} - u_{i+1} + 2u_{d_i} - u_{d_{i-1}} - (A/E)u_{d_1}$$

Figura 4.2: Método de Diferencia Central aplicado a un sistema estructural con AMS tipo péndulo incorporado

estos valores de aceleración en el tiempo cero se procede a resolver los pasos 3 y 4 que proporcionan los desplazamientos de la estructura principal y del AMS, respectivamente, en el instante de tiempo -1 . De los pasos 5 al 9 se calculan constantes necesarias para calcular los desplazamientos en el tiempo uno, tal como se indica en los pasos 10 y 11. Se reemplaza i por $i + 1$ y se repiten los pasos 10 y 11 para el siguiente paso de tiempo.

A partir del registro sísmico y para longitudes de un AMS que van desde 1 hasta 300 centímetros, se calculan los desplazamientos máximos del AMS obtenidos para cada longitud. Estos desplazamientos son comparados con la propia longitud del péndulo para determinar si el método proporciona resultados factibles, es decir, si el péndulo se desplaza una distancia menor que su propia longitud. Después, se grafican tanto los desplazamientos máximos de la estructura principal respecto a la longitud del péndulo, como el desplazamiento máximo que dicha estructura tendría sin AMS y de esta manera se puede observar la longitud que brinda un mayor contraste entre ambas curvas, es decir, que longitud de AMS reduce en mayor medida los desplazamientos máximos. Una vez que se obtiene la longitud óptima, se grafican los desplazamientos laterales durante todo el evento sísmico con y sin amortiguador, para después repetir el método con una misma longitud del péndulo pero para periodos estructurales que varían de 1 a 4 segundos, es decir, se obtiene un espectro de respuesta en términos de desplazamientos con AMS que es comparado con el espectro de respuesta sin AMS. Adicionalmente, se grafica el desplazamiento de la estructura principal y del AMS en una misma figura para observar su interacción.

4.2. Análisis con programa comercial de elementos finitos

Las propiedades descritas anteriormente, tanto para el péndulo, como para el marco con T_n igual a 1.4s y 2s, se modelaron en el programa SAP2000[1] realizando las siguientes consideraciones: el marco está empotrado en su base; las uniones trabe-columna son rígidas; las columnas cuentan con rigidez axial infinita; y las vigas cuentan con rigidez axial y a flexión infinita.

El péndulo del AMS se modeló como una barra de acero empotrada al centro de la viga y, dado que es una barra, se necesita darle una rigidez equivalente. La rigidez lateral, k_p , de una barra modelada de esta manera está dada como:

$$k_p = \frac{3EI}{L^3} \quad (4.2)$$

en donde E es el módulo de elasticidad del acero, L es la longitud del péndulo e I es el momento de inercia de la barra que sostiene la masa del péndulo. La figura 4.3 muestra el ejemplo del marco con TMD modelado en SAP2000[1].

Las mismas variaciones que se realizaron en el análisis numérico, respecto a la longitud del péndulo y la relación de masas, se realizarán en este modelo.

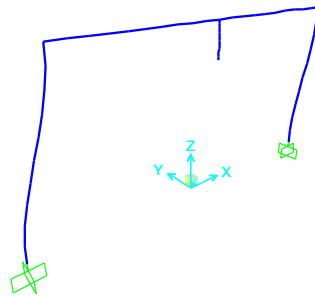


Figura 4.3: Modelo en SAP2000[1] de estructura de un grado de libertad con AMS tipo péndulo.

Modelo de estructura de varios grados de libertad

5.1. Análisis numérico

El método numérico propuesto para estructuras de un grado de libertad puede ser usado para estructuras elásticas de varios grados de libertad cuya respuesta está dominada por el modo fundamental. La respuesta sísmica de estructuras con el mismo periodo de vibrar es similar independientemente de los elementos que proporcionan rigidez y de la masa.

5.2. Análisis sísmico

Las propiedades para las estructuras con T_n igual a 1.4 segundos y 2 segundos se muestran en las Tablas 5.1 y 5.2. Estas propiedades se introdujeron en el programa SAP2000[1] considerando al edificio empotrado en su base; las uniones trabe-columna rígidas y diafragmas rígidos en cada uno de los pisos. Las figuras 5.1 y 5.2 muestran la distribución de las columnas y las vigas para ambos.

5. MODELO DE ESTRUCTURA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

Tabla 5.1: Propiedades dinámicas de edificio de 11 niveles

Masa M	$982.61 \frac{kg s^2}{cm}$
Periodo natural T_n	$1.4s$
Columnas C1 nivel 1-3	$50x50cm$
Columnas C2 nivel 4-11	$40x40cm$
Trabe T1	$50x30cm$
Trabe T2	$50x20cm$
Trabe T3	$40x20cm$

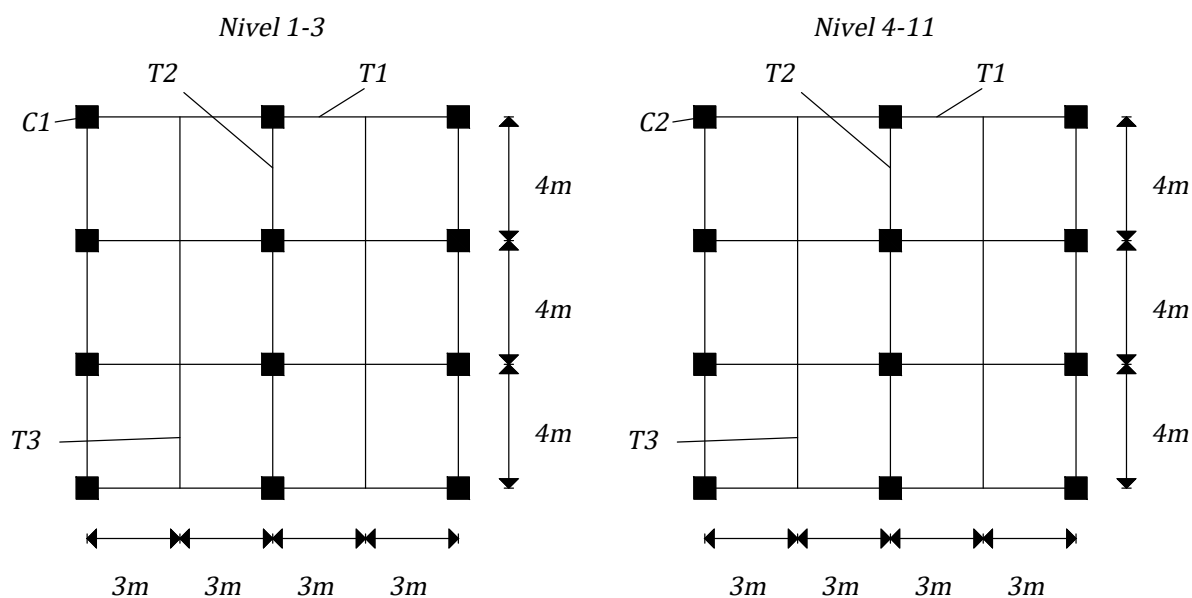
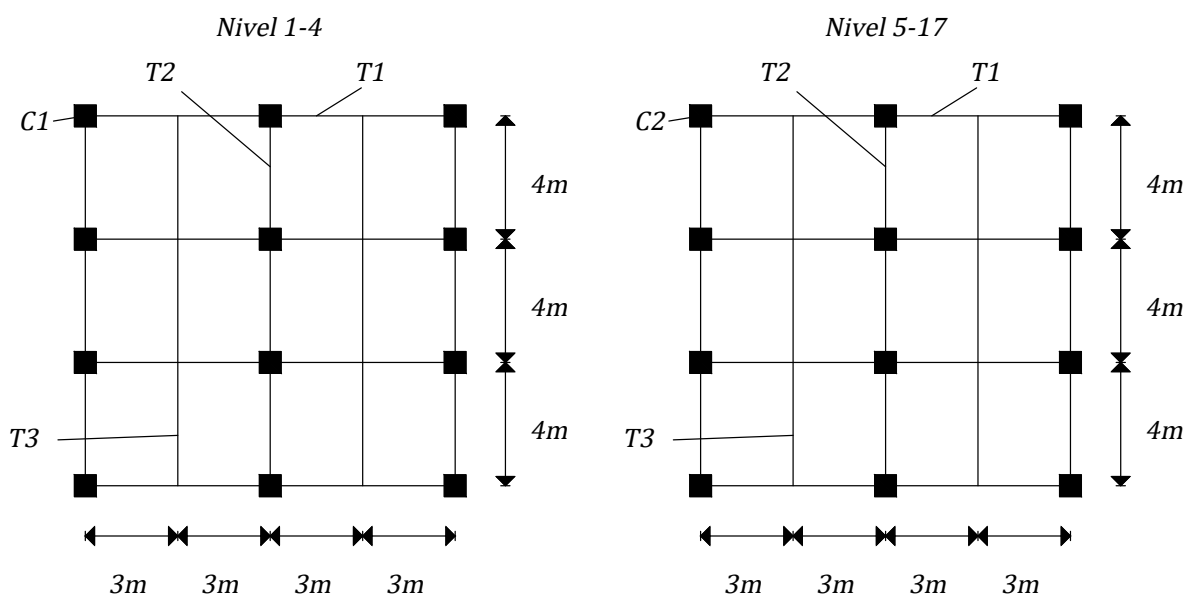


Figura 5.1: Distribución de elementos estructurales para el modelo de edificio con $T_n = 1.4s$.

El péndulo del AMS se modeló como una barra de acero sujeta al centro de una viga central. La rigidez lateral, k_p , de la barra modelada se calculó con la ecuación 4.2. La masa del AMS se calculó como el 5, 10 y 20 % de la masa indicada en las Tablas 5.1 y 5.2 para el edificio con periodos de vibrar de 1.4 segundos y

Tabla 5.2: Propiedades dinámicas de edificio de 17 niveles

Masa M	$2555.19 \frac{kg s^2}{cm}$
Periodo natural T_n	$2s$
Columnas C1 nivel 1-4	$50x50cm$
Columnas C2 nivel 5-17	$40x40cm$
Trabe T1	$50x30cm$
Trabe T2	$50x20cm$
Trabe T3	$40x20cm$

**Figura 5.2:** Distribución de elementos estructurales para el modelo de edificio con $T_n = 2s$.

2 segundos, respectivamente. Las longitudes óptimas del péndulo encontradas en el análisis numérico fueron las utilizadas para el análisis en SAP2000[1].

Las figuras 5.3 y 5.4 muestra los edificios con AMS modelados en SAP2000[1].

Debido a que en SAP2000[1] se realiza un análisis dinámico modal, se debe incluir la contribución del modo fundamental de vibración. En este trabajo se

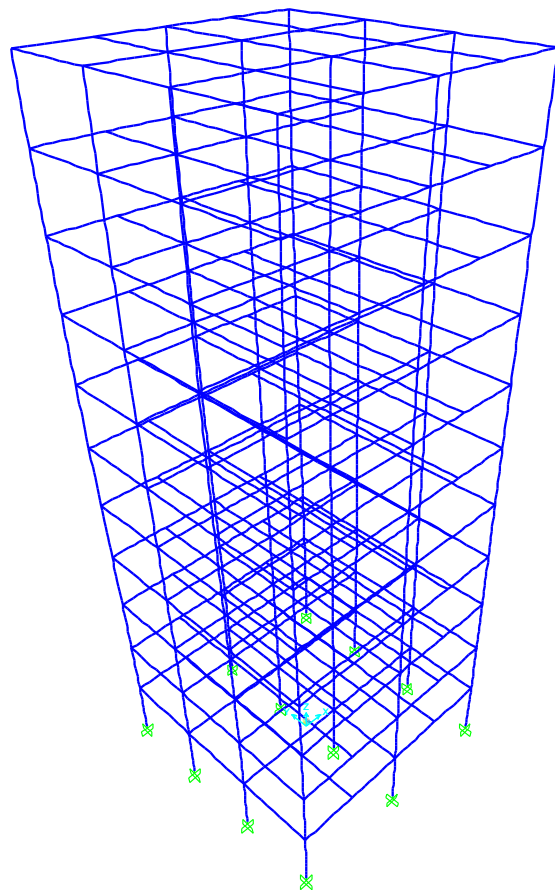


Figura 5.3: Estructura de 11 niveles con AMS tipo péndulo modelada en SAP2000[1], $T_n = 1.4s$.

revisaron los desplazamientos máximos, por lo que la contribución del modo fundamental se considerará para los desplazamientos nodales en el último piso de los edificios modelados. Por ello, los desplazamientos máximos obtenidos mediante el método numérico, correspondientes a una estructura de un grado de libertad, se multiplicaron por el factor de participación modal del modo fundamental de

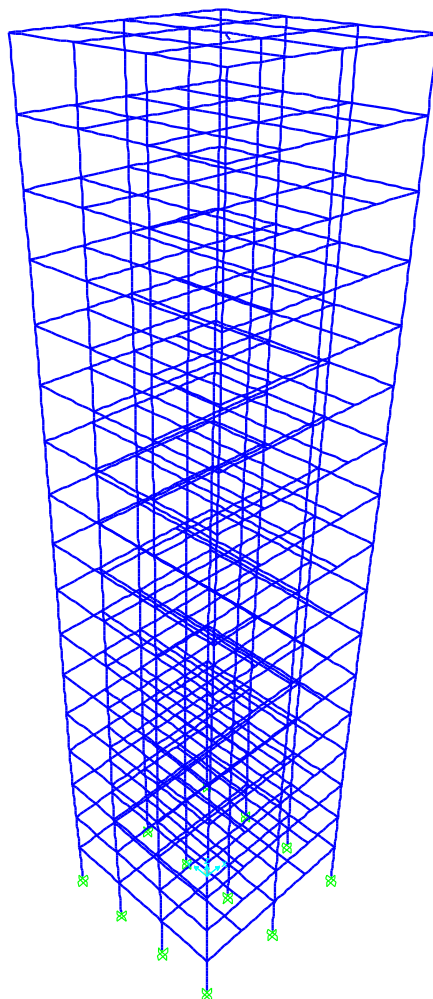


Figura 5.4: Estructura de 17 niveles con AMS tipo péndulo modelada en SAP2000[1], $T_n = 2s$.

vibración y por el valor correspondiente al último nivel en el vector característico. Ambos valores se obtienen directamente del modelo numérico.

El producto de estos dos valores para el modelo de edificio con $T_n = 1.4s$ dio como resultado el valor de 1.3129 y para el modelo con $T_n = 2s$ se obtuvo un producto de 1.2974, respectivamente. Estos valores se aplicaron a manera

5. MODELO DE ESTRUCTURA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

de corrección para los resultados obtenidos mediante el método numérico y los valores ya corregidos fueron comparados con los obtenidos mediante SAP2000[1].

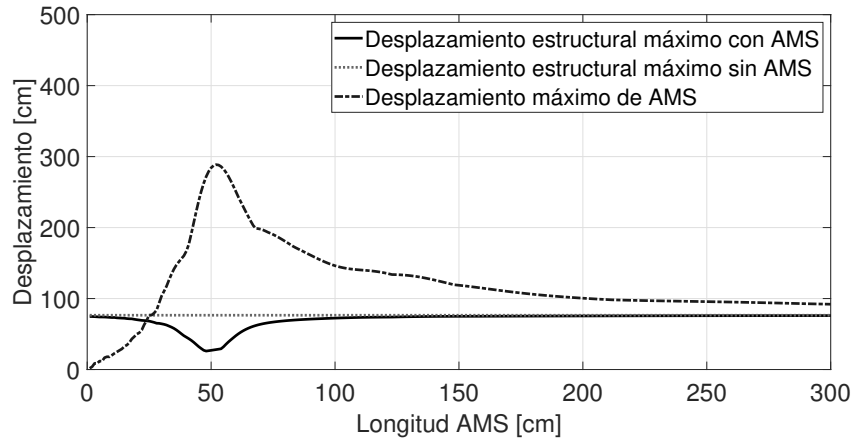
Análisis numérico con el método propuesto

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos con el método propuesto y posteriormente, en el siguiente capítulo, los resultados obtenidos con el programa SAP2000[1].

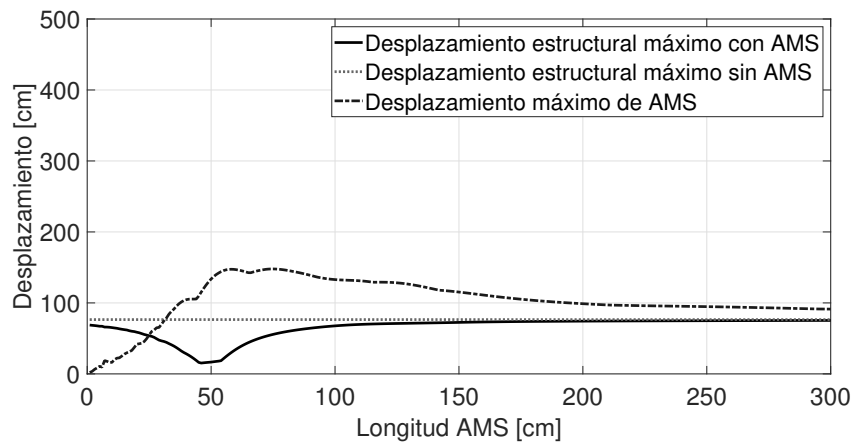
6.1. Estructura de un grado de libertad con $T_n = 1.4s$

Se comenzó con un sistema con las características mencionadas en la Tabla 4.1 el cual cuenta con un periodo natural de vibración igual a 1.4s. De acuerdo al método descrito en la figura 4.2 para cada longitud del péndulo se graficaron los desplazamientos máximos absolutos de la estructura principal junto con los desplazamientos máximos del péndulo y se obtuvieron los resultados de las figuras 6.1a, b y c, que corresponden a una relación de masa de $\mu = 5\%$, $\mu = 10\%$ y $\mu = 20\%$, respectivamente.

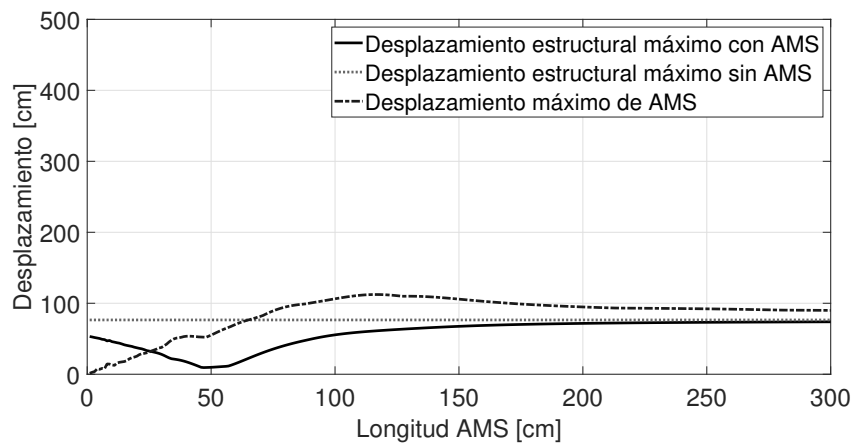
6. ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL MÉTODO PROPUESTO



a) $\mu = 5\%$



b) $\mu = 10\%$



c) $\mu = 20\%$

Figura 6.1: Desplazamientos máximos del sistema vs longitud del AMS para $T_n = 1.4s$.

Si se analiza la figura 6.1, se observa que se tienen los desplazamientos máximos estructurales más pequeños cuando la longitud del péndulo es cercana a 50 centímetros, correspondiente a un periodo del AMS $T_n = 1.42$ segundos, lo cual indica que la relación entre los periodos naturales óptima entre el sistema principal y el AMS corresponde a la unidad. Sin embargo, en el caso de la figura 6.1a, el menor desplazamiento de la estructura corresponde a un mayor desplazamiento del AMS, lo que quiere decir que la energía fué transferida al AMS pero provoca que éste tenga un comportamiento no factible. El desplazamiento del AMS que muestra la gráfica, indica que se desplaza una distancia mayor que su propia longitud. Para las figuras 6.1b y c no se tiene un valor pico del AMS cuando se tiene el menor desplazamiento máximo de la estructura principal. Sin embargo también en este valor de longitud la gráfica indica que el AMS se desplaza una distancia mayor que su propia longitud.

Para el caso de un péndulo con el 20 % de la masa de la estructura se puede notar que el comportamiento del péndulo no crece de la misma forma que para las dos gráficas anteriores. Para poder mostrar este fenómeno de forma más clara, se realizaron las gráficas de la figura 6.2. En ellas se muestran los desplazamientos máximos del AMS vs. su longitud, para longitudes del péndulo de 1 centímetro a 3 metros y una relaciones de masas $\mu = 0.05$, $\mu = 0.10$ y $\mu = 0.2$, respectivamente. En esta gráfica la curva punteada es una curva de referencia, que indica a partir de qué longitud se tiene un desplazamiento del péndulo menor a su longitud y por lo tanto, a partir de qué longitud las ecuaciones representan de manera correcta el fenómeno. Nuevamente en la figura 6.2c, se observa que para un péndulo de masa igual al 20 % de la masa de la estructura el comportamiento está más cerca de poder representarse en su totalidad por las ecuaciones presentadas en este

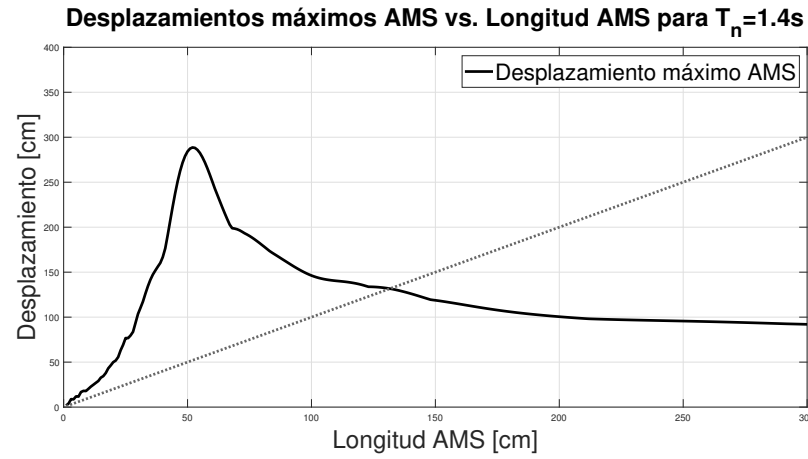
6. ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL MÉTODO PROPUESTO

trabajo, ya que la curva de desplazamientos máximos del AMS supera en una medida mucho menor a la curva de referencia (punteada).

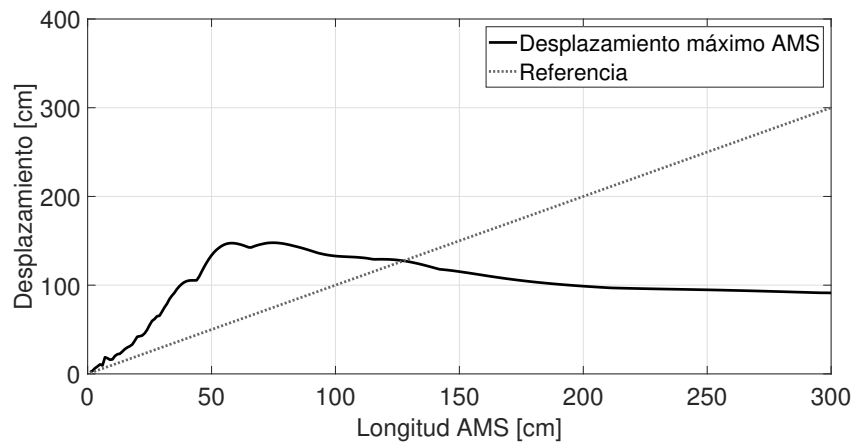
El hecho de que en cierto intervalo de periodos estructurales el desplazamiento del péndulo presente un comportamiento que no corresponde a la realidad, debido a que se está desplazando más allá a su propia longitud, indica que en este intervalo, el sistema de ecuaciones 2.22 no es válido, pues una de las suposiciones de partida fué considerar que los desplazamientos del péndulo eran relativamente pequeños. Esto conduce a que en este intervalo de no factibilidad, el péndulo presenta un comportamiento no lineal. El AMS puede presentar un comportamiento no lineal al sintonizarse a la máxima respuesta dinámica y, de acuerdo a lo investigado en [28], se comprobó que los AMS son menos eficientes cuando el sistema estructural desarrolla comportamiento no lineal. Por lo tanto, el análisis será basado sólo en las longitudes del péndulo que generan desplazamientos que no se encuentren dentro de este intervalo.

En la figura 6.2a, se observa que las longitudes del péndulo a considerar serán las que van a partir de 132 centímetros dado que en este punto las curvas se intersectan y se tiene una solución factible. Si ahora se observa la figura 6.1a, se puede ver que esta misma longitud de 132 centímetros es la longitud mas eficiente debido a que a partir de ella el desplazamiento máximo crece, acercándose cada vez más al desplazamiento estructural sin AMS. Este mismo criterio se utiliza para los resultados obtenidos con $\mu = 0.1$ y $\mu = 0.2$ y se obtiene una longitud factible de 128 centímetros y 112 centímetros, respectivamente. Para las longitudes calculadas se obtuvo una gráfica en donde se observa el desplazamiento de la estructura principal con y sin AMS para cada caso en el tiempo (figura 6.3).

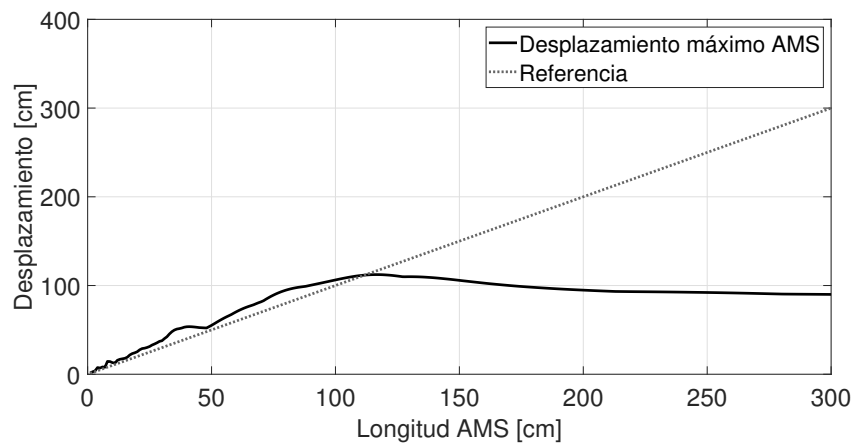
El desplazamiento máximo sin AMS corresponde a un valor de 76.50 centíme-



a) $\mu = 5\%$



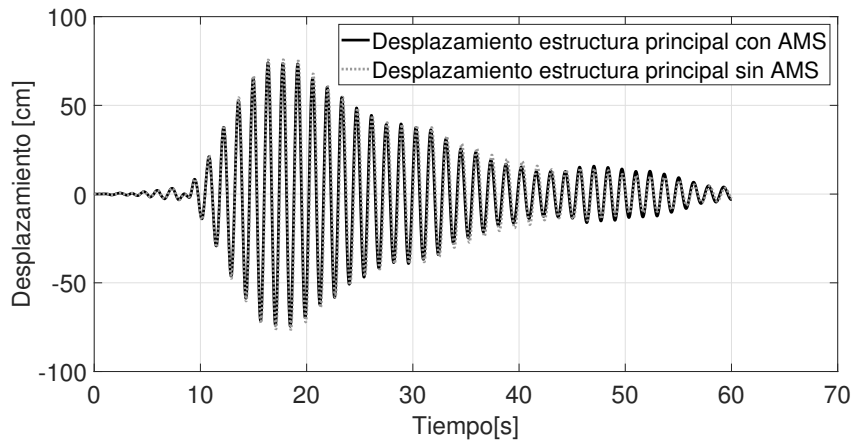
b) $\mu = 10\%$



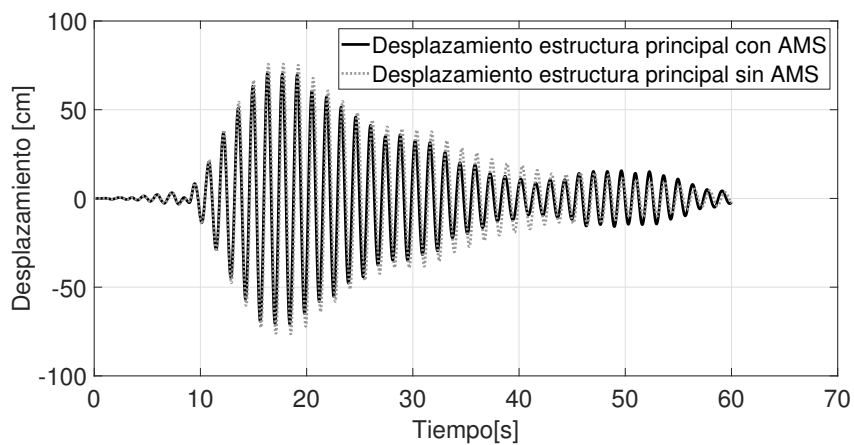
c) $\mu = 20\%$

Figura 6.2: Desplazamientos máximos del AMS vs longitud del AMS para $T_n = 1.4s$.

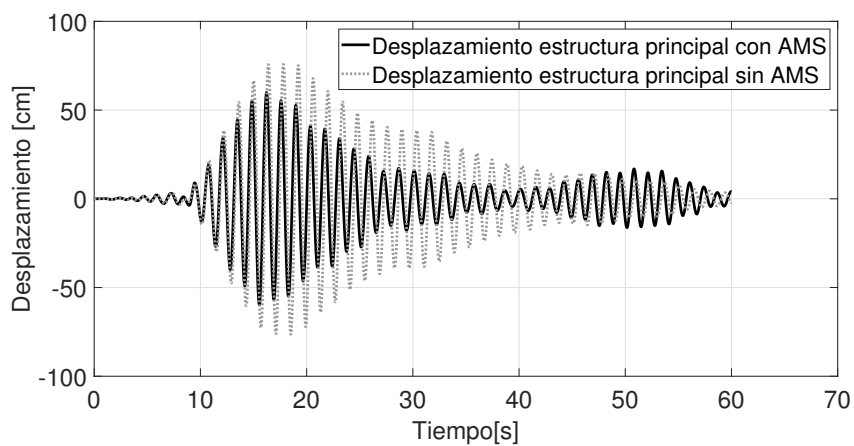
6. ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL MÉTODO PROPUESTO



a) $\mu = 5\%$



b) $\mu = 10\%$



c) $\mu = 20\%$

Figura 6.3: Desplazamientos de la estructura principal lo largo del tiempo con y sin AMS $T_n = 1.4s$

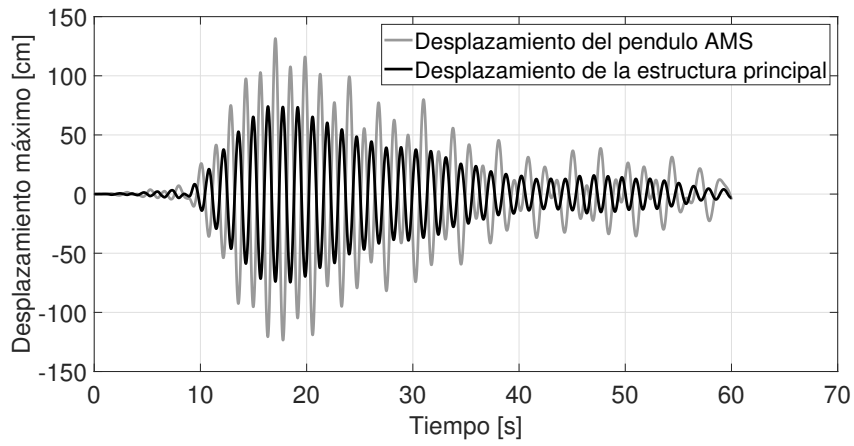
tros. Con AMS, para una relación de masas del 5 %, se obtuvo que el desplazamiento máximo estructural es de 74.52 centímetros, lo que indica que con una longitud del péndulo de 132 centímetros y una relación de masas de 5 % se reduce la respuesta estructural un 2.59 %. Para una relación de masas del 10 % y una longitud del péndulo de 128 centímetros el máximo desplazamiento estructural con AMS es de 71.2 centímetros, es decir, se disminuyó la respuesta estructural un 6.93 %. Para el último caso, con una relación de masas igual al 20 % y una longitud del péndulo de 112 centímetros el máximo desplazamiento con AMS corresponde a 59.96 centímetros, una disminución de la respuesta sísmica de 21.62 % que es un porcentaje de eficiencia considerable. Estos resultados indican que para este caso, el valor más eficiente de μ es de 0.2. Cabe destacar que de acuerdo a la figura 6.1, aún habría longitudes que disminuyen el desplazamiento máximo estructural en mayor medida. Sin embargo, las ecuaciones propuestas en este trabajo no pueden representar el comportamiento del AMS bajo estas circunstancias.

Adicionalmente se graficaron en la figura 6.4 tanto el desplazamiento del péndulo como el de la estructura principal respecto al tiempo, para sus respectivas longitudes óptimas.

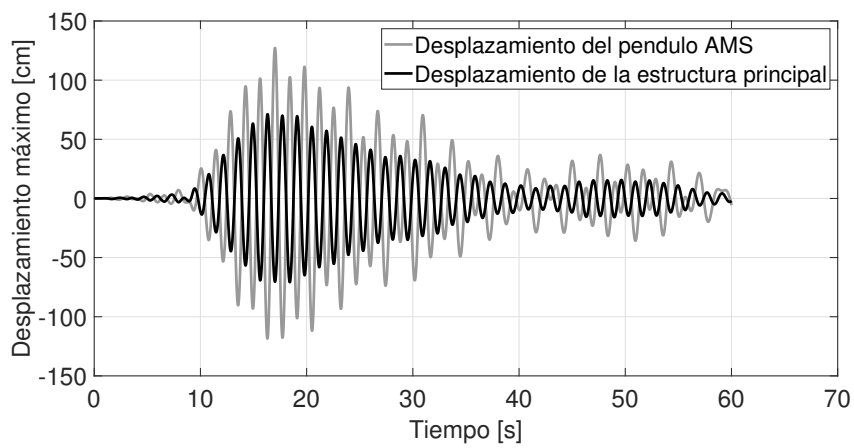
Los resultados muestran que las oscilaciones del péndulo están en contrafase con las de la estructura principal. El movimiento relativo del péndulo es en sentido contrario al movimiento de la estructura por lo que la fuerza de este movimiento relativo se opone al movimiento de la estructura y el sistema, como se pudo comprobar, es efectivo.

Por último, para estas mismas longitudes óptimas se graficó un espectro de respuesta en términos de desplazamientos para periodos estructurales que van de 1 a 4 segundos y se comparó con el espectro de la figura 3.2 para una estructura

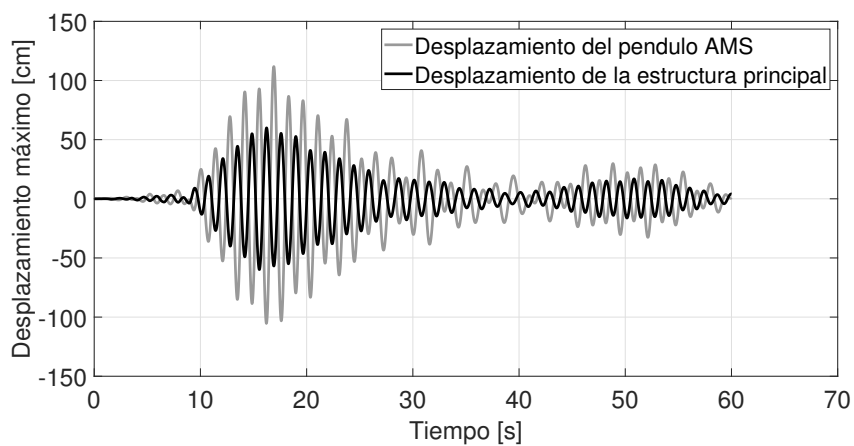
6. ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL MÉTODO PROPUESTO



a) $\mu = 5\%$



b) $\mu = 10\%$



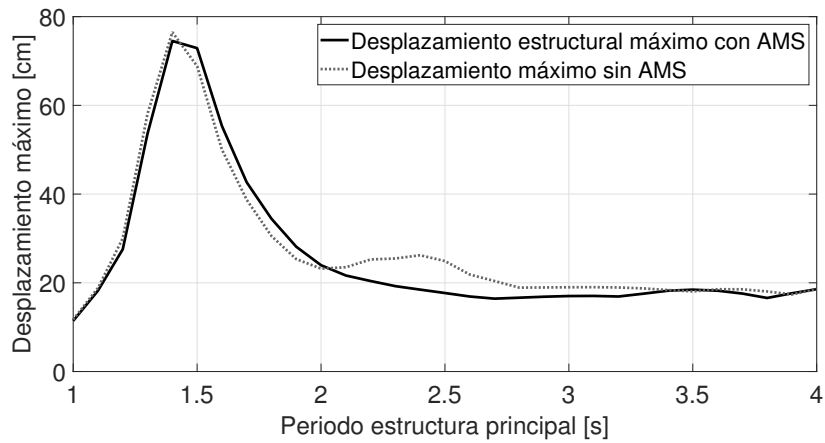
c) $\mu = 20\%$

Figura 6.4: Desplazamientos de la estructura principal lo largo del tiempo con y sin AMS $T_n = 1.4s$.

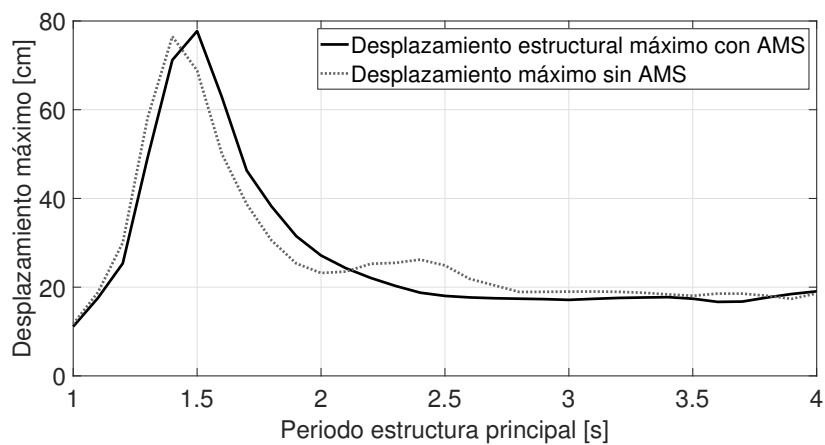
sin AMS. Los resultados se muestran en la figura 6.5.

Para los tres casos, el AMS óptimo disminuye los desplazamientos máximos para la estructura con periodo igual al que genera los desplazamientos mayores debidos al movimiento sísmico en estudio. En la figura 6.5a, se observa que si se coloca un AMS con $\mu = 0.05$ y $L = 132cm$ en estructuras con un periodo natural de vibrar de 1 a 2 y de 3.5 a 4 segundos los desplazamientos máximos disminuirían o aumentarían muy poco, o en su caso serían los mismos, mientras que para estructuras con periodos en un intervalo de 2 a 3.5 segundos el desplazamiento disminuiría notablemente. Esto quiere decir que para relaciones de masas pequeñas un AMS es más efectivo en estructuras que no coincidan con el periodo de resonancia del movimiento sísmico. En la figura 6.5 b, se obtuvo que si se coloca un AMS con $\mu = 0.1$ y una longitud de 128 centímetros, en estructuras con periodos de 0 a 1.45 segundos aproximadamente el desplazamiento máximo se verá disminuido en pequeña medida, en cambio si se coloca en estructuras con periodos que vayan aproximadamente de 1.45 a 2.1 segundos el AMS provocaría que la estructura se desplazara más que si no tuviera el péndulo amortiguador. Para estructuras con periodos de 2.1 a 3.3 segundos sucede lo mismo que en el caso anterior, los desplazamientos disminuyen y el AMS favorece la respuesta sísmica. Para estructuras con periodos de 3.3 segundos en adelante el AMS parece no modificar en gran medida los desplazamientos máximos laterales. Por último, para un AMS con una longitud de 112 centímetros y un valor de μ igual a 0.2 se tiene que también para estructuras con periodos que varían de 1 a 1.45 segundos aproximadamente la respuesta estructural disminuye gracias a este dispositivo, pero en mayor medida que con un AMS de $\mu = 0.1$. Los desplazamientos máximos aumentan también en mucho mayor medida en un intervalo de periodos de 1.45

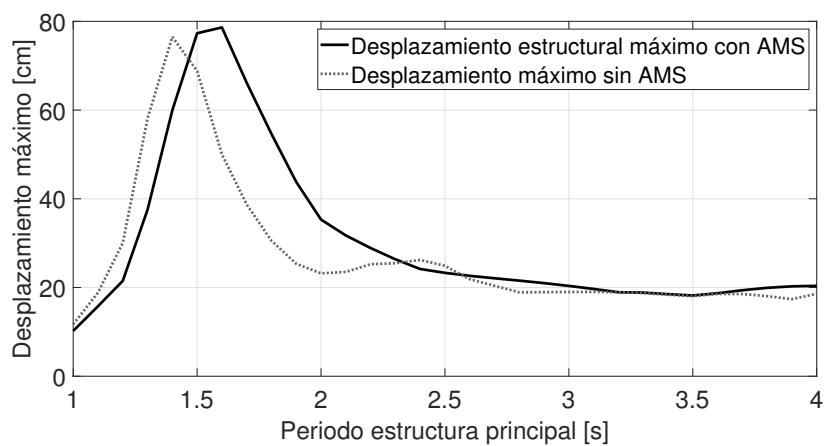
6. ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL MÉTODO PROPUESTO



a) $\mu = 5\%$ $L = 132\text{cm}$



b) $\mu = 10\%$ $L = 128\text{cm}$



c) $\mu = 20\%$ $L = 112\text{cm}$

Figura 6.5: Espectros de respuesta con y sin AMS para longitudes de 132, 128 y 112 centímetros.

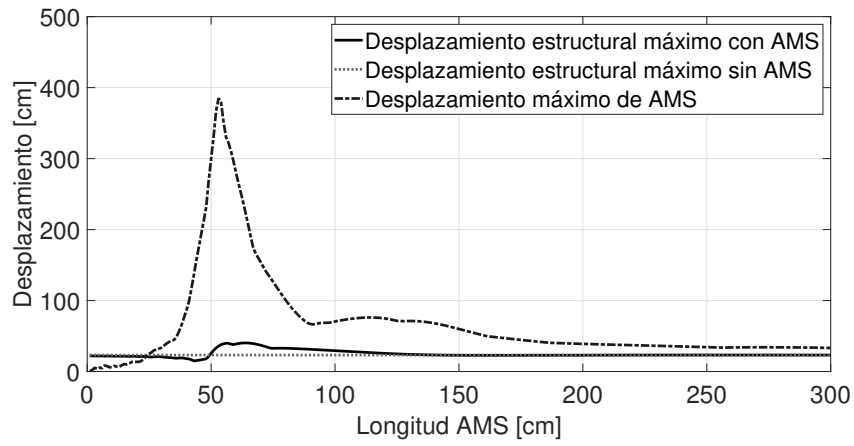
a 2.3 segundos, comparado con el espectro para $\mu = 0.1$. Para estructuras con periodos de 2.3 segundos en adelante el AMS con estas características no parece modificar el comportamiento de la estructura principal. De acuerdo con estos resultados se corrobora que para AMS con una relación de masas grande se tienen resultados más efectivos que para estructuras a las que se incorpore un AMS tipo péndulo con una relación de masas más pequeña. Además, también se confirma que para edificios muy altos que tienen periodos naturales de vibrar grandes el AMS parece no modificar la respuesta sísmica de manera significativa.

6.2. Estructura de un grado de libertad con $T_n = 2s$

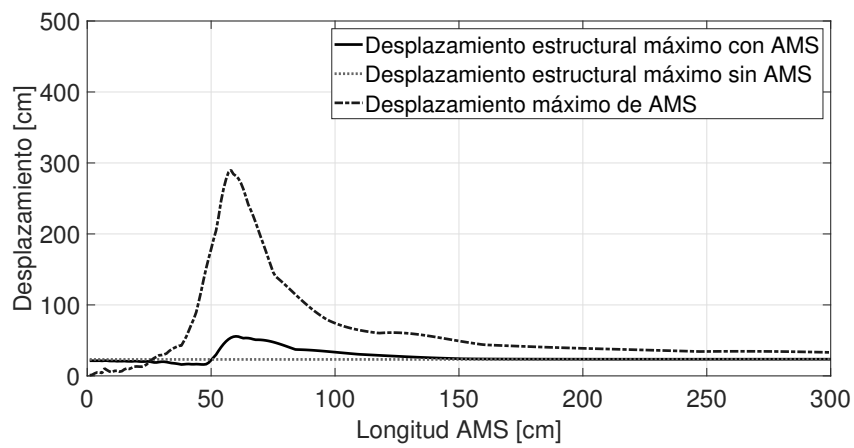
Se analizó la estructura con las propiedades descritas en la Tabla 4.2 que cuenta con un periodo natural de vibración igual a $2s$. Para cada longitud del péndulo se graficaron los desplazamientos máximos de la estructura principal junto con los desplazamientos máximos del péndulo y se obtuvieron las gráficas de la figura 6.6 para cada una de las relaciones de masas.

Analizando las gráficas de la figura 6.6, se observa que se tienen los desplazamientos máximos laterales más pequeños cuando la longitud del péndulo se encuentra entre 25 y 53 centímetros, correspondiente a periodos del AMS de 1 a 1.46 segundos, menores a los 2 segundos que la estructura principal tiene como periodo natural. En este caso no se puede decir que la relación de frecuencias naturales óptima entre el sistema principal (que en este caso es un periodo que no se encuentra en el intervalo de resonancia del evento sísmico) y el AMS corresponde

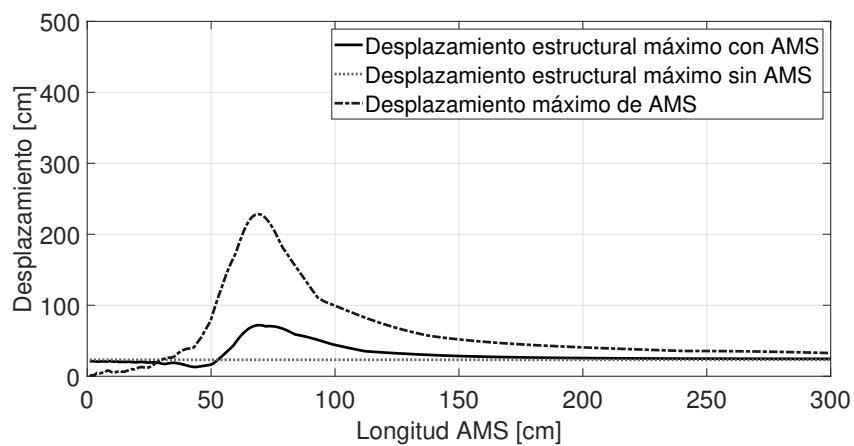
6. ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL MÉTODO PROPUESTO



a) $\mu = 5\%$



b) $\mu = 10\%$



c) $\mu = 20\%$

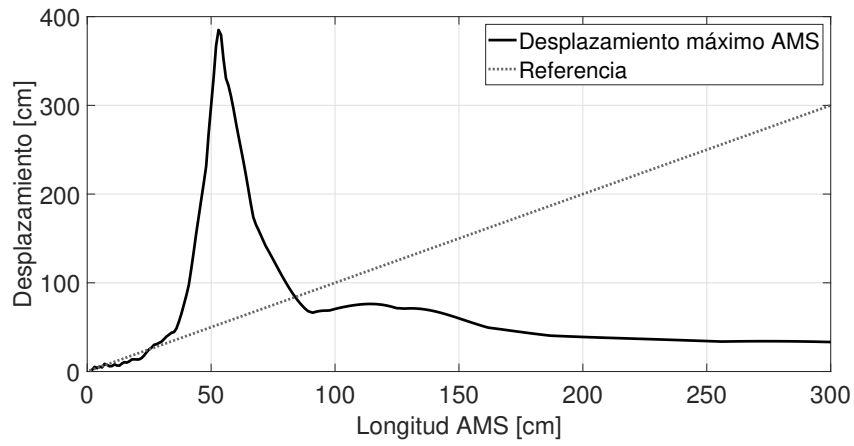
Figura 6.6: Desplazamientos máximos del sistema vs longitud del AMS para $T_n = 2s$.

a un valor cercano a la unidad. Se observa también que la curva de desplazamientos máximos de la estructura con AMS no presenta un declive muy pronunciado, por lo que hay mayor número de opciones para longitudes del péndulo que reducirían la respuesta estructural. A diferencia del análisis para una estructura con periodo de 1.4 segundos, en donde se obtuvo que los desplazamientos más grandes de los AMS se tendrían cuando la estructura se desplaza menos, los resultados que se logran observar en la figura 6.6b, indican que el desplazamiento máximo, que diferentes AMS con diferentes longitudes pueden tener, provocarían el desplazamiento máximo en la estructura. Por lo que que en ese intervalo de longitudes, no es recomendable la colocación de un AMS pues la respuesta de la estructura aumentaría y además, dado que ese desplazamiento del péndulo corresponde a una distancia mayor que su longitud, el movimiento del péndulo no es factible. Este "pico" que presenta la curva de desplazamientos máximos del AMS va disminuyendo y moviéndose hacia la derecha conforme va aumentando la relación de masas. Por lo tanto, va correspondiendo a una longitud mayor conforme la masa del péndulo es mayor. De igual forma, para poder observar de mejor manera los intervalos en que se encuentran longitudes del péndulo adecuadas se realizaron las gráficas de la figura 6.7 en donde para longitudes del péndulo de 1 centímetro a 3 metros y relaciones de masas $\mu = 0.05$, $\mu = 0.10$ y $\mu = 0.2$, respectivamente, se muestran los desplazamientos máximos del AMS vs. su longitud.

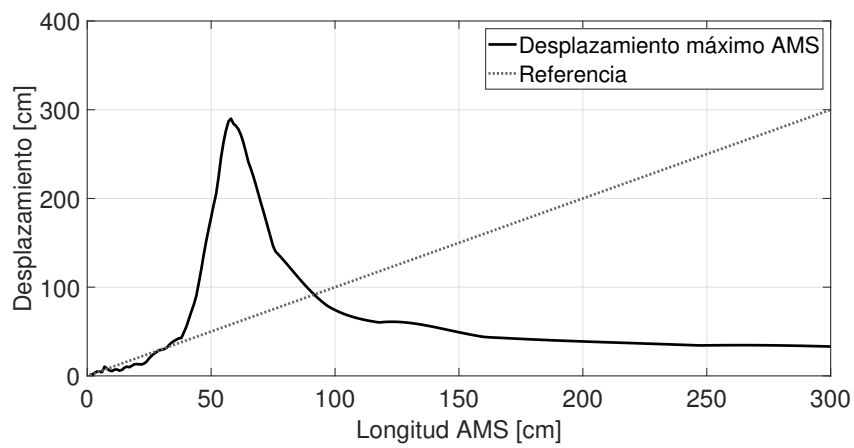
El análisis de este sistema se basó sólo en las longitudes del péndulo que generan una respuesta factible por las ecuaciones propuestas.

En la figura 6.7a, se observa que hay dos intervalos de longitudes del péndulo que generan resultados factibles. El primero va desde 8 hasta 24 centímetros y el segundo, a partir de 84 centímetros en adelante. Si se observa ahora la gráfica 6.6a

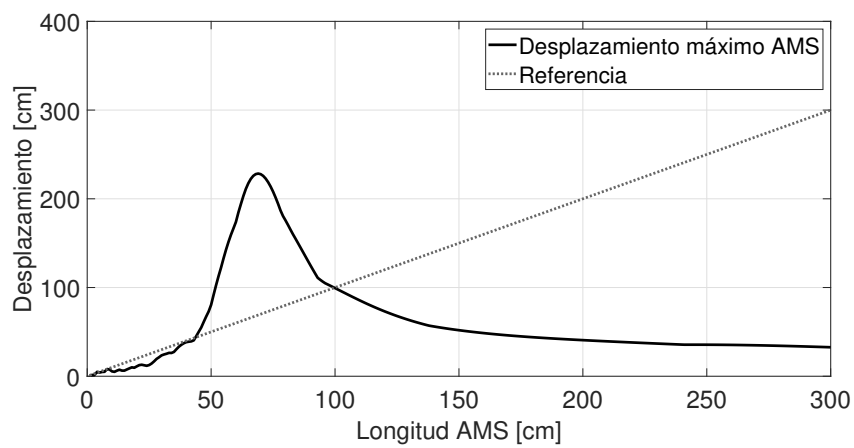
6. ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL MÉTODO PROPUESTO



a) $\mu = 5\%$



b) $\mu = 10\%$



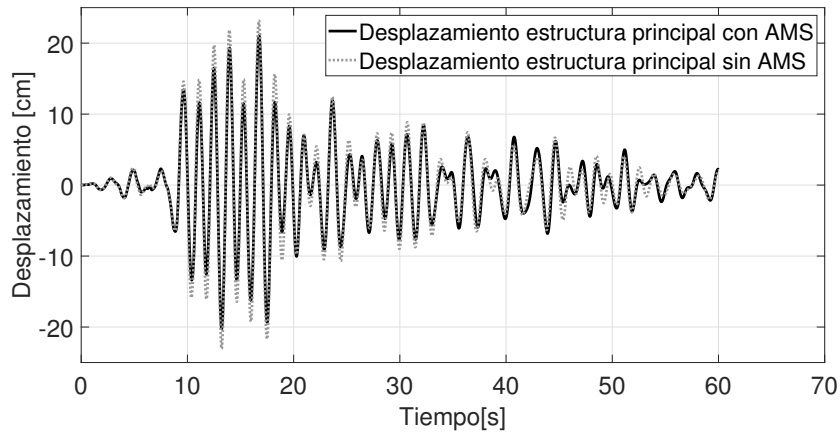
c) $\mu = 20\%$

Figura 6.7: Desplazamientos máximos del sistema vs longitud del AMS para $T_n = 2s$.

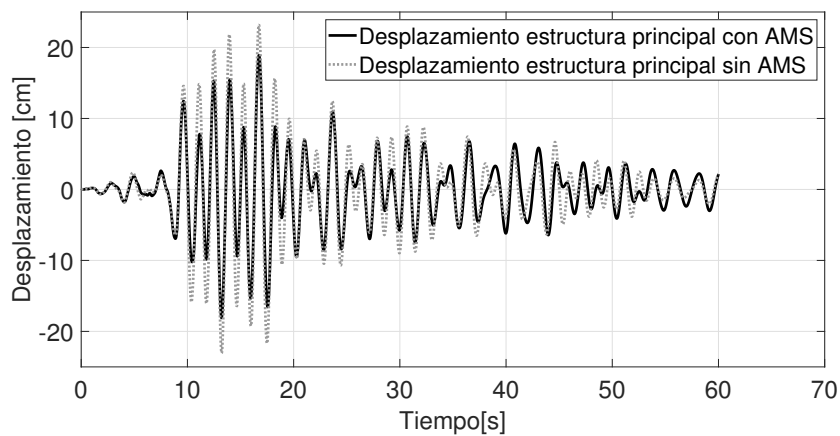
se aprecia que dentro de estos intervalos, la longitud que genera desplazamientos estructurales menores, en relación con los desplazamientos máximos sin AMS, es la longitud de 24 centímetros, esto es para un AMS con un 5 % de la masa de la estructura. Si se utiliza este mismo criterio para los siguientes dos valores de μ se tiene que la longitud óptima del péndulo es 28 centímetros si su masa es el 10 % de la masa de la estructura y 43 centímetros si es el 20 %. Para estas longitudes se obtuvo ahora una gráfica en donde se observa el desplazamiento de la estructura principal con y sin AMS para cada caso y los resultados se muestran en la figura 6.8, en la que se observa la respuesta de la estructura; misma que ya no presenta un comportamiento de resonancia.

El desplazamiento máximo sin AMS corresponde a un valor de 23.19 centímetros. Con una relación de masas del 5 % se obtuvo que el máximo desplazamiento estructural con AMS es de 21.05 centímetros, lo que indica una reducción del 9.22 %. Para una relación de masas del 10 % y una longitud del péndulo de 28 centímetros el máximo desplazamiento estructural con AMS es de 18.92 centímetros, es decir, se disminuyó la respuesta estructural un 18.42 %. Para el último caso, con una relación de masas igual al 20 % y una longitud del péndulo de 43 centímetros el desplazamiento máximo con AMS corresponde a 13.10 centímetros, una disminución de la respuesta sísmica de 43.51 %; el cual es un porcentaje de eficiencia mucho mayor que para esta misma relación de masas en la estructura de 1.4 segundos. Por lo tanto, estos resultados indican que para este caso, en el que la estructura tiene un periodo que no corresponde al periodo de resonancia de un evento sísmico, el valor óptimo de μ también es de 0.2. Para las figuras 6.6b y c, aún hay longitudes del péndulo que disminuyen más el desplazamiento máximo estructural. Sin embargo, las ecuaciones propuestas en este trabajo no pueden

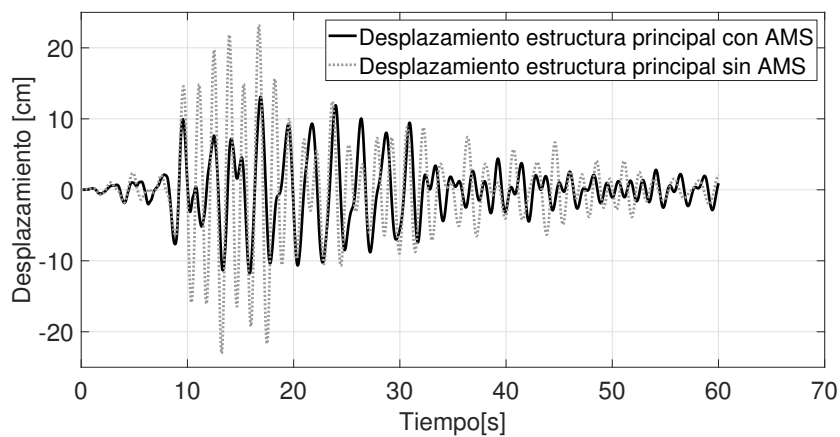
6. ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL MÉTODO PROPUESTO



a) $\mu = 5\%$



b) $\mu = 10\%$



c) $\mu = 20\%$

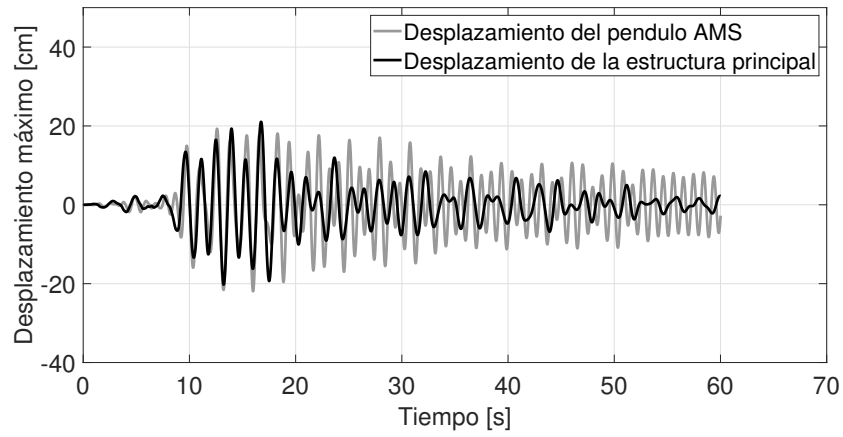
Figura 6.8: Desplazamientos de la estructura principal lo largo del tiempo con y sin AMS $T_n = 2s$.

representar el comportamiento del AMS bajo estas circunstancias. Para la figura 6.6c, que corresponde a una relación de masas del 20 %, la longitud óptima considerada genera el menor desplazamiento máximo estructural, y el desplazamiento del AMS para esta longitud sí es factible.

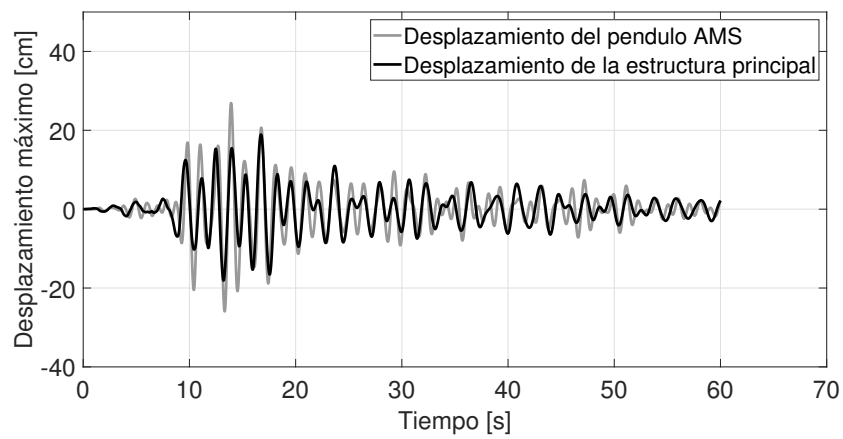
Las gráficas que presentan tanto el desplazamiento del péndulo como el de la estructura principal respecto al tiempo, para sus respectivas longitudes óptimas, se encuentran en la figura 6.9.

En las figuras 6.9a y b, se observa que el péndulo actúa en fase con la estructura durante casi todo el evento sísmico, a pesar de eso, la estructura disminuye sus desplazamientos máximos con el AMS, esto puede ser debido a que, al tener una longitud del péndulo corta y un movimiento en fase, el sistema funciona como si sólo se le aumentara masa a un sistema de un grado de libertad simple, aumentando la masa, se aumenta el periodo de esta estructura simple y de acuerdo al espectro de respuesta mostrado en la figura 3.2 periodos mayores a dos segundos generan desplazamientos máximos estructurales menores. Particularmente, en la figura 6.9a, se observa que conforme el movimiento va disminuyendo su intensidad, la estructura principal y el AMS comienzan a moverse en contrafase, esto ocurre de manera similar en la gráfica de la figura 6.9b, para una relación de masas de 10 % a excepción de que en casi toda la duración del evento sísmico el AMS y la estructura se mueven en fase. También se observa que el desplazamiento del AMS disminuye como va disminuyendo el desplazamiento de la estructura, por lo que se puede decir que este sistema también se comportó como una estructura de un sólo grado de libertad simple pero durante todo el movimiento. Para el tercer caso, cuando se tiene una estructura con un AMS con una relación μ igual a 20 % los desplazamientos del AMS aumentan de manera considerable. No obstante, el

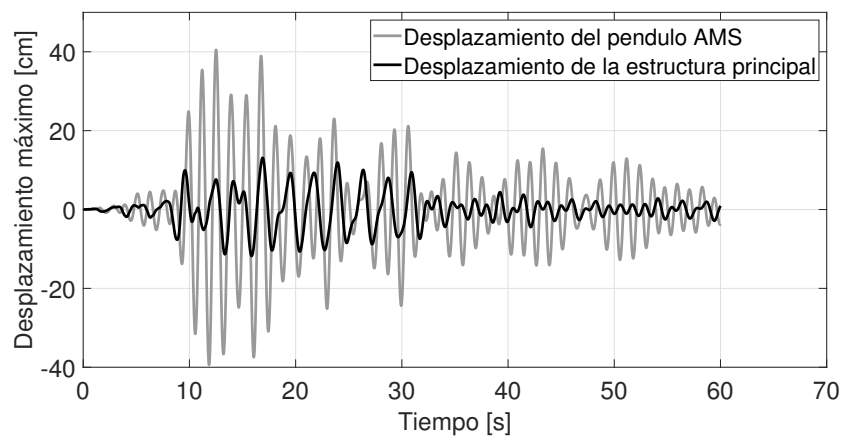
6. ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL MÉTODO PROPUESTO



a) $\mu = 5\%$



b) $\mu = 10\%$



c) $\mu = 20\%$

Figura 6.9: Desplazamientos AMS y estructura principal a lo largo del tiempo para $T_n = 2s$.

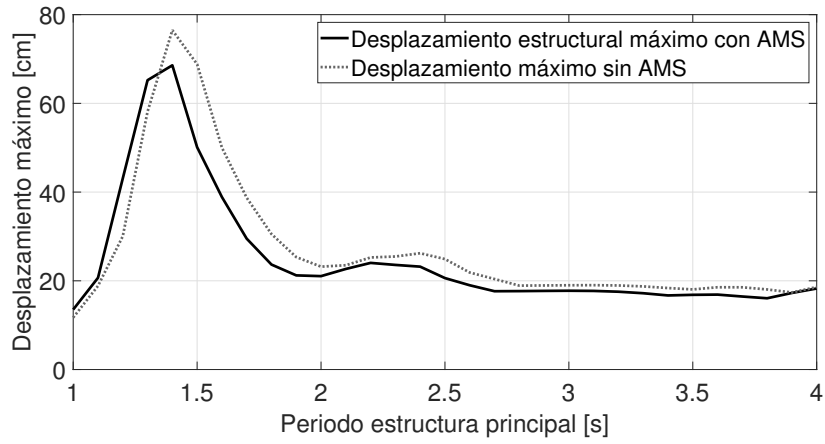
desplazamiento máximo de la estructura principal disminuye también de manera considerable. El movimiento del sistema en conjunto aparece en fase durante el intervalo de máxima respuesta y en contrafase durante el intervalo de respuesta menor, lo que coincide con los resultados obtenidos para relaciones de masa de 5 y 10%. Esto que podría confirmar que entre mayor masa colocada en el AMS que cuente con una longitud corta, en estructuras que no estén dentro del intervalo de resonancia, la estructura tendría el comportamiento adecuado, en donde para mayor masa menor desplazamiento. En la realidad, si se tuviera una estructura que por sí sola contara un periodo de 2 segundos, podría ser que de sólo agregar masa en el nivel superior su respuesta sería menor para un el movimiento sísmico usado.

Para las longitudes óptimas también se graficó un espectro de respuesta en términos de desplazamientos para periodos estructurales que van de 1 a 4 segundos, comparada con el espectro de respuesta sin AMS. Los resultados se muestran en la figura 6.10.

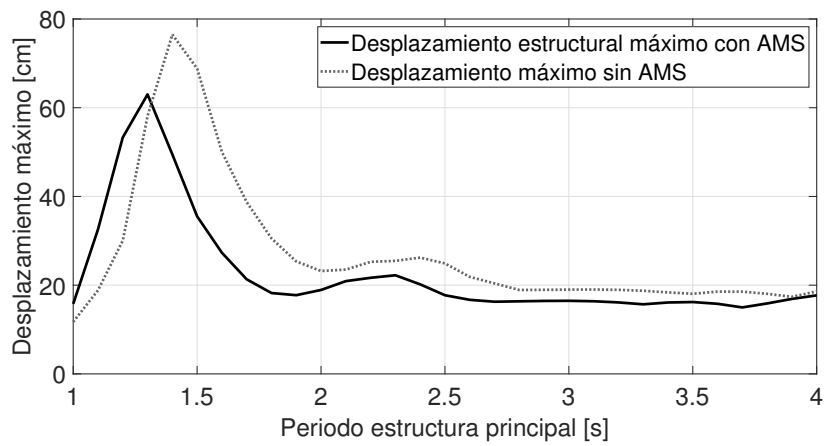
Las gráficas presentadas indican, en primera instancia, que para una estructura con $T_n = 1.4s$ la respuesta es menor para las longitudes ahora consideradas, comparado con la figura 6.5. Sin embargo, estas longitudes resultan inválidas para las ecuaciones debido a que no proporcionan valores representables si se refiere al movimiento del AMS. Es por ello que estas longitudes no fueron tomadas en cuenta para el análisis de la estructura con $T_n = 1.4s$

Volviendo al análisis de la estructura con $T_n = 2s$, en la gráfica 6.10a, se observa que si se coloca un AMS con $\mu = 0.05$ y $L = 24cm$ en estructuras con un periodo natural de vibrar de 1.5 segundos a 4 segundos los desplazamientos máximos disminuirían. Inclusive, ahora que se tiene una longitud más pequeña del

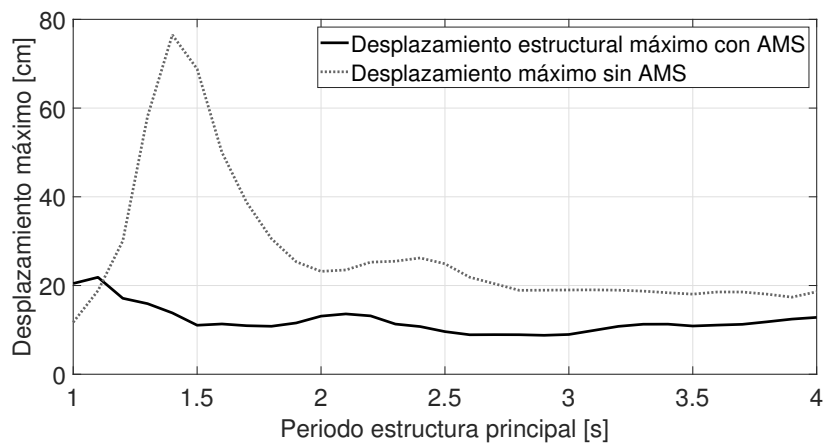
6. ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL MÉTODO PROPUESTO



a) $\mu = 5\%$ $L = 24\text{cm}$



b) $\mu = 10\%$ $L = 28\text{cm}$



c) $\mu = 20\%$ $L = 43\text{cm}$

Figura 6.10: Espectro de respuesta con y sin AMS para longitudes de 24, 28 y 43 cm.

péndulo en comparación con la longitud óptima que se obtuvo para la estructura de 1.4 segundos, el espectro indica que efectivamente para una relación de masas pequeña el péndulo provoca resultados favorables para estructuras con periodo natural de vibración fuera del intervalo de resonancia. Sin embargo, en este caso, esto se observa sólo en el intervalo de periodos mayores que el periodo de resonancia. Se tendría que corroborar que esta longitud del AMS pueda representarse de forma correcta con las ecuaciones presentadas, para dichos periodos. Respecto al periodo en estudio, se aprecia que el AMS sí fue efectivo, ya que disminuyó el valor de desplazamiento máximo en la estructura principal.

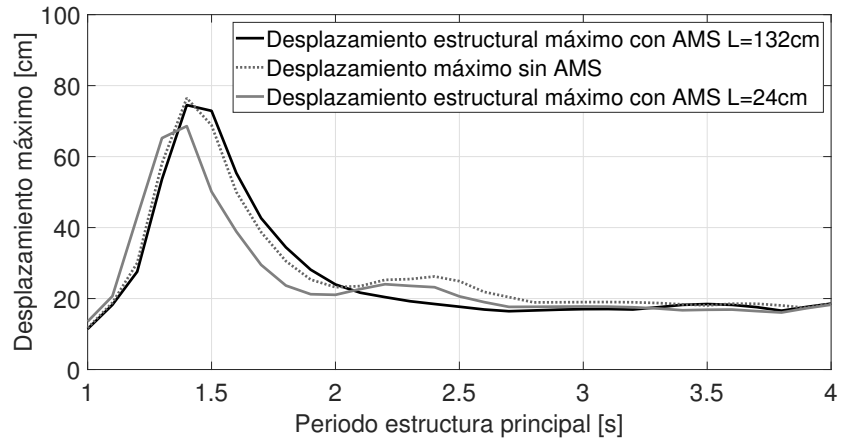
La gráfica 6.10b, que corresponde a una relación de masas de 10 %, es muy parecida a la figura 6.10a. Sin embargo, parece ser que los desplazamientos tendrían una disminución mayor para estructuras con periodos mayores a 1.3 segundos aproximadamente, debido a que esta longitud del péndulo también es corta. Para el periodo en estudio, de 2 segundos, se nota una separación mayor entre ambas curvas, si se compara con el espectro de respuesta con AMS para $\mu = 0.05$, por lo que como se había visto ya, esta relación de masas resulta aún más efectiva.

En la gráfica 6.10c, se obtuvo que si se coloca un AMS con $\mu = 0.2$ y una longitud de 43 centímetros, se disminuirían los desplazamientos máximos en gran proporción. Esto sucedería para casi todas las estructuras con periodos de 1 a 4 segundos si las ecuaciones representaran correctamente el movimiento del péndulo en todas estas estructuras con un AMS de esta longitud. Si se observa únicamente el periodo estructural de 2 segundos se nota claramente que de las tres relaciones de masas, la más grande es la más favorable.

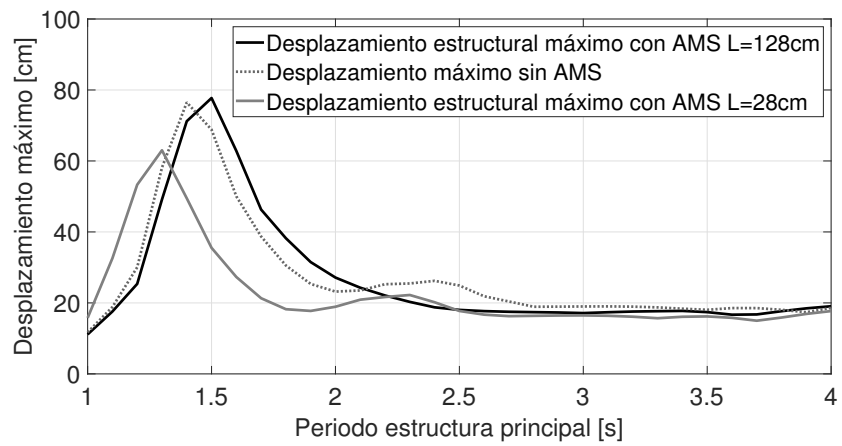
La figura 6.11 representa una comparación de los espectros de respuesta obtenidos en cada caso. De acuerdo a esta figura la curva que representa el despla-

6. ANÁLISIS NUMÉRICO CON EL MÉTODO PROPUESTO

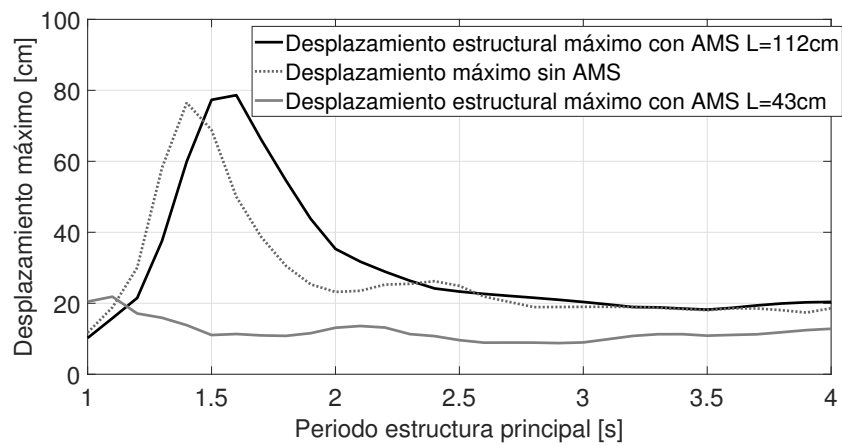
zamiento con AMS solo se recorre hacia la izquierda y hacia abajo en la gráfica, conforme se disminuye la longitud del AMS. Con ello, se puede generalizar que para longitudes cortas el AMS es efectivo en estructuras con periodos de vibrar mayores al periodo "pico", pues en este intervalo, la curva de desplazamiento con este tipo de AMS está por debajo del espectro sin AMS, mientras que la curva con AMS de longitud larga se encuentra por encima de los desplazamientos que se tendrían sin AMS. Las longitudes largas son efectivas en estructuras con periodos de vibrar menores a este periodo "pico", pues en este intervalo la curva que representa el desplazamiento con AMS largo está por debajo del espectro sin AMS, mientras que la curva de desplazamientos con AMS corto está por encima. Aunque el AMS siempre disminuye los desplazamientos para los periodos en estudio, el espectro de respuesta de la estructura con AMS para longitudes cortas muestra un mayor porcentaje de disminución en los desplazamientos máximos estructurales que los AMS con longitudes largas.



a) $\mu = 5\%$



b) $\mu = 10\%$



c) $\mu = 20\%$

Figura 6.11: Comparación de espectro de respuesta con y sin AMS entre las longitudes óptimas de cada relación de masas.

Análisis con programa comercial de elementos finitos

7.1. Estructura de un grado de libertad con $T_n = 1.4s$

Las propiedades descritas en la Tabla 4.1 fueron modeladas en un marco en 2F en el programa SAP2000[1], el cual se mostró en la figura 4.3, para un periodo natural de vibrar de 1.4 segundos. El péndulo del AMS se modeló con la longitud óptima calculada en la sección anterior, es decir, una longitud de 132 centímetros para una relación de masas del 5 %, una longitud de 128 centímetros para una relación de masas del 10 % y una longitud de 112 centímetros para una relación de masas del 20 %. Los resultados obtenidos en SAP2000[1] en términos de desplazamientos fueron comparados con los desplazamientos de la estructura sin AMS y con los desplazamientos de la estructura con AMS obtenidos mediante el análisis numérico. Dichas comparaciones se muestran en la figura 7.1. Para estas gráficas se puede notar que el desplazamiento de la estructura con AMS en ambos

7. ANÁLISIS CON PROGRAMA COMERCIAL DE ELEMENTOS FINITOS

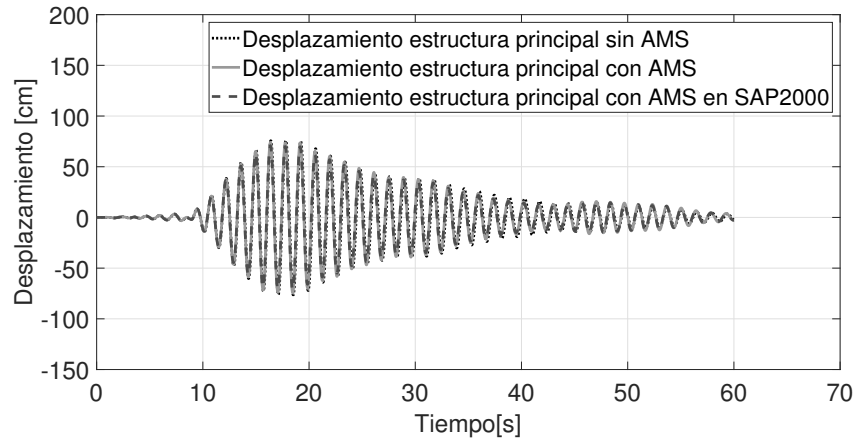
métodos es similar. Este comportamiento se puede observar sobre todo en la figura 7.1c, para una relación de masas del 20 %. Dado que las curvas tienden a encimarse se calculó el porcentaje en que difieren los resultados obtenidos con las ecuaciones presentadas respecto a los obtenidos en SAP2000[1]. Para un péndulo de 132 centímetros el desplazamiento máximo calculado mediante las ecuaciones difiere un 5.03 % respecto al desplazamiento máximo calculado con SAP2000[1]. Para un péndulo de 128 centímetros y una relación de masas del 10 % el desplazamiento máximo obtenido entre ambos métodos difiere un 3.39 %. Por último, para el péndulo de 112 centímetros y $\mu = 0.2$, el desplazamiento máximo obtenido difiere un 21.54 %. Aunque se observan algunas diferencias, se confirma que el AMS es efectivo para reducir la respuesta sísmica, particularmente cuando se tiene una relación de masas grande (es decir $\mu = 0.2$).

7.1.1. Estructura de un grado de libertad con $T_n = 2s$

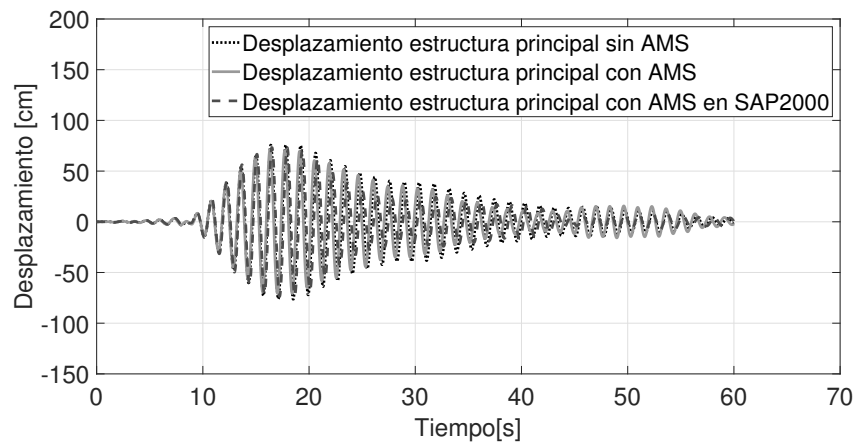
Ahora se analizó un marco en 2D con periodo de vibrar de 2 segundos. El péndulo del AMS se modeló con la longitud óptima calculada en la sección 4.1.2., es decir, una longitud de 24 centímetros para una relación de masas del 5 %, una longitud de 28 centímetros para una relación de masas del 10 % y una longitud de 43 centímetros para una relación de masas del 20 %. Las gráficas que comparan los desplazamientos de la estructura sin AMS, los desplazamientos de la estructura con AMS obtenidos mediante el análisis numérico y aquellos obtenidos en SAP2000[1] se muestran en la figura 7.2.

Para este caso, también se puede notar que el comportamiento del sistema con ambos métodos es similar para los tres casos estudiados. Para un péndulo

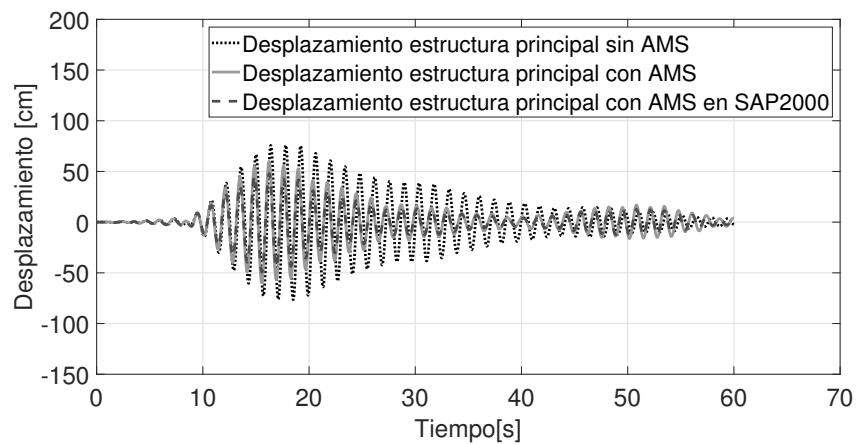
7.1 Estructura de un grado de libertad con $T_n = 1.4s$



a) $\mu = 5\%$ $L = 132cm$



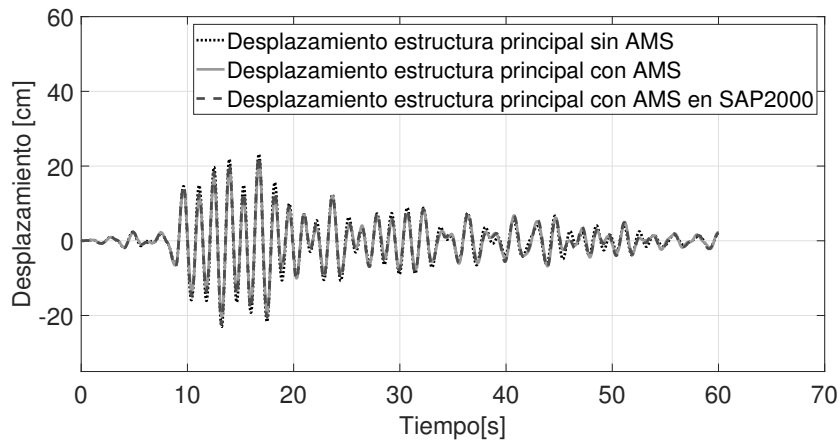
b) $\mu = 10\%$ $L = 128cm$



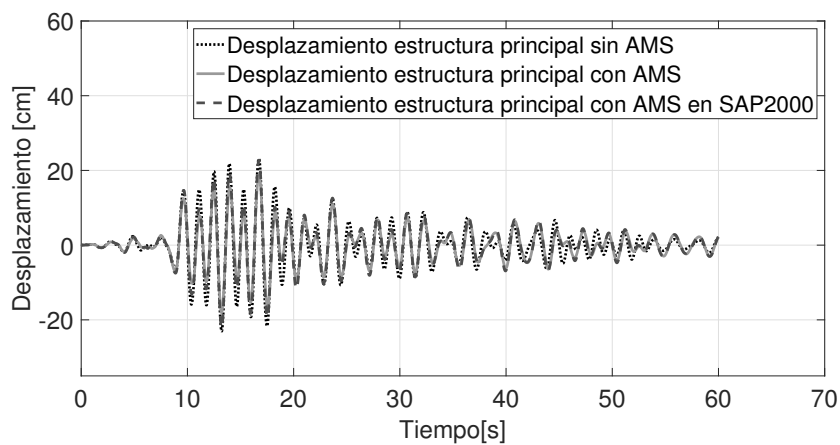
c) $\mu = 20\%$ $L = 112cm$

Figura 7.1: Desplazamientos estructurales mediante SAP2000[1] con y sin AMS $T_n = 1.4s$.

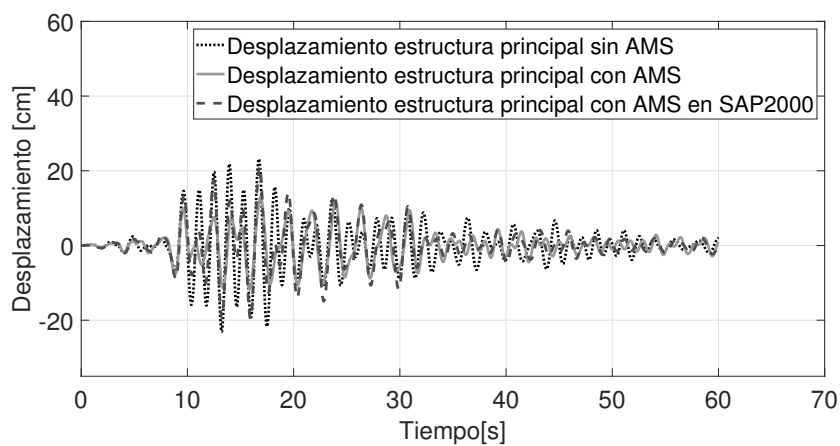
7. ANÁLISIS CON PROGRAMA COMERCIAL DE ELEMENTOS FINITOS



a) $\mu = 5\%$ $L = 24\text{cm}$



b) $\mu = 10\%$ $L = 28\text{cm}$



c) $\mu = 20\%$ $L = 43\text{cm}$

Figura 7.2: Desplazamientos estructurales mediante SAP2000[1] con y sin AMS $T_n = 2\text{s}$.

de 24 centímetros, el porcentaje en el que difieren los desplazamientos máximos obtenidos con las ecuaciones y los obtenidos en SAP2000[1] es de 7.01 %. Para un péndulo de 28 centímetros y una relación de masas del 10 % el desplazamiento máximo obtenido entre ambos métodos difiere un 16.94 %. Por último, para el péndulo de 43 centímetros y $\mu = 0.2$ se observa que los métodos difieren en mayor medida. El desplazamiento máximo obtenido entre ambos métodos difiere un 37.72 %. Estos cálculos indican que SAP modeló mejor este sistema para una relación de masas de $\mu = 5\%$. A pesar de las diferencias entre los resultados de SAP2000[1] y los obtenidos con el método propuesto se puede decir que un AMS es menos eficiente para una estructura de un grado de libertad con $T_n = 2s$ que para una estructura con $T_n = 1.4s$. Para una relación de masas $\mu = 0.2$ el sistema resultó más eficiente al modelarlo en SAP2000[1], pues disminuyó los desplazamientos en mayor medida.

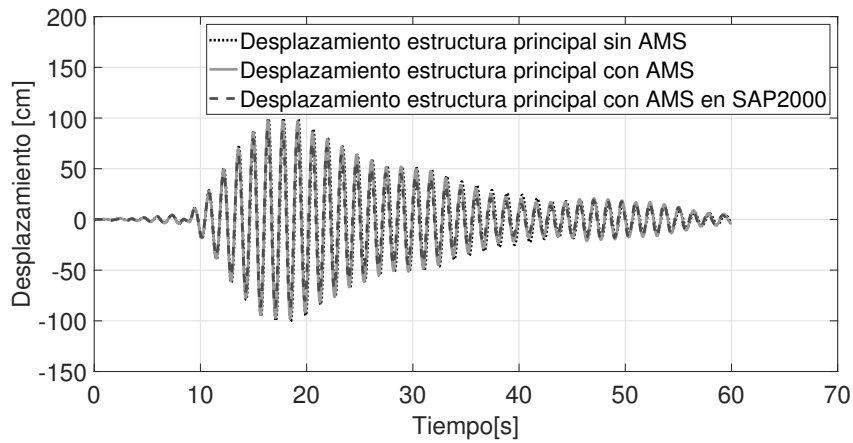
7.2. Estructura de varios grados de libertad con

$$T_n = 1.4s$$

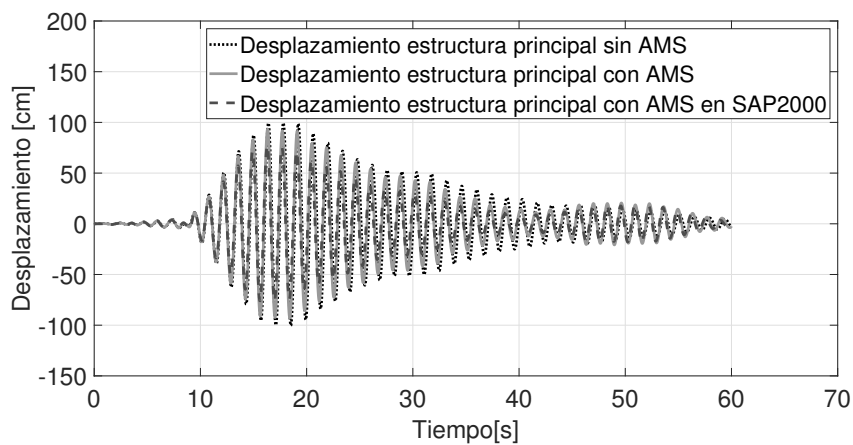
Las mismas longitudes óptimas fueron ocupadas para el modelo en SAP2000[1] para un edificio con T_n igual 1.4 segundos. Los resultados obtenidos en términos de desplazamientos se muestran en la figura 7.3.

Se observa que los resultados obtenidos con ambos también son parecidos gráficamente para modelos de varios grados de libertad. De acuerdo con estas gráficas el porcentaje de diferencias del método propuesto con respecto a lo obtenido en SAP2000[1] para un péndulo de 132 centímetros en términos de desplazamiento

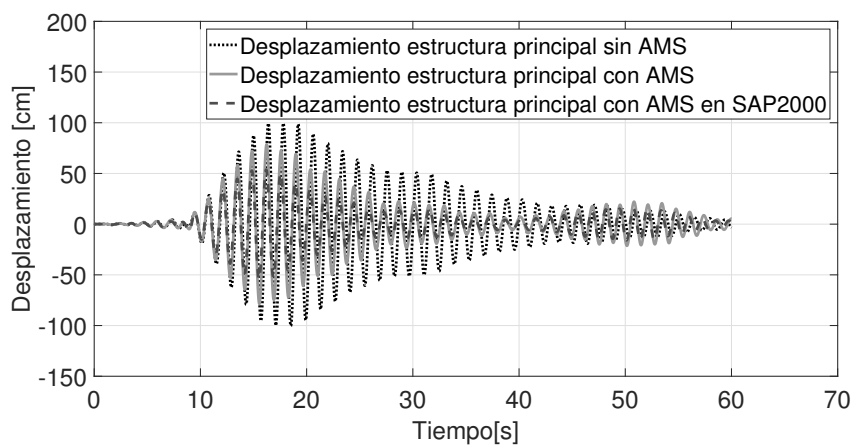
7. ANÁLISIS CON PROGRAMA COMERCIAL DE ELEMENTOS FINITOS



a) $\mu = 5\%$ $L = 132\text{ cm}$



b) $\mu = 10\%$ $L = 128\text{ cm}$



c) $\mu = 20\%$ $L = 112\text{ cm}$

Figura 7.3: Desplazamientos estructurales mediante SAP2000[1] para edificio con $T_n = 1.4\text{ s}$.

máximo calculado es de 11.62% . Para un péndulo de 128 centímetros y una relación de masas del 10% el desplazamiento máximo obtenido entre ambos métodos difiere un 20.19%. Por último, para el péndulo de 112 centímetros y $\mu = 0.2$ se tiene un porcentaje de diferencia, en cuanto a los desplazamientos máximos de 43.36%.

En cuanto a la efectividad del sistema con AMS, en SAP2000[1] se obtuvo que para estos tres modelos con diferente relación de masa, los desplazamientos máximos disminuyen en mayor medida que con el método propuesto. Para el modelo con $\mu = 0.05$, con el método numérico se disminuye la respuesta máxima un 2.59% mientras que con SAP2000[1] se disminuye un 12.74%. Para el modelo con $\mu = 0.1$ esta reducción resultó de 6.93% mediante el método, mientras que con el programa se obtuvo una reducción de 23.48%. Por último, para el modelo con $\mu = 0.2$ se pasó de una reducción del 21.62% a 45.97%. Con lo que se concluye que con una relación de masas más grande, se tiene una mayor efectividad del AMS, siendo éste más efectivo para estructuras de varios grados de libertad.

El hecho de que no se hayan obtenido exactamente los mismos porcentajes, tanto de efectividad como de diferencia, para estructuras de varios grados de libertad y un grado de libertad se debe a que SAP2000[1] puede estar tomando en cuenta la participación de los modos de vibrar superiores, mientras que con el método propuesto se considera un sólo modo de vibrar. El análisis en SAP2000[1] disminuyó más los desplazamientos laterales. Aunque de forma gráfica ambos métodos mostraran similitud es importante desarrollar un método más preciso para un análisis correcto de la seguridad en las estructuras equipadas con AMS.

7.2.1. Estructura de varios grados de libertad con $T_n = 2s$

Los resultados obtenidos mediante SAP2000[1] en términos de desplazamientos para el edificio con un periodo de vibrar de 2 segundos, con AMS de longitud óptima se muestran en la figura 7.4

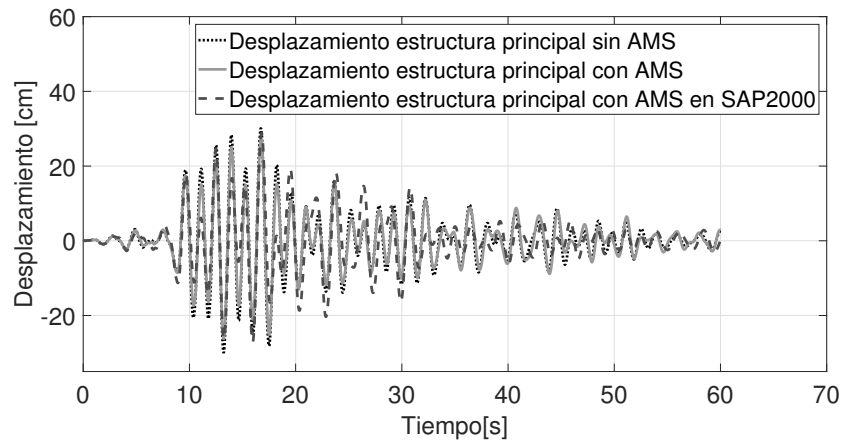
Estos resultados indican que entre ambos métodos el porcentaje de diferencias en los desplazamientos máximos para una relación de masas de 5% es de 5.36%. Para una relación de masas de 10% los resultados difieren un 27.53%. Por último, para una relación de masas de 20% se tiene que el porcentaje de error en el desplazamiento máximo es de 5.49%. A pesar de que estos porcentajes no resultaron tan grandes, se observa que gráficamente ambos métodos son muy variados, específicamente en las figuras 7.4b y c. Esto podría ser debido a que al agregarle tan alto porcentaje de masa en el último nivel la estructura se mueva de forma diferente a SAP2000[1] y por lo tanto los resultados de desplazamientos son diferentes.

Si se comparan los resultados obtenidos con aquellos obtenidos con el método propuesto se obtuvo una disminución en el desplazamiento máximo de 9.22%, mientras que en SAP2000[1] se disminuye un 4.09%, todo esto para $\mu = 0.05$. Para $\mu = 0.1$ la reducción con el método propuesto resultó de 18.42%, mientras que con el programa resultó de 36.04%. Por último, para $\mu = 0.2$ la reducción pasó de 43.51% a 40.23% con el modelo en SAP2000[1]. Esto indica que, en general, el AMS resultó efectivo para edificios con un periodo de vibrar de 2 segundos, pero menos efectivo de lo esperado y menos efectivo también que para estructuras con $T_n = 1.4s$.

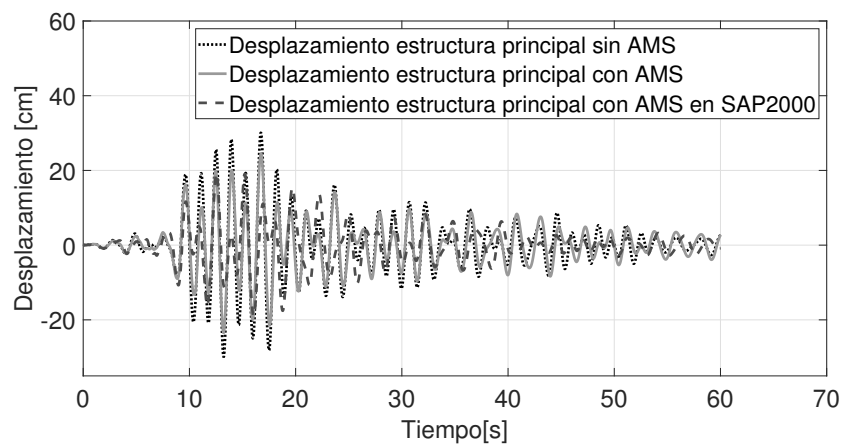
Para los modelos de varios grados de libertad y un grado de libertad, SAP2000[1]

modeló de manera muy parecida al método presentado las estructuras con periodo de 1.4 segundos en cada relación de masas. La reducción en la respuesta lateral resultó mayor en los modelos de varios grados de libertad ($T_n = 1.4s$) realizados en SAP2000[1], por lo que de acuerdo a SAP2000[1] es más factible colocar un AMS en este tipo de estructuras.

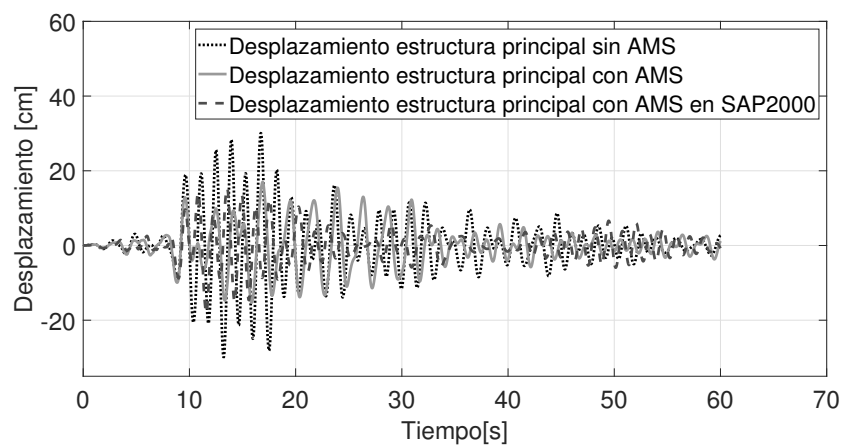
7. ANÁLISIS CON PROGRAMA COMERCIAL DE ELEMENTOS FINITOS



a) $\mu = 5\%$ $L = 24\text{cm}$



b) $\mu = 10\%$ $L = 28\text{cm}$



c) $\mu = 20\%$ $L = 43\text{cm}$

Figura 7.4: Desplazamientos estructurales mediante SAP2000[1] para edificio con $T_n = 2\text{s}$.

Conclusiones y recomendaciones

Mediante el método propuesto en este trabajo se obtuvo que tanto para estructuras con periodo natural de vibrar igual al dominante del suelo como para estructuras fuera de la zona de resonancia, el AMS tipo péndulo disminuyó los desplazamientos máximos estructurales, con relaciones de masas de 5, 10 y 20 %.

Otra observación realizada fue que los periodos naturales de vibrar del péndulo óptimos (que dependen de las longitudes) no resultaron corresponder al periodo de la estructura principal a la que se instalaban. En algunos casos, se observaron longitudes del péndulo que generan resultados más favorables por lo que se recomienda estudiar el movimiento del AMS a mayor profundidad en cada caso de aplicación.

Las longitudes óptimas del AMS encontradas para estructuras en la zona de resonancia fueron más grandes que para las estructuras fuera de esta zona. La dimensión de las primeras fue de más del doble de la dimensión de las segundas.

El valor óptimo en cuanto a la relación de masas obtenido mediante el análisis numérico fué de $\mu = 0.2$ para los dos periodos analizados. Se aprecia que cuando se tiene una relación de masas más alta el AMS resulta más efectivo.

Se concluye que cuando se tienen longitudes del péndulo de aproximadamente

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1 metro a 1.3 metros el AMS parece no afectar la respuesta sísmica en estructuras con periodos de vibrar mayores a 2.5 segundos. En cambio, cuando se tienen longitudes de 20 centímetros a 45 centímetros aproximadamente el AMS parece disminuir los desplazamientos máximos en estructuras con periodos también mayores a 2.5 segundos. Es recomendable corroborar estos resultados analizando cada uno de estos intervalos de longitudes

En cuanto a la comparación con SAP2000[1], se observó que el programa arrojó resultados parecidos a los obtenidos con el método presentado para la estructura dentro de la zona de resonancia. La diferencia entre ambos resultados se puede atribuir a la influencia de los modos superiores. Sin embargo, los resultados fueron favorables ya que en los modelos dentro de la zona de resonancia, realizados en SAP2000[1] se obtuvo una reducción mayor en los desplazamientos máximos, comparados con los obtenidos con el método propuesto, especialmente en los modelos de varios grados de libertad. Para los modelos fuera de la zona de resonancia en SAP2000[1] también se obtuvo una reducción, lo que corrobora la efectividad del AMS para todos los casos estudiados.

Con este trabajo también se logró confirmar que el AMS es más efectivo cuando se utiliza en estructuras cuya respuesta está dominada por el modo fundamental de vibrar.

Se recomienda estudiar el funcionamiento de este sistema de control de vibraciones con diferentes registros sísmicos de las diferentes zonas geotécnicas de la Ciudad de México para poder comprobar su efectividad, continuar con un estudio más detallado y posteriormente tener la certeza de que su aplicación mejore la seguridad en las estructuras.

También se recomienda estudiar su efectividad en los casos donde la inter-

acción suelo estructura y la torsión pueden producir efectos significativos en la respuesta de las estructuras.

Referencias

- [1] Computers and Structures Inc. **Structural Analysis Program**.
- [2] E. Reinoso. *Riesgo Sísmico de la Ciudad de México*. Academia Mexicana de Ingeniería, México, 1 edición, 2000.
- [3] C. A. Cabada. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.
- [4] J. J. Connor. *Introduction to Structural Motion Control*. Pearson Education, United States, 1 edición, 2002.
- [5] J. A. Oviedo y M. P. Duque. **Sistemas de control de respuesta sísmica en ediftcaciones**. *Revista EIA*, **6**:105–120, 2016.
- [6] L. E. García. *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*. Universidad de los Andes, Colombia, Bogotá, 1 edición, 1998.
- [7] J. E. Hurtado. *Introducción a la dinámica de estructuras*. Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Manzaniles, Colombia, 1 edición, 2000.

REFERENCIAS

- [8] A. K. Chopra. *Dinámica de estructuras*. Pearson Education, México, 4 edición, 2014.
- [9] S. Elias y V. Matsagar. **Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers**. *Annual Reviews in Control*, **44**:129–156, 2017.
- [10] A. Batou y S. Adhikari. **Optimal parameters of viscoelastic tuned-mass dampers**. *Journal of Sound and Vibration*, **445**:17–28, 2019.
- [11] E. J. Aliante. Tesis licenciatura, Universidad Austral de Chile, 2009.
- [12] G. F. Dargush M. C. Constantinou, T. T. Soong. *Riesgo Sísmico de la Ciudad de México*. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, Nueva York, 1 edición, 1998.
- [13] J. P. Den Hartog. *Mechanical vibrations*. Dover Publications, Inc., Nueva York, Estados Unidos, 4 edición, 1985.
- [14] J. Ormondroyd y J. P. Den Hartog. **The theory of dynamic vibration absorber**. *The theory of the dynamic vibration absorber*, pages 9–22, 1928.
- [15] S. H. Crandall y W. D. Mark. *Random vibration in mechanical systems*. Academic Press Inc., Nueva York, Estados Unidos, 2 edición, 1963.
- [16] P. H. Wirsching y G. W. Campbell. **Minimal structural response under random excitation using the vibration absorber**. *Earthquake engineering and structural dynamics*, **2**:303–312, 1974.
- [17] G. B. Warburton. **Reduction of Harmonic Response of Cylindrical Shells**. *Journal of engineering for industry*, **97**:1371–1377, 1975.

- [18] G. Warburton y E. Ayorinde. **Minimizing Structural Vibrations with Absorbers.** *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, **8**:219–236, 1980.
- [19] A. M. Kaynia, J. M. Biggs, y D. Veneziano. **Seismic Effectiveness of Tuned Mass Dampers.** *Journal of the Structural Division*, **107**:1465–1484, 1981.
- [20] R. E. Klingner J. R. Sladek. **Effect of tuned-mass dampers on seismic response.** *Journal of structural engineering*, **109**:2004–2009, 1983.
- [21] R. Villaverde. **Reduction in seismic response with heavily-damped vibration absorbers.** *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, **13**:33–42, 1985.
- [22] J. P. Paniagua, A. Gómez, y J. Iglesias. **Sistema amortiguador hidrodinámico.** *VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería*, **3**:227–236, 1989.
- [23] T. Miyama. **Seismic Response of Multi-Storey Frame Equipped with Energy Absorbing Storey on its Top.** *Proc. 10th World Conf. on Earthquake Engineering*, **7**:4201–4206, 1992.
- [24] L. Esteva. **Respuesta Sísmica de Cortante con Osciladores Resonantes. Parte I. Funciones de Amplificación Dinámica.** *Informe al D.D.F. Instituto de Ingeniería UNAM. Proyecto 3521*, 1993.
- [25] M. P. Sacks y J. C. Swallow. **Tuned mass dampers for towers and buildings.** In *Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation*, páginas 640– 645, 1993.

REFERENCIAS

- [26] C. C. Lin, C. M. Hu, Jer-Fu J. F. Wang, y R. Y. Hu. **Vibration Control Effectiveness of Passive Tuned Mass Dampers.** *Journal- Chinese Institute of Engineers*, **17**:367–376, 04 1994.
- [27] T. T. Soong y G. F. Dargush. *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. John Wiley and sons, Chichester, Reino Unido, 1 edición, 1997.
- [28] R. Soto-Brito y S. E. Ruiz. **Influence of Ground Motion Intensity on the Effectiveness of Tuned Mass Dampers.** *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**:1255–1271, 1999.
- [29] S. K. Rasouli y M. Yahyai. **Control of response of structures with passive and active tuned mass dampers.** *The Structural Design of Tall Buildings*, **11**:1–14, 2002.
- [30] K. K. F. Wong y Y. L. Chee. **Energy dissipation of tuned mass dampers during earthquake excitations.** *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **13**:105–121, 2004.
- [31] C. Moutinho. **An alternative methodology for designing tuned mass dampers to reduce seismic vibrations in building structures.** *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, **41**:2059–2073, 11 2012.
- [32] A. J. Roffel, S. Narasimhan, y T. Haskett. **Performance of Pendulum Tuned Mass Dampers in Reducing the Responses of Flexible Structures.** *Journal of Structural Engineering*, **139**(12):04013019, 2013.

- [33] R. R. Gerges y B. J. Vickery. **Optimum design of pendulum-type tuned mass dampers.** *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **14**(4):353–368.
- [34] R. C. Battista, R. S. Rodrigues y M. S. Pfeil. **Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces.** *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **91**(8):1051 – 1067, 2003. First Americas Conference on Wind Engineering.