



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD ZACATENCO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE MECATRÓNICA

Acoplamiento Lateral Pasivo/Semiactivo en Estructuras Tipo Edificio

Tesis que presenta el

Ing. Ismael Garcia Trinidad

Para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias

En la especialidad de

Ingeniería Eléctrica

Director de Tesis:
Dr. Gerardo Silva Navarro

Agradecimientos

Agradezco a Dios por extenderme el tiempo de vida, a pesar de tan difíciles momentos, siempre tuve en su guía un rayo de luz que me permitiera seguir preparándome e ir siempre hacia adelante.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme otorgado una beca para poder realizar mis estudios de maestría en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N. (CINVESTAV).

A mis padres Emilio y Aurea por apoyarme, en los momentos más difíciles de mi vida, estando presentes, teniéndome paciencia infinita con cada nuevo proyecto.

A mis hermanos Lety, Oscar, Cristina, por soportarme tantos años extendiéndome siempre la mano.

Al Dr. Gerardo Silva Navarro por creer en mí, por brindarme su amistad, por adoptarme en el laboratorio de vibraciones mecánicas, por apoyarme durante toda mi estancia en la maestría, nunca me faltó un buen consejo, una respuesta a una duda, siempre al pendiente de mi promedio para obtener y conservar la beca, le agradezco todo el apoyo que me ha dado, ha sido mi guía académica.

A mis sinodales Dr. Alejandro Rodríguez Ángeles y al Dr. Luis Gerardo Trujillo Franco, por en tan corto tiempo darme su confianza y apoyo en la recta final del proceso.

Al Colegio de Profesores de la Sección de Mecatrónica del Departamento de Ingeniería Eléctrica, por creer en mí, Dr. Gerardo Silva Navarro, Dr. Jaime Álvarez Gallegos, Dr. Alejandro Rodríguez Ángeles, Dr. Hebertt José Sira Ramírez, Dr. Hugo Rodríguez Cortés, Dr. Rafael Castro Linares, Dr. Martín Velasco Villa, Dr. Carlos Alberto Cruz Villar; primeramente, aceptándome en el programa de maestría a pesar de que no tenía el promedio ni beca al inicio, la posibilidad de seguir con mi desarrollo académico; durante el transcurso cometí varios tropiezos, incluso quedando en duda mi permanencia, aún así, siempre me impulsaron hacia delante y nunca me faltó un buen consejo.

A mis compañeros de generación y amigos Gudiño, Marcos, Alan, Jose Luis, Aldo, Alex, Dexais, Adriana, Pamela, Waldo, Uriel, Tomas, Jesus, Julio, Lius, Jonathan, Jorge por brindarme su amistad y siempre me brindaron una mano, apoyandome a lo largo de esta travesía.

A mis compañeros de laboratorio Gudiño por hacerme el paro con las cosas electrónicas ayudandome con los experimentos, Elsa siempre enseñandome a escribir a usar el equipo haciendome bulling, Ariadna que me ayudo amablemente a construir los edificios de aluminio, Ana explicandome en matlab siempre dandome animos, Adriana explicandome junto con Marcos lo que no entendia, Waldo contando sus chistes que nunca entendí, les agradezco su gran amistad y siempre brindarme su ayuda cuando la necesitaba.

A los auxiliares por brindarme su apoyo.

Resumen

La alta densidad de población, combinada con un alta actividad sísmica en la Ciudad de México, exige una mejor manera de proteger los edificios de las vibraciones ocasionadas por los terremotos. Por lo tanto, se requiere aplicar técnicas de análisis modal experimental, para obtener la respuesta frecuencial y las frecuencias naturales que causarían un daño fatal a la estructura en presencia de excitación a través del suelo o la base. Una estrategia de control de vibraciones, en estructuras tipo edificio, consiste en acoplar lateralmente dos o más estructuras, con el fin de proteger los edificios de movimientos sísmicos, inyectando amortiguamiento y atenúando las frecuencias más representativas en la estructura mecánica o civil. Adicionalmente, se pueden incluir materiales y actuadores inteligentes para mejorar el desempeño dinámico y robustez del sistema de estructuras acopladas, como es la aplicación de amortiguadores con fluido magnetoreológico y técnicas de control semiactivo de vibraciones. El trabajo de tesis aborda estos problemas, considerando el estado del arte, modelación de estructuras tipo edificio, validación con técnicas de análisis modal experimental, análisis del acoplamiento lateral, aplicación de esquemas de control semiactivo de vibraciones basadas en la retroalimentación positiva de la posición, y la evaluación experimental en lazo abierto y lazo cerrado con excitación de tipo armónica (barrido frecuencial) y sísmica.

Abstract

The high population density, combined with high seismic activity in Mexico City, demands a better way to protect buildings from the vibrations caused by earthquakes. Therefore, it is required to apply experimental modal analysis techniques, to obtain the frequency response and the natural frequencies that would cause fatal damage to the structure in the presence of excitation through the ground or the base. A vibration control strategy, in building-like structures, consists of laterally coupling two or more structures, in order to protect the buildings from seismic motion, thus injecting damping and attenuating the most representative frequencies in the mechanical or civil structure. In addition, smart materials and actuators can be included to improve the dynamic performance and robustness of the system of coupled structures, such as the application of shock vibration absorbers with magnetoreological fluid and semi-active vibration control techniques. This work addresses these problems, considering the state of the art, modeling of building-type structures, validation with experimental modal analysis techniques, lateral coupling analysis, application of semi-active vibration control schemes based on positive position feedback, and experimental evaluation in open-loop and closed-loop with harmonic (frequency sine sweep) and seismic excitation.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Introducción general	1
1.2. Control de estructuras	2
1.2.1. Control pasivo	2
1.2.2. Control activo	3
1.2.3. Control semiactivo	4
1.2.4. Clasificación de métodos de control	5
1.3. Fluidos magneto reológicos (MR)	6
1.4. Aplicaciones de los amortiguadores MR	8
1.4.1. Sistemas de suspensión automotriz	8
1.4.2. Industria civil	9
1.5. Motivación	10
1.6. Objetivos de la tesis	11
1.6.1. Objetivo general	11
1.6.2. Objetivos específicos	11
1.7. Organización de la tesis	12
2. Fundamentos teóricos	13
2.1. Modelo polinomial de Choi-Lee-Park para un amortiguador MR	13
2.2. Formas modales	17
2.3. Control por Retroalimentación Positiva de la Posición.	19
2.4. Análisis del terremoto del 19 de septiembre del 2017	21
3. Modelado de una estructura tipo edificio de n pisos.	25
3.1. Modos de vibración de la estructura	26
3.2. Descripción de la plataforma experimental	30
3.3. Análisis de datos	36

4. Modelado de edificios con acoplamiento lateral	41
4.1. Modelado	42
4.2. Validación experimental	43
4.3. Comparativa de resultados experimentales	44
4.4. Primeros resultados de acoplamiento	48
5. Aplicación de control semiactivo para el acoplamiento lateral de estructuras tipo edificio	53
5.1. Edificios acoplados utilizando un amortiguador MR	54
5.2. Validación experimental sistema de control a lazo abierto.	55
5.3. Gráficas lazo abierto	58
5.4. Análisis de resultados obtenidos con el amortiguador MR.	61
5.5. Control por Retroalimentación Positiva de la Posición (PPF)	64
5.6. Análisis de estabilidad	66
5.7. Sintonización del control PPF	67
5.8. Gráficas de aceleración y desplazamiento	75
5.9. Análisis de resultados obtenidos con el barrido frecuencial	81
5.10. Aplicación de control MPPF a los sismos del 19 de septiembre.	87
6. Conclusiones	93
Bibliografía	95
A. Publicaciones	99

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción general

En nuestro país ocurren sismos de manera cotidiana. Cada día hay movimiento terrestre es una zona geográficamente sísmica, teniendo un problema de sobrepoblación, creando megaciudades; esta sobrepoblación obliga, que en un pequeño espacio de terreno se construyan edificios como conjuntos habitacionales y debido a esta problemática es común tener edificios de más de tres niveles.

Históricamente en la Ciudad de México se tenían edificaciones de vivienda de más de 10 pisos; debido al movimiento telúrico ocurrido en septiembre de 1985, de M8.2, y una réplica de M7.3 un día después, ocasionando miles de pérdidas humanas de alrededor de 40000, extraoficialmente, y daños materiales cuantiosos de alrededor de 6500 millones de dólares actuales, donde aproximadamente 500 edificios se colapsaron, derrumbados por la excitación producida por el suelo, estructuras de entre 7 a 12 pisos de altura. En este caso, se aprendió que estas edificaciones no eran las adecuadas, sobre todo para un tipo de suelo blando, como ocurre en algunas zonas de la Ciudad de México, así que después de este lamentable suceso el reglamento de construcción fue modificado.

Ahora todas las edificaciones deben, por norma, tener reforzamiento estructural no solo a cargas estáticas sino construidas de manera que puedan soportar cargas dinámicas; por ello, el reglamento de construcción de la Ciudad de México solo permite edificaciones de 3 niveles, debido a irregularidades por parte de las constructoras, aunado a materiales de poca calidad. En el 32o aniversario de este sismo hubo varios edificios que resultaron dañados, debido al movimiento sísmico ocurrido el 19 de septiembre de 2017, que fue un movimiento sísmico de M7.1, dejando varias estructuras colapsadas o con daños graves, alrededor de 58 edificios, los cuales oscilan entre 4 y 7 pisos, causando pérdidas humanas y cuantiosos daños.

Hasta ahora los edificios carecen, en su mayoría, de una separación entre ellos, provocando respuestas no deseadas, incluso choques graves, al momento de que ocurre un sismo, provocando daños considerables o incluso su colapso por tal motivo se propone atenuar el daño acoplado las estructuras tipo edificio, utilizando control semiactivo que disminuya la respuesta de la estructura ante el movimiento sísmico.

1.2. Control de estructuras

El control estructural de las estructuras civiles surgió de la necesidad de proporcionar diseños más eficientes con la realidad de los recursos limitados, cuando John Milne, profesor de ingeniería en Japón, construye una pequeña casa de madera sobre esferas, para demostrar que la estructura puede estar aislada de los movimientos del terreno.

Por otro lado, a principios del siglo XX, se encontró que los motores de los automóviles y aviones producían importantes vibraciones sobre los puntos de conexión [42, 40]. Por esta razón, se vio la necesidad de aislar, absorber o incrementar el amortiguamiento de dichas vibraciones [42].

El propósito del control de estructuras consiste en absorber y reflejar la energía introducida por las cargas dinámicas, como los vientos, olas, terremotos y tráfico vehicular. La idea de este tipo de control es incrementar el amortiguamiento de las estructuras mediante dispositivos especiales y, de esta manera, obtener un mejor desempeño ante cargas dinámicas externas.

En resumen, se puede expresar esta idea en tres métodos de control de vibraciones, los cuales nos permiten reducir las vibraciones causadas por fenómenos naturales [9].

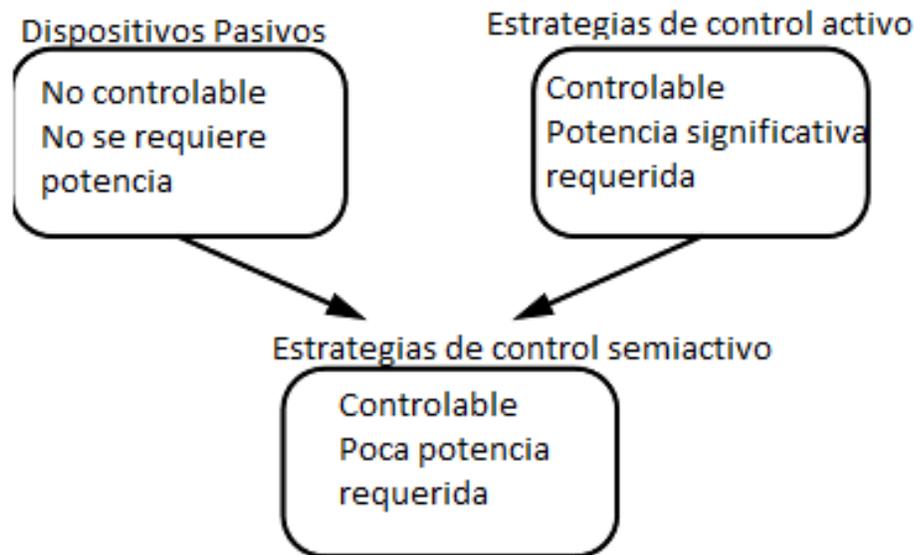


Figura 1.1: Descripción de los tres métodos de control de estructuras [9].

1.2.1. Control pasivo

La primera clase de dispositivos de amortiguación suplementarios es pasiva. Los dispositivos pasivos no son controlables y no requieren energía [40].



Figura 1.2: Control pasivo usado en una estructura tipo edificio [40].

1.2.2. Control activo

La segunda clase de dispositivos de amortiguación suplementarios está activa, los dispositivos activos son controlables, pero requieren una potencia significativa para operar.

Estas estrategias de control entregan fuerza a la estructura para contrarrestar la energía de la carga dinámica y tienen la capacidad de controlar diferentes modos de vibración y adaptarse a diferentes condiciones de carga [41, 9].

Una estrategia de control activo puede medir y estimar la respuesta en todo el edificio para determinar las fuerzas de control apropiadas, generalmente requieren una energía significativa para desarrollar la magnitud de las fuerzas necesarias para las aplicaciones de infraestructura civil.

Por tal motivo no puede ser interrumpido el suministro de energía de fuentes externas, especialmente durante los peligros naturales cuando se espera que la estrategia de control funcione.

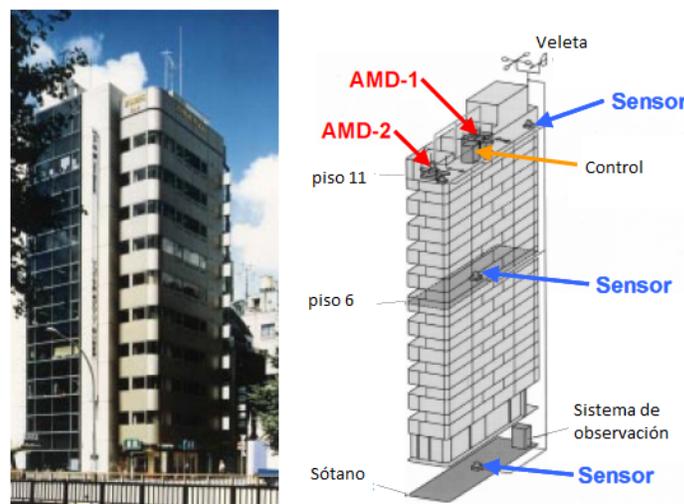


Figura 1.3: Edificio Kyobashi Seiwa controlado activamente en Tokio, Japón [9].

Un claro ejemplo de estas estrategias de control activo a gran escala se encuentran en Japón, China, Taiwán y Corea.

A pesar de las numerosas historias de éxito, los ingenieros aún no han adoptado el control activo. Algunas razones incluyen, el costo de capital y mantenimiento, la dependencia de la alimentación externa, la fiabilidad y estabilidad del sistema, y aceptación por la profesión [41].

1.2.3. Control semiactivo

La tercera clase de dispositivos de amortiguación suplementarios es semiactiva, los dispositivos semiactivos combinan los aspectos positivos de los dispositivos de control activos y pasivos en que son controlables (como los dispositivos activos) pero requieren poca potencia para operar [9].

Son llamados dispositivos de control *inteligentes*, asumen los aspectos positivos de los dispositivos de control tanto pasivos como activos. Esta estrategia de control es similar a la estrategia de control activo, el actuador de control no aplica fuerza directamente a la estructura, se usa para controlar las propiedades de un dispositivo de energía pasiva, un amortiguador pasivo controlable. Son de naturaleza disipativa, inherentemente estables, y requieren un poco de energía para operar.

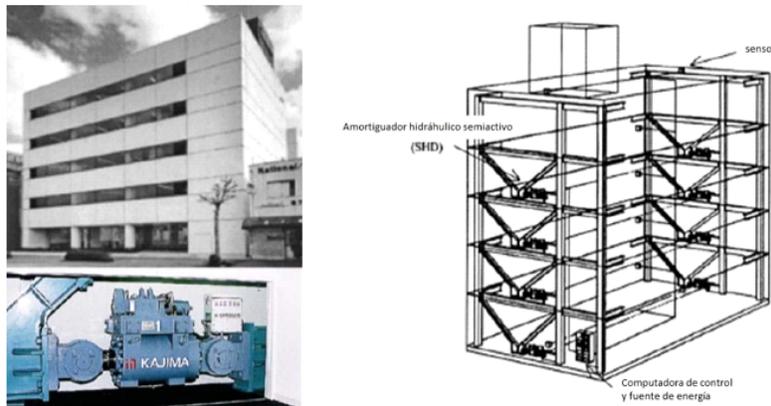


Figura 1.4: Sistemas de control semiactivo con amortiguador MR de 20 ton (edificio Kajima en Shizuoka, Japón) [9].

1.2.4. Clasificación de métodos de control

Podemos clasificar el control como ha sido utilizado a partir de que tipo de excitación se desea atenuar Tabla I, es más fácil observarlos en conjunto ya que el control pasivo, activo, semiactivo e híbrido han sido utilizados para atenuar las vibraciones en estructuras, sin embargo existen cuatro métodos los cuales son muy comúnmente utilizados [13].

	Nivel excitación	Método	Tipo	Dispositivo
Control Estructural	Viento Tráfico Sismos pequeña Escala	Inercia de Masas	Pasivo	Amortiguador de Masa Sintonizado (TMD)
			Activo	Amortiguador de Líquido (LMD)
			Híbrido	Amortiguador de Masa Activa (AMD)
	Terremotos	Acoplando los Edificios Usando Pistón Aislando la base	Pasivo	Amortiguador conectado
				Activo
			Híbrido	Puente controlado híbrido
			Semi activo	Amortiguador
				Amortiguador semiactivo
			Pasivo	Compuerta aceite, amortiguador de fricción de montaje de goma
			Semiactivo	Amortiguador de aceite ajustable MR amortiguador

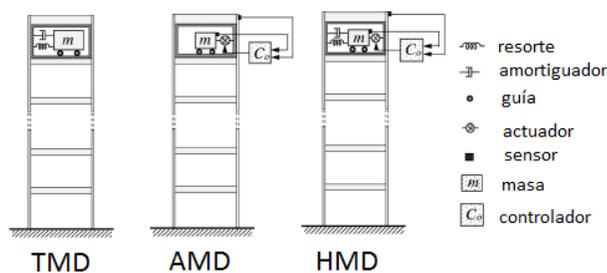


Figura 1.5: Diagrama esquemático de control, Amortiguador de Masa Sintonizado (TMD), Amortiguador de Masa Activa (AMD), Amortiguador de Masa Híbrido (HMD),

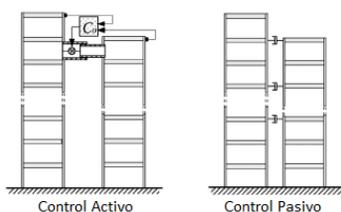


Figura 1.6: Diagrama esquemático de edificios acoplados.

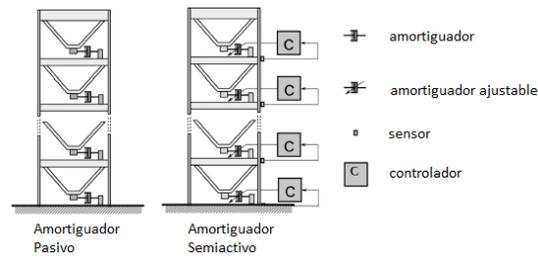


Figura 1.7: Esquema de métodos de control que usan amortiguador

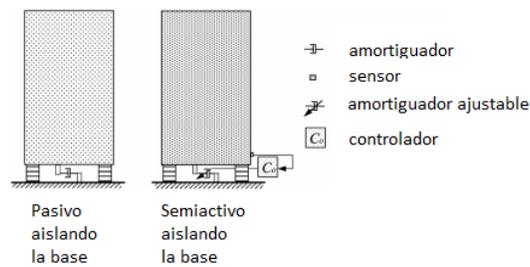
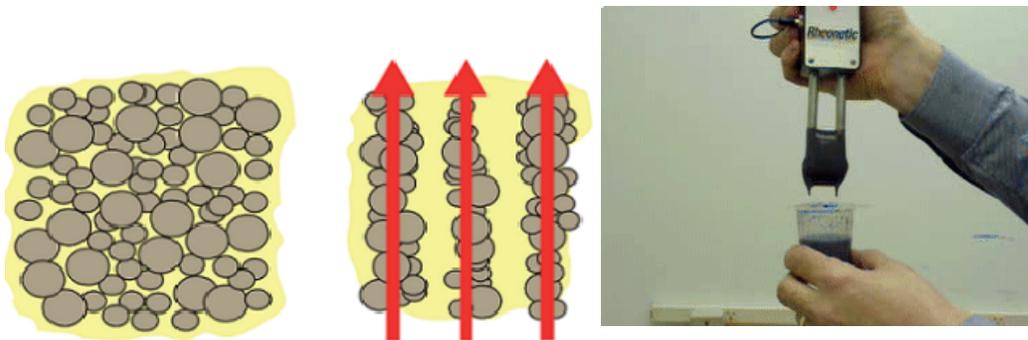


Figura 1.8: Esquema de métodos de control aislando la base.

1.3. Fluidos magneto reológicos (MR)

Los fluidos MR consisten en partículas magnéticas (típicamente de hierro) en un fluido portador. En presencia de un campo magnético, las partículas de tamaño micrónico se unen Fig. 1.3 y cambian el fluido a un semisólido en milisegundos. Cuando se elimina el campo magnético, el fluido vuelve rápidamente a su estado natural de flujo libre Fig. 1.3. Además, el grado en que el fluido cambia a un semisólido es proporcional a la fuerza del campo magnético, lo que le da al fluido una amplia capacidad de control y precisión [44].



Partículas MR dispersas y al aplicarse campo magnético [44].

Fluido MR se vuelve solido, cuando se le aplica campo magnético [44].

Los fluidos MR se pueden usar en modo cortante, con el fluido que fluye entre dos superficies, como se observa en la Fig. 1.9

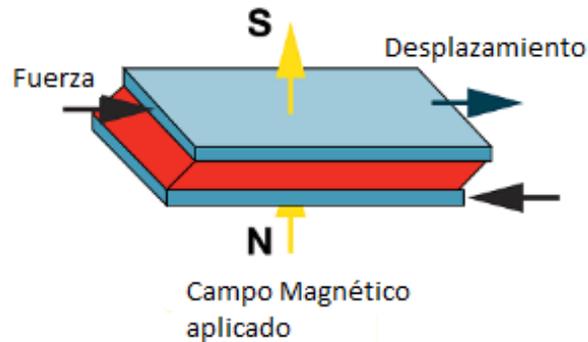


Figura 1.9: Fluido MR en modo cortante [44].

Similar a los amortiguadores hidráulicos pasivos, un amortiguador MR consiste en un fluido que se mueve entre diferentes cámaras a través de pequeños orificios en el pistón, convirtiendo la energía de choque en calor Fig. 1.10. Sin embargo, en un amortiguador MR, se introduce un circuito eléctrico en el conjunto del pistón. A medida que se suministra corriente eléctrica al amortiguador, una bobina dentro del pistón crea un campo magnético y cambia instantáneamente las propiedades del fluido MR en el pistón. En consecuencia, la resistencia del amortiguador se puede cambiar continuamente en tiempo real modulando la corriente eléctrica al amortiguador. También son usados en modo de válvula con fluido que fluye a través de un orificio como en un amortiguador, que se mueven uno con respecto al otro. En ausencia de un campo magnético aplicado a través del espacio que ocupa el fluido, el fluido fluye libremente o permite el movimiento libre.

Tras la aplicación de un campo magnético, las partículas se alinean como cadenas con la dirección del campo.

La formación de estas cadenas de partículas restringe el movimiento del fluido dentro del espacio ya que aumenta el límite elástico del fluido. La alteración de la atracción entre partículas aumentando o disminuyendo la fuerza del campo permite un control continuo de las propiedades reológicas del fluido y, por lo tanto, de la amortiguación o la fuerza de embrague o frenado.

Los fluidos MR patentados de *Lord Corporation* exhiben un tiempo de respuesta rápido, tensión de fluencia dinámica alta, baja viscosidad plástica, amplio rango de temperatura operativa, resistencia a la sedimentación, fácil remezcla y excelente resistencia al desgaste y a la abrasión.

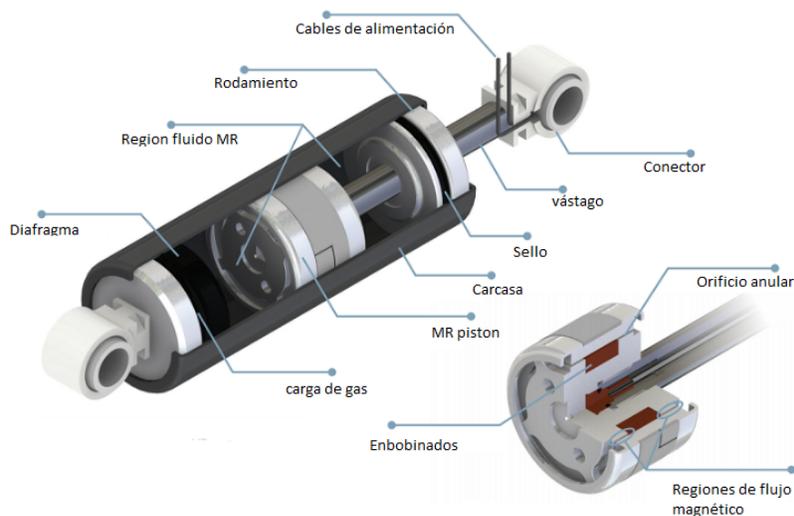


Figura 1.10: Diagrama de un amortiguador MR [44, 41].

1.4. Aplicaciones de los amortiguadores MR

1.4.1. Sistemas de suspensión automotriz

La tecnología Magneto-Reológica (MR) permite nuevos niveles de rendimiento, mejorando los sistemas de suspensión primaria de automóviles. En una suspensión MR, el fluido MR controlable reemplaza al fluido hidráulico tradicional en cada amortiguador. Como los sensores monitorean las condiciones de la carretera y del vehículo, un controlador modifica las características de amortiguación hasta mil veces por segundo. Esto permite mejoras espectaculares tanto en la comodidad como en el manejo, y se puede usar para mejorar las características de conducción de cualquier vehículo, desde autos deportivos de alta gama hasta sedanes y SUV. Presentado por primera vez en el año modelo 2002, el sistema ahora aparece en más de una docena de modelos de una amplia variedad, que incluyen Audi TT, Audi R8, Buick Lucerne, Ferrari 599GTB, Holden HSV Commodore.

El uso de estos amortiguadores provoca beneficios importantes, ofreciendo control de vibraciones y choques el cuál proporciona una estabilidad en las curvas y un aislamiento superior de los choques y vibraciones de la carretera, además al reducir el número de piezas móviles, se logra una menor complejidad de fabricación, tienen un bajo consumo de energía con una potencia máxima de 20 watts en cada uno de los cuatro amortiguadores del sistema, proporciona una mayor densidad de energía disipativa que cualquier otra tecnología de material controlable al automóvil con tiempo de respuesta en milisegundos [46].

1.4.2. Industria civil

Estos dispositivos son similares a los usados en la industria automotriz pero mucho más poderosos, con la capacidad de soportar grandes cargas dinámicas, usados para controlar de forma semiactiva, con la ventaja de requerir pocas cantidades de energía para su operación, son usados en edificios y puentes, instalados en el Museo Nacional de Ciencias Emergentes de Japón Fig. 1.11 y en el puente del Lago Dong Ting en China Fig. 1.12. Se instalan para contrarrestar las vibraciones causadas por los terremotos, las rachas de viento y el movimiento ocasionado por el tráfico [45].



Figura 1.11: Museo Nacional de Ciencias Emergentes de Japón [45]



Figura 1.12: Puente del Lago Dong Ting en China [45]

1.5. Motivación

La presente tesis fue elaborada con la intención de inyectar amortiguamiento a estructuras tipo edificio, por la problemática que existe en cualquier ciudad con sobrepoblación, donde cada día se construyen edificios, debido a la alta demanda existente en vivienda, al no haber espacio, solo puede construirse hacia arriba en edificios, cada día más altos, algunos incluso retando a la imaginación.

En un edificio se planea su construcción, se analiza el terreno, los recursos con que se cuenta para construirlos, el tipo de suelo, el número de pisos, la masa y aún así la naturaleza hace de las suyas estando presente. Un edificio quizás se modele como un caso ideal, sin embargo, la excitación del suelo es dinámica, es constante y sobre todo no tiene un patrón predecible, lo cual dificulta los estándares de construcción, que con cada suceso trágico como un terremoto, donde hay innumerables pérdidas, no solo materiales sino incluso pérdidas humanas, se modifica, siendo un poco más estricto. Sin embargo, aún no se exige que las edificaciones de interés social o destinadas a vivienda tengan sistemas de protección sísmica, debido principalmente a su alto costo. Si ampliamos aunque sea un poco los estudios que se tienen en otros países sobre el comportamiento dinámico de las estructuras, sobre como se comportan frente a desastres naturales, en específico los ocasionados por terremotos, incluso movimientos ocasionados por el hombre como tráfico de transportes de carga o inclusive una multitud podría excitar una estructura. Es posible inyectar amortiguamiento a una edificación, para disminuir las deformaciones y absorber la energía proveniente de la excitación de un terremoto, sin sufrir daños catastróficos. Con un historial tan alto como el de la Ciudad de México, donde cada día ocurren microsismos y, en fechas comunes como septiembre, ocurren terremotos, es altamente imperativo proteger la vida humana y esto se logra protegiendo cada estructura construida. Así, en un evento sísmico una estructura debe resistir y permitir la vida segura de las personas en su trabajo, estudios, casas e incluso si están en un día recreativo, salvaguardando la vida, en lo personal.

Si este proyecto de tesis en un futuro, fuese una contribución, aunque sea breve, será motivo suficiente para desarrollar con gran compromiso el trabajo.

1.6. Objetivos de la tesis

1.6.1. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo de tesis consiste en implementar técnicas de absorción pasivo/semiactivo para la protección sísmica en estructuras mecánicas tipo edificio, mediante esquemas de acoplamiento lateral de edificios.

1.6.2. Objetivos específicos

1. Estudiar el comportamiento dinámico de estructuras tipo edificios, a escala, de manera individual antes de acoplarlos, para validar su comportamiento.
 - a) Diseño de la estructura, construcción de los edificios a escala.
 - b) Diseño y construcción de una plataforma de mesa vibratoria adecuada.
 - c) Modificación de la base para soportar el peso de ambos edificios.
 - d) Hacer pruebas experimentales validando datos teóricos con un barrido frecuencial.
2. Recrear los sismos más importantes de nuestro país, como los sismos de 1985 y 2017, sobre las estructuras, para estudiar su comportamiento y determinar como se afectan los edificios.
 - a) Por medio de una sistema de adquisición de datos entrada-salida se realizan experimentos en estructuras tipo edificio de cuatro y siete niveles.
3. Analizar los efectos del acoplamiento lateral de dos estructuras tipo edificio, ante excitación en la base con entradas armónicas y sísmicas, por lo cual se considera un barrido frecuencial en la base afectando todos los modos de la estructura. Con esto se busca la atenuación y protección de dichas estructuras.
 - a) Acoplamiento pasivo con resortes, para determinar los valores de rigidez más adecuados.
 - b) Acoplamiento con una barra rígida.
 - c) Acoplamiento con resortes y barra rígida en el cuarto piso de dos estructuras de cuatro y siete niveles.
 - d) Validación experimental.
4. Utilizar un amortiguador MR para implementar un esquema de control semiactivo del acoplamiento lateral entre dos estructuras tipo edificio, con excitación armónica y sísmica en la base, buscando la mejor atenuación sísmica posible.
 - a) Acoplar edificios con el amortiguador MR y diferentes valores de corriente.

- b) Hacer comparativa de datos obtenidos con diferentes corrientes y sin acoplamiento.
- c) Hacer pruebas con el amortiguador MR, en lazo abierto y en lazo cerrado con un control por Retroalimentación Positiva de la Posición (PPF).
- d) Hacer comparativas de amortiguamiento con datos experimentales.
- e) Hacer pruebas experimentales y atenuar los sismos del 19 de septiembre de 1985 y 2017.

1.7. Organización de la tesis

El presente trabajo de tesis se encuentra organizado de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se realiza una introducción general del trabajo, incluyendo antecedentes sobre control estructural aplicado a edificios, se conocen algunas aplicaciones para el amortiguador MR, además de que se incluyen los objetivos del mismo.

En el Capítulo 2 se describe la teoría que permitió la realización de este trabajo, como lo es el control PPF, el modelado de un amortiguador MR, además de obtener las frecuencias naturales que tiene un sismo en sus tres componentes.

En el Capítulo 3 obtenemos el modelado para un edificio de n pisos, valorando los resultados calculados teóricamente con diferentes métodos para obtener las frecuencias naturales de una estructura tipo edificio, como lo es vibraciones libres, por martillo de impacto y por barrido frecuencial.

En el Capítulo 4 se realiza el acoplamiento de los edificios de 4 y 7 pisos con un resorte y con una barra rígida obteniendo las frecuencias naturales del sistema en conjunto, comparando el amortiguamiento con un sistema desacoplado. En el Capítulo 5 realizamos experimentos nuevamente ahora con lazo abierto sintonizando el amortiguador MR con diferentes valores de corriente comparandolas con un sistema acoplado por el suelo, también se cerró el lazo aplicando control multi PPF a ambas estructuras acopladas con barrido frecuencial y para finalizar atenuando el sismo del 19 de septiembre de 1985 y del 2017 aplicando multi PPF. En el Capítulo 6 se describen algunas conclusiones para la atenuación de movimiento proveniente del suelo haciendo una comparativa general de la atenuación para el primer modo de vibración que beneficia y protege ambas estructuras.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1. Modelo polinomial de Choi-Lee-Park para un amortiguador MR

El modelo polinomial propuesto por Choi-Lee-Park [8, 3, 4], es un modelo muy utilizado por su simple implementación que requiere las lecturas de la corriente y la velocidad del pistón. En la Fig. 2.1 se puede ver esquemáticamente el modelo polinomial. La curva de fuerza de amortiguamiento contra velocidad describe un ciclo de histéresis, el cual es posible dividir en dos regiones de importancia; la región de aceleración positiva (lazo inferior) y una región de aceleración negativa (lazo superior). Ambos lazos tienen la característica de que pueden ser aproximados por un polinomio de grado n en términos de la velocidad del pistón v .

De esta forma, la fuerza de amortiguamiento se aproxima por el polinomio

$$F_{MR} = \sum_{i=0}^n a_i v^i \quad (2.1)$$

donde v^i , $i = 0, \dots, n$, son potencias de la velocidad del pistón del actuador MR y los coeficientes obtenidos por regresión polinomial de la curva de fuerza-velocidad, a un polinomio de grado n esta dada por $a_i, i = 0, \dots, n$. El grado n se obtiene con base a procedimientos de prueba y error, hasta que se alcance una buena aproximación a la curva obtenida experimentalmente.

En un trabajo de Choi et al. [8] se hace una demostración experimental que los coeficientes a_i en la ecuación (2.1) se pueden aproximar por una línea recta a los valores de la corriente I . Para ello se propone una relación lineal entre la corriente I y los coeficientes a_i del polinomio, en la siguiente forma

$$a_i = b_i + c_i I, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2.2)$$

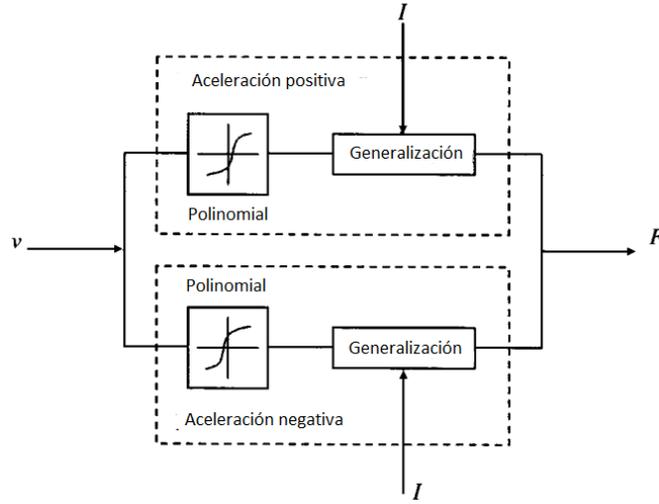


Figura 2.1: Diagrama esquemático modelo polinomial [8]

De hecho, Choi et al. [8] incluye una comparación entre la fuerza de amortiguamiento, medida experimentalmente, y la fuerza obtenida con el modelo polinomial Fig. 2.2 para una frecuencia de excitación de 1 a 4 Hz, amplitudes de ± 20 mm y corrientes de excitación entre 1 y 2 Amperes. Se observa que el modelo predice de manera adecuada el fenómeno de histéresis del dispositivo, produciendo resultados similares a los obtenidos con los modelos de Bingman Fig. 2.3 y Bouc-When Fig. 2.4, aunque con la ventaja de que el modelo polinomial es más sencillo y útil para los propósitos de control.

Para obtener los valores de los coeficientes b_i y c_i se requieren hacer varios experimentos (al menos dos) y encontrar diferentes pares (a_i, I) . Finalmente, se obtiene una relación entre la fuerza de amortiguamiento F_{MR} en función de la velocidad del pistón v y la corriente de entrada I para aceleraciones positivas y negativas, de la forma

$$F_{MR} = \sum_{i=0}^n (b_i + c_i I) v^i \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2.3)$$

Los valores de los coeficientes (b_i, c_i) Tabla II, dependen del signo de la aceleración \dot{v} , estas conmutaciones permiten al modelo de Choi-Lee-Park (2.3) reproducir los fenómenos de histéresis inherentes a este tipo de actuador. Los coeficientes para aceleración positiva reproducen la parte inferior de la curva de histéresis (2.1) y los coeficientes para la aceleración negativa reproducen la parte superior de la curva [4].

En la tabla se muestran los parámetros del amortiguador MR obtenidos de manera experimental [25], utilizando amortiguadores MR RD-1097-01 de la compañía Lorsch Corporation[®]. Los parámetros que se identificaron son para un polinomio de hasta segundo grado, los cuales permiten describir adecuadamente el comportamiento dinámico y los fenómenos de histéresis.

2.1. MODELO POLINOMIAL DE CHOI-LEE-PARK PARA UN AMORTIGUADOR MR15

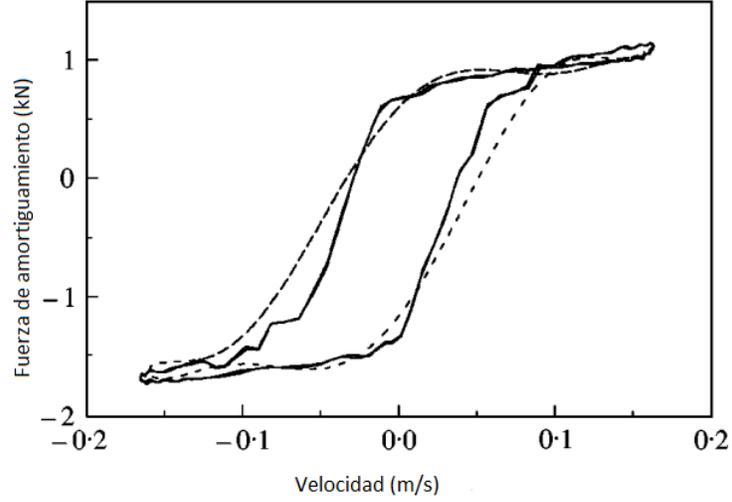


Figura 2.2: Comparación de fuerzas de amortiguamiento medida y obtenida por el modelo, Choi et al. [8]

Índice	Aceleración positiva $\dot{v} > 0$		Aceleración negativa $\dot{v} < 0$	
	b_i^+	c_i^+	b_i^-	c_i^-
0	0.403	2.928	0.5426	-3.105
1	-18.3	1156	-18.549	1161
2	19.01	-561.3	8.6212	-372.5

Los coeficientes polinomiales dependen del signo de la aceleración, por lo que rescribimos el modelo de fuerza F_{MR} ecuación (2.3) en forma general de la siguiente manera

$$F_{MR} = \sum_{i=0}^n (\hat{b}_i + \hat{c}_i I) v^i \quad (2.4)$$

donde los coeficientes generales están ahora expresados con respecto a los coeficientes de la aceleración positiva (b_i^+, c_i^+) y los coeficientes de la aceleración negativa (b_i^-, c_i^-), mediante

$$\hat{c}_i = \frac{(c_i^+ + c_i^-) + |c_i^+ - c_i^-| \text{sign}(\dot{v})}{2} \quad (2.5)$$

$$\hat{b}_i = \frac{(b_i^+ + b_i^-) + |b_i^+ - b_i^-| \text{sign}(\dot{v})}{2} \quad (2.6)$$

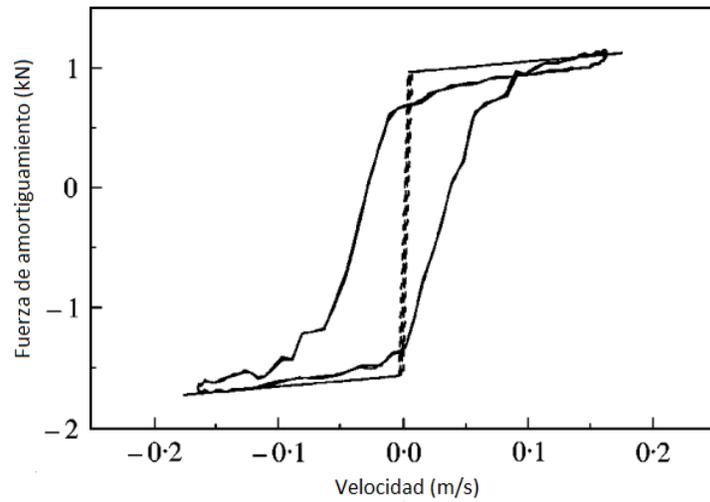


Figura 2.3: Modelo de Bingham [8]

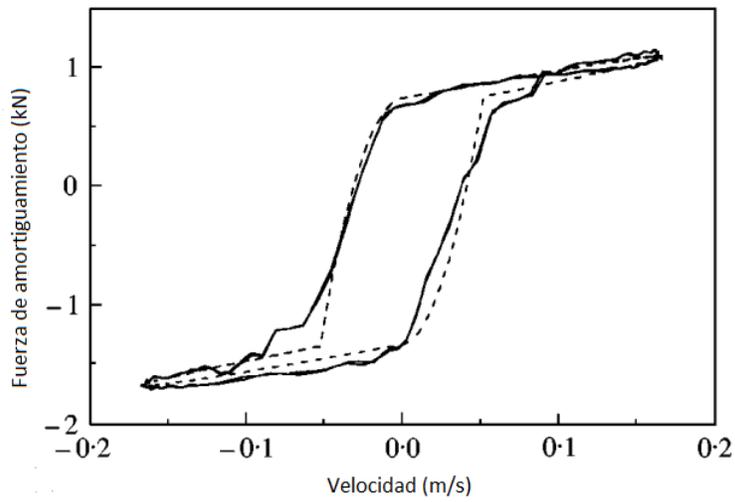


Figura 2.4: Modelo de Bouc-Wen [8]

2.2. Formas modales

Los modelos de segundo orden se definen en coordenadas modales, estas coordenadas a menudo son usadas en el análisis dinámico de estructuras complejas como edificios [12, 1], los cuales pueden ser modelados por elementos finitos con tal de reducir el orden de un sistema, donde la representación modal es un resultado que nos permite conocer las frecuencias naturales de un sistema, los modelos modales de estructuras son expresados en coordenadas modales, como estas coordenadas son independientes, conduce a una serie de propiedades útiles las cuales simplifican el análisis.

La representación de coordenadas modal se puede obtener mediante la transformación de los modelos nodales, esta transformación se deriva usando una matriz modal, que se determina de la siguiente manera, si consideráramos las vibraciones libres de una estructura sin amortiguamiento esto es con la matriz $C = 0$, además sin que sea afectada por una excitación externa $F(t) = 0$, la ecuación de movimiento bajo estas condiciones esta dada por la siguiente ecuación

$$M\ddot{q} + Kq = 0 \quad (2.7)$$

La solución a la ecuación (2.7) anterior esta dada por $q = \phi e^{j\omega t}$ por lo tanto si derivamos dos veces la segunda derivada obtenemos que $\ddot{q} = -\omega^2 \phi e^{j\omega t}$, si sustituimos q y \ddot{q} obtenemos:

$$(K - \omega^2 M)\phi e^{j\omega t} = 0 \quad (2.8)$$

Este es un conjunto de ecuaciones homogéneas, para el cual existe una solución no trivial si el determinante es cero, esto es si

$$\det(K - \omega^2 M) = 0 \quad (2.9)$$

Simplificando la ecuación (2.9) ω^2 en una forma donde se resuelva con mayor facilidad tenemos

$$\det(M^{-1}K - \omega^2 I) = 0 \quad (2.10)$$

La ecuación anterior se cumple para un conjunto de n valores de frecuencia ω , estas frecuencias se denotan $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, y su número n no excede el número de grados de libertad, es decir, $n \leq n_d$.

La frecuencia ω_i se llama la i -ésima frecuencia natural.

Si sustituimos ω_i en la ecuación (2.7), produce el conjunto correspondiente de vectores $\{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}$ que satisfacen esta ecuación, el i -ésimo vector ϕ_i correspondiente a la i -ésima frecuencia natural es llamado el i -ésimo modo natural, o la i -ésima forma modal.

Los modos naturales no son únicos, ya que pueden escalarse arbitrariamente. En otras palabras si resolvemos el eigenproblema obtenemos la matriz Ω ecuación (2.11) dada en rad/s solo tenemos que dividirla entre 2π para tener ω_n en Hz; si resolvemos los eigenvectores obtenemos la matriz modal Φ ecuación (2.12).

$$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \omega_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \omega_n \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

y la matriz de formas modales, o matriz modal Φ , de dimensiones $n_d \times n$, que consiste en n modos naturales de una estructura:

$$\Phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \cdots \ \phi_n] = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{21} & \cdots & \phi_{n1} \\ \phi_{12} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{1n_d} & \phi_{2n_d} & \cdots & \phi_{nn_d} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.3. Control por Retroalimentación Positiva de la Posición.

El control del tipo Retroalimentación Positiva de Posición (PPF, por sus siglas en inglés), tiene ya 35 años desde la primera vez que fue usado y propuesto en 1985 por Goh y Cauhey [17], desde entonces ha sido un control preferido, utilizado con la finalidad de atenuar vibraciones en estructuras flexibles obteniendo resultados muy favorables [22, 28, 18].

Al igual de que tiene un sin fin de aplicaciones para la atenuación de vibraciones utilizando este control conectado a actuadores piezoeléctricos se redujo las vibraciones atenuándolas aplicadas a una estructura con el tipo de una caja en los años noventa Poh y Baz [33], con estos mismos actuadores piezoeléctricos se logró atenuar una viga con este tipo de control PPF [6]. Incluso retroalimentando la posición se cuentan con diversas aplicaciones aeroespaciales realizadas por Hu, Q., Xie, Gao [30] y suprimiendo vibraciones en estructuras para una antena por Dosh, Leo, Inman [26]; como se puede ver claramente las aplicaciones que tiene el control PPF son muy diversas, muy utilizado para atenuar satisfactoriamente vibraciones obteniendo muy buenos resultados por tal motivo se utilizara para atenuar la excitación proveniente del suelo ocasionada por un terremoto, por el historial que tiene el PPF se espera atenuar la excitación y obtener buenos resultados.

Básicamente el control PPF, puede ser utilizado como un sistema dinámico auxiliar, donde η representa el absorbedor virtual pasivo, g representa la ganancia, conteniendo una relación de amortiguamiento ζ_f y frecuencia natural ω_f siendo la frecuencia a atenuar o incluso se puede elegir una frecuencia con un valor cercano a la que se pretende atenuar, donde $u(t)$ es la entrada de control del sistema, g, ζ_f, ω_f son las constantes reales de diseño del controlador, la salida del sistema a retroalimentar dada por Y .

$$\ddot{\eta} + 2\omega_f\zeta_f\dot{\eta} + \omega_f^2\eta = g\omega_f^2Y \quad (2.13)$$

$$u(t) = g\omega_f^2\eta(t) \quad (2.14)$$

Este sistema auxiliar será aplicado a un sistema mecánico de n grados de libertad con una entrada de control, para este caso omitiremos fuerzas externas que pudiesen perturbar el sistema $F(t) = 0$ con tal de simplificar el método

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = B_M u(t) \quad (2.15)$$

Tenemos una ecuación donde M, C y $K \in R^{n \times n}$ son matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema, utilizando la variable $q \in R^n$ que representa las coordenadas de posición de la ecuación; donde B_M^T es el vector de entrada y B_o es el vector de salida de control del sistema

$$q = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n]^T \quad (2.16)$$

$$B_M = [0_1, 0_2, 0_3, \dots, 1_m, \dots, 0_{n-1}, 0_n]^T \in R^{m+n} \quad (2.17)$$

$$Y = B_o q(t) \quad (2.18)$$

$$B_0 = [0_1, 0_2, 0_3, \dots, 0_m, \dots, 0_{n-1}, 1_n] \in R^{m+n} \quad (2.19)$$

Debemos relacionar las ecuaciones (2.13) y (2.15) en el modelo del sistema acoplado con el esquema de control PPF, obteniendo el sistema en lazo cerrado

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 2\omega_f \zeta_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -g\omega_f^2 \\ -g\omega_f^2 & \omega_f^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Reescribiendo la ecuación (2.20) en función de Q global, en un sistema de lazo cerrado queda

$$\hat{M}\ddot{Q} + \hat{C}\dot{Q} + \hat{K}Q = 0 \quad (2.21)$$

Debemos garantizar la estabilidad del sistema en lazo cerrado, esto se logra con $\hat{K} > 0$, depende primordialmente de donde sea sensado el sistema, la matriz global es definida positiva para el caso de control colocado, mientras que para el caso de control no colocado la estabilidad se garantiza si la matriz de rigidez global es semi-definida positiva [18, 1]

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} K & -g\omega_f^2 \\ -g\omega_f^2 & \omega_f^2 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Por lo tanto, si obtenemos el determinante para la matriz de rigidez global y despejamos la ganancia g de la ecuación(2.24) podemos obtener el valor de g que garantice la estabilidad del sistema,

$$K\omega_f^2 - g^2\omega_f^4 > 0 \quad (2.23)$$

$$K > g^2\omega_f^2 \quad (2.24)$$

2.4. Análisis del terremoto del 19 de septiembre del 2017

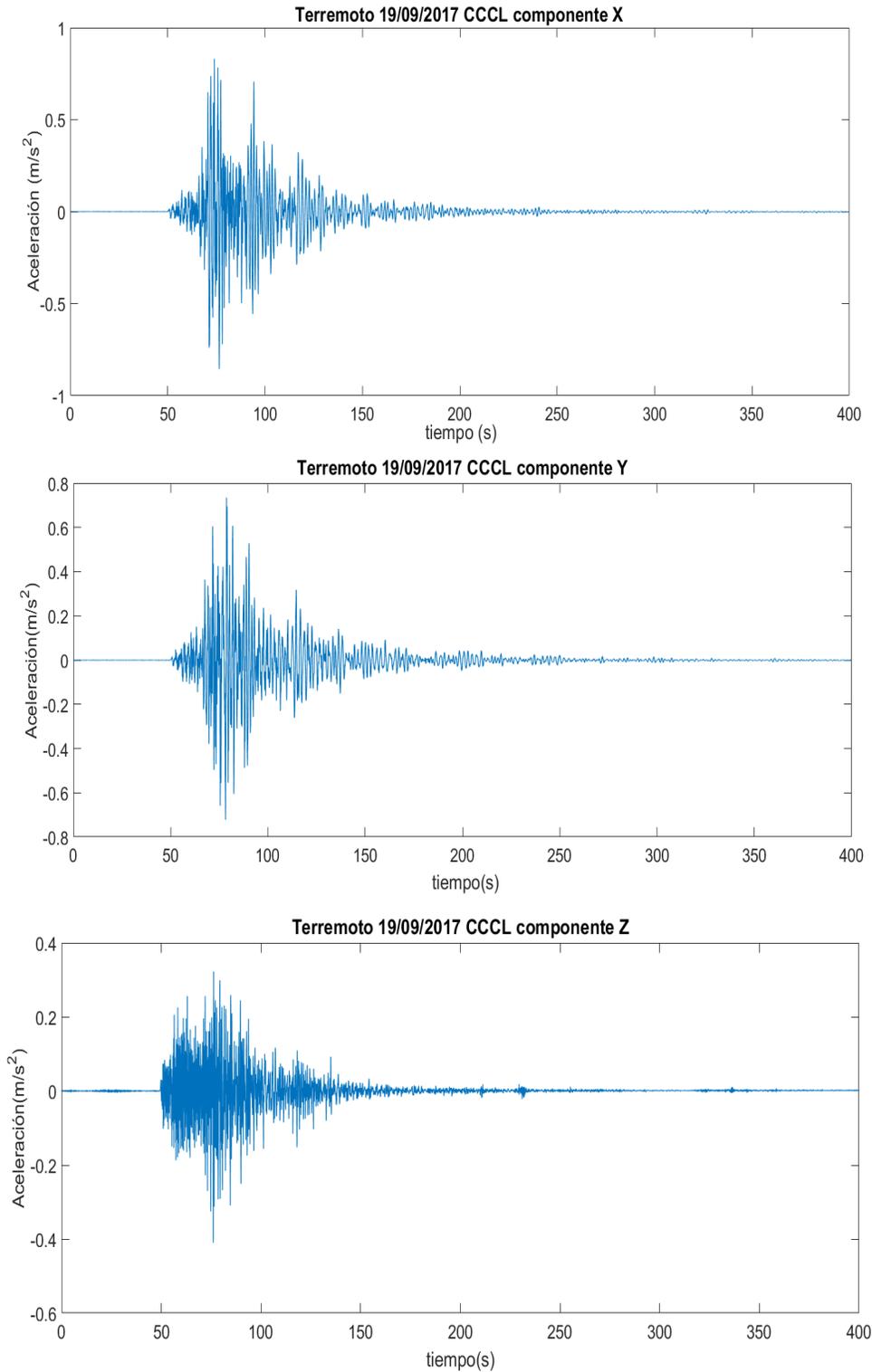
Para tener una comprensión más precisa del daño a las estructuras tipo edificio debido a un terremoto, podemos analizar con más detalle, los datos de cada uno de los acelerómetros del último terremoto ocurrido en la Ciudad de México, que fue el 19 de septiembre de 2017; las muestras fueron obtenidas del Centro Cultural Universitario Tlatelolco Campo Libre (CCCL), la excitación en el suelo se puede observar claramente, sin embargo si tomamos muestras de otra ubicación estas serán diferentes debido a los diferentes tipos de suelo que se tienen en la megalópolis.

Si analizamos esta aceleración de cada una de sus tres componentes podemos determinar las frecuencias a las cuales esta moviéndose el suelo, ya que no podemos predecir los terremotos ni saber cuándo ocurrirán, no podemos saber de qué magnitud serán, lo que si podemos hacer es estudiar cada uno de ellos, pues hay un gran historial de terremotos ocurridos en nuestro país, entre ellos los que han causado mayor daño.

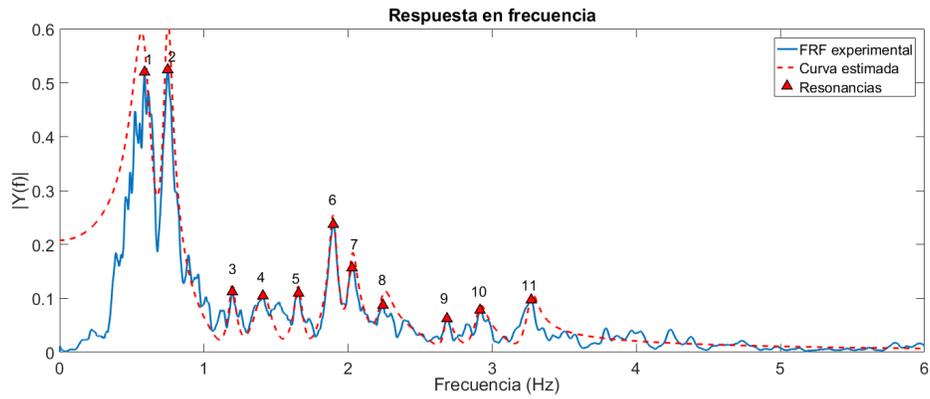
Ya tenemos los datos del pasado terremoto, sabemos que afecto los edificios de 4 y 7 niveles dejándolos con daños catastróficos, si sacamos la respuesta en frecuencia del movimiento del suelo, con ayuda de simulink, obteniendo sus frecuencias más representativas, estas deben de ser de baja frecuencia, a las cuales las estructuras tipo edificio fueron sometidas en la Ciudad de México debido a este terremoto; se corroborara porque este tipo de estructuras fueron afectadas, pues dentro del análisis del terremoto se acercara al primer modo de vibración, o en su caso coincidirá con la frecuencia natural de este tipo de edificios.

Con los datos podemos representar gráficamente las respuestas de aceleración del suelo ocasionados por la excitación sísmica, debido al terremoto de magnitud 7.1 que sacudió la ciudad de México, el cual ocurrido a 8 km al Noreste de Chiautla de Tapia, Puebla. A continuación se presentan las respuestas de los acelerogramas de las dos direcciones horizontales N00W, N90W, que corresponderían a las direcciones X y Y , la componente vertical V correspondiente a la dirección Z que son las tres componentes que se registraron en la estación de Tlatelolco.

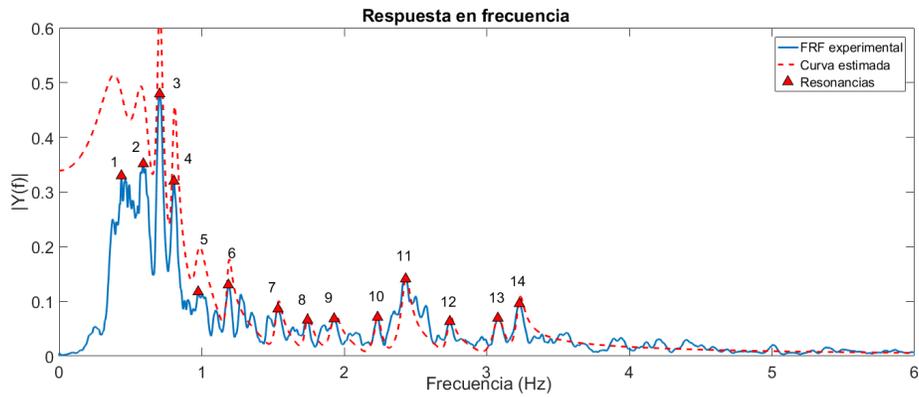
Componentes de los acelerogramas sismo 19 de septiembre de 2017, tomados del centro cultural universistario tlatelolco campo libre (CCCL) componente N00W, N90W y V.



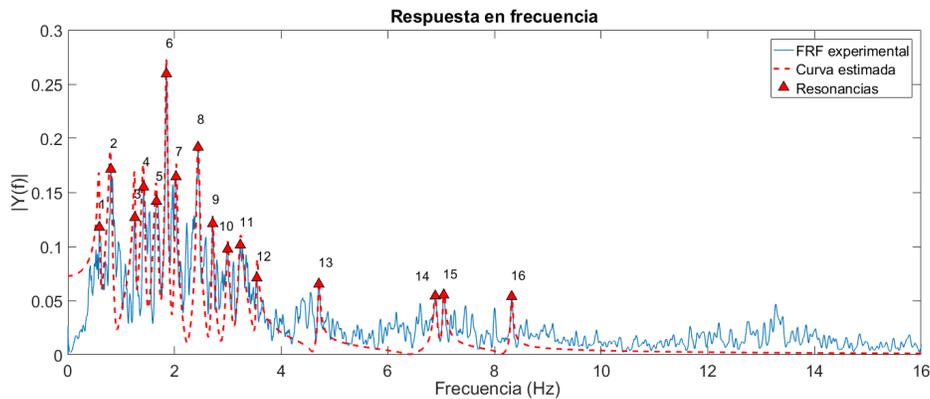
Análisis modal, para cada una de las tres componentes del sismo del 19 de septiembre de 2017



Análisis modal N00W



Análisis modal N90W



Análisis modal V

Realizamos un análisis de respuesta frecuencial con tal de obtener los modos de vibración de la excitación del suelo, dos análisis para las direcciones horizontales y una para la dirección vertical, no está demás aclarar que en un terremoto, un edificio es afectado no solo horizontal y verticalmente sino que también de forma torsional, en este caso solo analizaremos las aceleraciones horizontales y verticales.

Con cada análisis podemos hacer una Tabla III para componente dándonos cuenta de que afectara estructuras que se encuentren en ese rango de frecuencias.

Tabla III Comparativa de frecuencias de componentes del sismo			
Modo	Frecuencia(Hz) N00W	Frecuencia(Hz) N90W	Frecuencia(Hz) V
1	0.5890	0.4364	0.5905
2	0.7492	0.5905	0.8057
3	1.1979	0.7050	1.2558
4	1.4100	0.8057	1.4206
5	1.6572	0.9751	1.6602
6	1.8963	1.1872	1.8479
7	2.0280	1.5351	2.0280
8	2.2431	1.7426	2.4415
9	2.6872	1.9288	2.7161
10	2.9160	2.2340	2.9969
11	3.2716	2.4308	3.2334
12	—	2.7406	3.5432
13	—	3.0778	4.7060
14	—	3.2289	6.8896
15	—	—	7.0482
16	—	—	8.3224

Podemos visualizar claramente en cada componente horizontal, el primer modo de las estructuras tipo edificio, es excitado directamente, afectando significativamente al edificio de 4 pisos, en el caso del edificio de 7 pisos, el primer modo se ve directamente afectado por el movimiento del suelo, si analizamos la componente vertical notamos que para el caso del edificio de 4 pisos, es afectado causando daños, para el caso del edificio de 7 pisos no solo afecta el primer modo si no también afecta directamente el segundo modo, ahora es bastante claro que la excitación causada al suelo por el terremoto del 19 de septiembre de 2017 afecto violentamente este tipo de estructuras, el terremoto del 19 de septiembre de 1985 libero mayor energía siendo de una mayor magnitud, sin embargo se originó a una mayor distancia, esto significa que el sismo del aniversario de este terremoto, al tener una cercanía menor a la Ciudad de México causo daños considerables, innumerables e incuantificables perdidas. Ahora que conocemos este análisis podemos aumentar rigidez a una estructura con este número de pisos, podemos inyectar amortiguamiento a este tipo de estructuras tipo edificio para evitar el daño estructural, evitando que entren en resonancia en el primer modo de vibración, disminuyendo su desplazamiento, para ello se propone acoplarlos en capítulos posteriores, un análisis para determinar su comportamiento en este caso de excitaciones sísmicas haciendo una comparativa de amortiguamiento para cada estructura.

Capítulo 3

Modelado de una estructura tipo edificio de n pisos.

Para obtener el modelo matemático de un edificio de n pisos, como el mostrado en la Fig. 3.1, se pueden aplicar las leyes de Newton o las ecuaciones de Euler Lagrange.

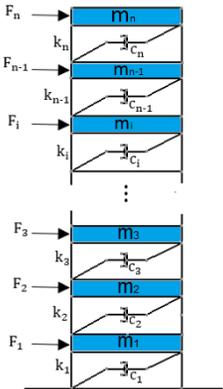


Figura 3.1: Diagrama esquemático de una estructura tipo edificio de n pisos.

En este caso para obtener las ecuaciones de ambos edificios se modelo por Euler Lagrange; analizamos la función Langrangiana (L), dónde T es la energía potencial y V la energía cinética, $L = T - V$; sabemos que debemos modelarlo como un sistema masa resorte amortiguador con una fuerza aplicada a la masa, la masa aporta energía cinética al sistema, las fuerzas y las columnas contienen rigidez como un resorte por lo tanto se puede obtener una sumatoria de energías potenciales, para el caso del amortiguamiento que existe en cada piso, lo obtenemos por medio de la ecuación de Rayleigh, al resolver el sistema podemos simplificarlo representando las ecuaciones de movimiento en forma matricial dada por

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \tag{3.1}$$

donde M es la matriz de masa, C es la matriz de amortiguamiento, K es la matriz de rigidez, donde $M, C, K \in R^{n \times n}$ y $F \in R^n$ es la fuerza aplicada a cada piso.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & \ddots & -c_{n-1} & \vdots \\ 0 & \dots & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & \dots & 0 & -c_n & c_n \end{bmatrix};$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & \ddots & -k_{n-1} & \vdots \\ 0 & \dots & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & \dots & 0 & -k_n & k_n \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_{n-1} \\ F_n \end{bmatrix}$$

3.1. Modos de vibración de la estructura

Para obtener los desplazamientos en cada piso teóricamente se debe perturbar la estructura dejando su posición de equilibrio estático, después se deja vibrar sin aplicar ninguna fuerza o excitación de manera externa, esto es de forma libre.

El cálculo de la vibración libre de un edificio observándolo como un sistema masa resorte amortiguador de n grados de libertad; modelando la estructura como un sistema idealizado de n pisos se obtiene a partir de la ecuación

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (3.2)$$

donde $x \in R^n$

Si no se le aplica fuerza a cada piso del sistema quedando como $F(t) = 0$; donde el valor del amortiguamiento es cero $C = 0$ se obtiene la ecuación diferencial que rige la vibración libre del edificio de n pisos.

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (3.3)$$

Para calcular la vibración libre del edificio de n pisos debemos sacarlo de su estado de reposo, aplicando a la masa de cada piso un desplazamiento $x(0)$ y aplicando velocidad \dot{x} en el tiempo cero; el cual es el tiempo definido en el que deja de estar cada masa en reposo.

El movimiento de la estructura queda entonces definido como

$$x(t) = \Psi_n \cos \omega_n t \quad (3.4)$$

$$\dot{x}(t) = -\Psi_n \omega_n \text{sen} \omega_n t \quad (3.5)$$

$$\ddot{x}(t) = -\Psi_n \omega_n^2 \text{cos} \omega_n t \quad (3.6)$$

Sustituimos en la ecuación de movimiento donde Ψ_n es el vector modal y obtenemos

$$[-M\omega_n^2 + K] \Psi_n = 0 \quad (3.7)$$

Reescribimos la ecuación para simplificar la resolución de las n ecuaciones, con n valores quedando como

$$[M^{-1}K - \omega_n^2 I] \Psi_n = 0 \quad (3.8)$$

Para determinar las frecuencias naturales del edificio de n pisos se resuelve la ecuación característica obteniendo las soluciones no triviales de ω_n^2 , esto es

$$\det (M^{-1}K - \omega_n^2 I) = 0 \quad (3.9)$$

Al resolver el determinante como un *eigenproblema*, con ayuda computacional se podrán visualizar las frecuencias naturales que causan daño catastrófico a un edificio, podemos obtener con cada frecuencia los *eigenvectores*, al obtener los vectores Ψ_n podemos graficar el comportamiento de las formas modales relacionadas a cada una de las frecuencias naturales más representativas del sistema, visualizando de una manera más clara el desplazamiento que ocurrirá en cada piso.

Las frecuencias modales Tabla IV del edificio de 4 pisos, con su respectiva matriz de masa ecuación (3.10), rigidez ecuación (3.11) y modal ecuación (3.12)

Tabla IV Frecuencias modales edificio de 4 pisos	
Modo	Frecuencia teórica [Hz]
1	1.8
2	5.2
3	7.9
4	9.8

$$M_{edif4} = \begin{bmatrix} 0.965 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.965 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.965 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.965 \end{bmatrix} [kg]; \quad (3.10)$$

$$K_{edif4} = \begin{bmatrix} 2074.5 & -1037.3 & 0 & 0 \\ -1037.3 & 2074.5 & -1037.3 & 0 \\ 0 & -1037.3 & 2074.5 & -1037.3 \\ 0 & 0 & -1037.3 & 1037.3 \end{bmatrix} \left[\frac{N}{m} \right] \quad (3.11)$$

$$\Phi_{edif4} = \begin{bmatrix} 0.228\ 01 & 0.577\ 35 & 0.656\ 54 & 0.428\ 53 \\ 0.428\ 53 & 0.577\ 35 & -0.228\ 01 & -0.656\ 54 \\ 0.577\ 35 & 4.619\ 8 \times 10^{-24} & -0.577\ 35 & 0.577\ 35 \\ 0.656\ 54 & -0.577\ 35 & 0.428\ 53 & -0.228\ 01 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Para el edificio de 4 pisos al resolver el sistema matricial podemos darnos una mejor idea del comportamiento que tendrá la estructura tipo edificio, se observa la respuesta que tendrá ante la excitación del suelo en cada una de sus frecuencias naturales Fig. 3.2.

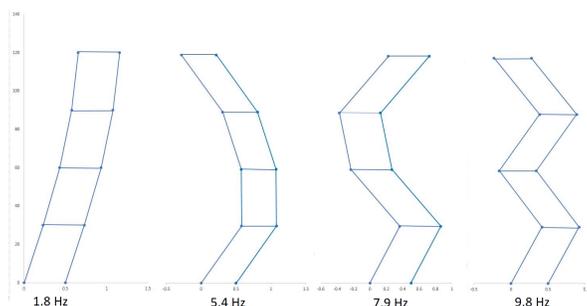


Figura 3.2: Formas modales del edificio de 4 pisos.

Las frecuencias modales Tabla V del edificio de 7 pisos con su respectiva matriz de masa ecuación (3.13), rigidez ecuación (3.14) y modal ecuación (3.15) obtenidas

Tabla V Frecuencias modales edificio 7 pisos	
Modo	Frecuencia teórica[Hz]
1	1.09
2	3.24
3	5.24
4	7.02
5	8.45
6	9.62
7	10.21

$$M = \begin{bmatrix} 0.9514 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9564 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9564 & -0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0 & 0.9564 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9614 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9564 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9564 \end{bmatrix} [kg], \quad (3.13)$$

$$K_{edif7} = \begin{bmatrix} 2074.5 & -1037.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1037.3 & 2074.5 & -1037.3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1037.3 & 2074.5 & -1037.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1037.3 & 2074.5 & -1037.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1037.3 & 2074.5 & -1037.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1037.3 & 2074.5 & -1037.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1037.3 & 1037.3 \end{bmatrix} \left[\frac{N}{m} \right] \quad (3.14)$$

$$\Phi_{edif7} = \begin{bmatrix} 0.1073 & 0.30314 & 0.44581 & 0.51382 & 0.4927 & 0.38644 & 0.2158 \\ 0.2100 & 0.49104 & 0.44813 & 0.11191 & -0.2994 & -0.51006 & -0.3893 \\ 0.3035 & 0.49127 & 0.00231 & -0.49049 & -0.3067 & 0.29568 & 0.4943 \\ 0.3837 & 0.30376 & -0.44582 & -0.21415 & 0.4900 & 0.11464 & -0.5124 \\ 0.4472 & 0.000153 & -0.44813 & 0.44586 & 0.0022 & -0.44899 & 0.4402 \\ 0.4911 & -0.30351 & 0.00003 & 0.30291 & -0.4914 & 0.49368 & -0.2995 \\ 0.5135 & -0.49118 & 0.44816 & -0.38272 & 0.3031 & -0.21122 & 0.1060 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Al resolver el sistema de 7 niveles, podemos observar el comportamiento que tendrá la estructura de este tipo, con ayuda de la matriz Φ_{edif7} , ante la excitación proveniente del suelo en cada una de sus frecuencias naturales Fig. 3.3.

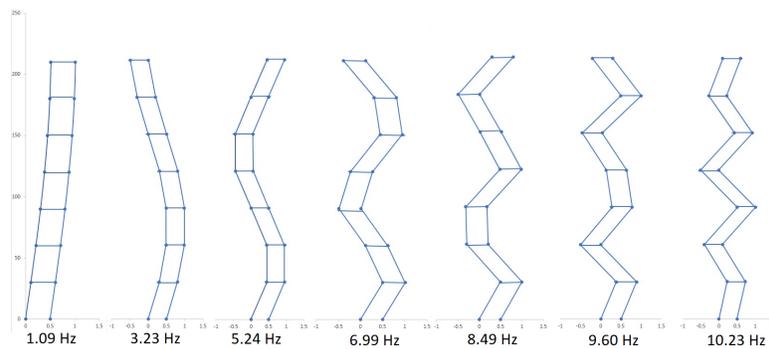


Figura 3.3: Formas modales edificio de 7 pisos

3.2. Descripción de la plataforma experimental

Se conoce que las estructuras de entre 4 y 7 niveles fueron las que sufrieron daños catastróficos ocasionados por el terremoto del pasado 19 de septiembre, analizamos estas estructuras mayormente usadas como zonas habitacionales en la mayoría de los casos u oficinas, donde hay un riesgo latente por el número de personas que hay en el inmueble, se toma la decisión de construir dos estructuras a escala, con la ventaja de que al excitarlas podamos visualizar fácilmente los modos de vibración de cada una de las estructuras; ya que serán usadas para reproducir en ellas los dos sismos que han ocasionado daños incuantificables ambos ocurridos un 19 de septiembre, con reproducciones de datos obtenidos específicamente para la Ciudad de México.

Para ello se construyen los pisos de cada una de las estructuras, 8 placas Fig. 3.4 para el edificio de 7 niveles, 5 para la estructura de 4 niveles, se decide construir las placas a partir de una solera de aluminio de 8 pulgadas, cortándolas cuidadosamente, rectificando cada placa con una máquina fresadora, hasta tener la medida de cada una de las placas de $180 \times 252 \times 6.350$ mm para la base y para cada uno de los pisos, esto se hace con precisión de milésimas de pulgada con tal de homologar la masa en cada uno de los pisos, obteniendo una matriz simétrica con masas relativamente idénticas.



Figura 3.4: Placa con cuerda M4 en los lados.

Para las 4 columnas de cada estructura se decidió utilizar soleras delgadas, aun así lo suficientemente fuertes de tal manera que al excitar el suelo con un barrido frecuencial sea visible la deformación que tiene la estructura con cada modo de vibración aplicada a ella, esta solera de aluminio tiene una medida de $3000 \times 25.4 \times 1.58$ mm, se cortan 4 tramos del mismo tamaño con una longitud de 1200 mm, con los cuales ésta construido el edificio de menor tamaño (4 niveles); de la misma forma se cortan 4 tramos con una longitud de 2100 mm para el edificio más alto (7 niveles), se barrena a lo ancho con broca de 4 mm cuidadosamente cada una de las soleras con una separación entre tornillo de 12.7 mm; se colocan las cuatro soleras en una prensa, se barrenan simultáneamente a lo largo, cada solera de tal forma que las placas están espaciadas a 300 mm una de la otra; cada placa cuenta con 8 barrenos con cuerda realizadas con machuelos $M4 \times 0.7$ que es el paso de cada tornillo, cada solera esta sujeta por dos tornillos $M4 \times 0.7$ a cada una de las placas, las 8 soleras utilizadas así como cada una de las placas de cada estructura son fabricadas de una aleación de aluminio T5

6063 con una densidad de $2700 \frac{kg}{m^3}$, cuyo módulo de elasticidad es de $68.9G Pa$, una razón de Poisson de 0.33.

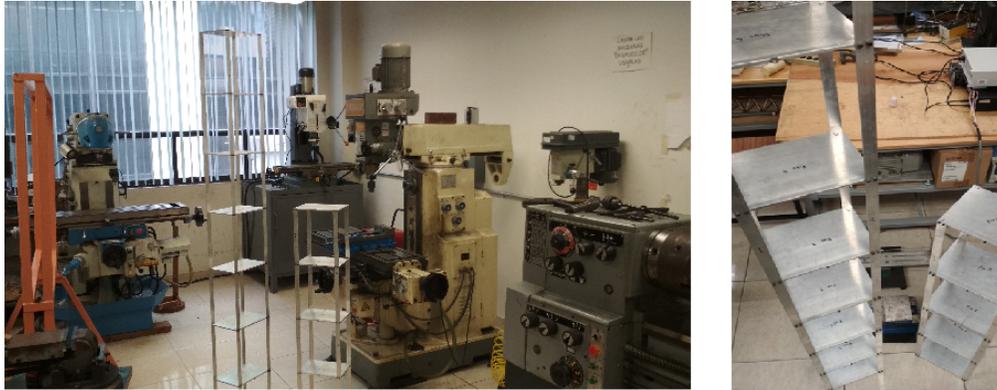


Figura 3.5: Construcción de edificios a escala.

Debido a que los edificios a escala Fig. 3.5 son altos y de una masa representativamente significativa, se maquina una plataforma de aleación de aluminio 1100 con la intención de que soporte la masa de ambos edificios, además de que en esta estructura deben caber ambos, con una separación en el piso cuatro de ambos edificios aproximada de 10 cm con tal de poder excitarlos ya acoplados con los diferentes dispositivos de acoplamiento, con dimensiones de $100 \times 550 \times 12.7 mm$ con ranuras que atraviesen toda la pieza, retirando el material cuidadosamente con tal de no debilitar la pieza, cuyas ranuras serán utilizadas para fijar los edificios cuando el suelo sea excitado, esta mesa vibratoria nos servirá como una plataforma unidireccional, la base está compuesta de un riel, sujeta por tornillos a una base móvil sujeta a su vez a la plataforma, la cual se modificara por medio de un riel con baleros para resistir el peso de ambas estructuras excitadas, por el movimiento ocasionado mediante barridos frecuenciales, además por recreaciones de manera unidireccional de terremotos de gran magnitud ocurridos en la ciudad de México, los cuales se obtuvieron de una base de datos [47], cabe mencionar que la base móvil esta empujada en un riel reforzado el cual cuenta con rodamientos sin fricción para no afectar el desplazamiento al ingresar cada uno de los datos.



Figura 3.6: Base unidireccional sujeta por varilla a cabeza de impedancia Kistler.

Las dos estructuras de aluminio tipo edificio de 4 y 7 niveles son sujetadas a la base móvil mediante prensas o tornillos, la base móvil se conecta por medio de una varilla a una cabeza de impedancia Fig. 3.6 marca Kistler[®] tipo 8770A50, con un rango de medición de $\pm 50g$ la cual puede medir al mismo tiempo la aceleración y la fuerza dinámica en un punto determinado de la estructura, esto es, las mediciones reales que están siendo aplicadas a la base móvil por medio del shaker determinando la aceleración del sismo \ddot{x}_g .

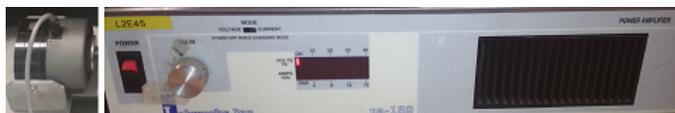


Figura 3.7: Shaker ET-139 y Amplificador Pa-138

La base móvil va conectada a un generador electromagnético de vibraciones o *shaker* modelo ET-139 Fig. 3.7, fabricado por Labworks[®] de 6.5 pulgadas de diámetro externo y un diámetro interno para colocar tornillos y sujetarlos de 3.25 in, un rango de frecuencia de 0 a 6500 Hz, un peso de 28 libras, una rigidez de suspensión de 60 lb/in, el cual tiene una carrera de 25.4 mm, este generador de vibraciones es alimentado por un amplificador de potencia lineal modelo PA-138 con 1000VA de potencia; las señales son enviadas a este amplificador por una tarjeta de adquisición de datos Sensoray[®] modelo 626, con la ayuda de una PC se le envía la señal de barrido frecuencial de entre 0 y 20 Hz con *Matlab/Simulink*[®].



Figura 3.8: Sistema de adquisición de datos, tarjeta sensoray, acelerómetro

Las aceleraciones son medidas utilizando tres acelerómetros marca Kistler[®] Fig. 3.8 con un rango de medición de 50g y 10g respectivamente, colocados en la parte superior de cada edificio y alternando entre pisos, se mide la excitación en la base móvil de ambos edificios mediante una cabeza de impedancia marca Kistler[®], los cuatro acelerómetros están conectados a un sistema de adquisición de datos Kistler LabAmp Type 5165A, los cuales son analizados con la ayuda de *Matlab*[®], obteniendo un análisis FFT (Trasformada Rápida de Fourier) de la aceleración, obteniendo las frecuencias naturales más representativas para cada estructura, los modelos a escala acoplados son puestos a prueba mediante un barrido frecuencial,

el cual nos brinda una comparativa relevante, al modificar y atenuar la excitación a la que responden dichas estructuras, con estos datos se ponen a prueba las estructuras acopladas y con los datos obtenidos de sismos reales de forma unidireccional de forma experimental Fig. 3.9

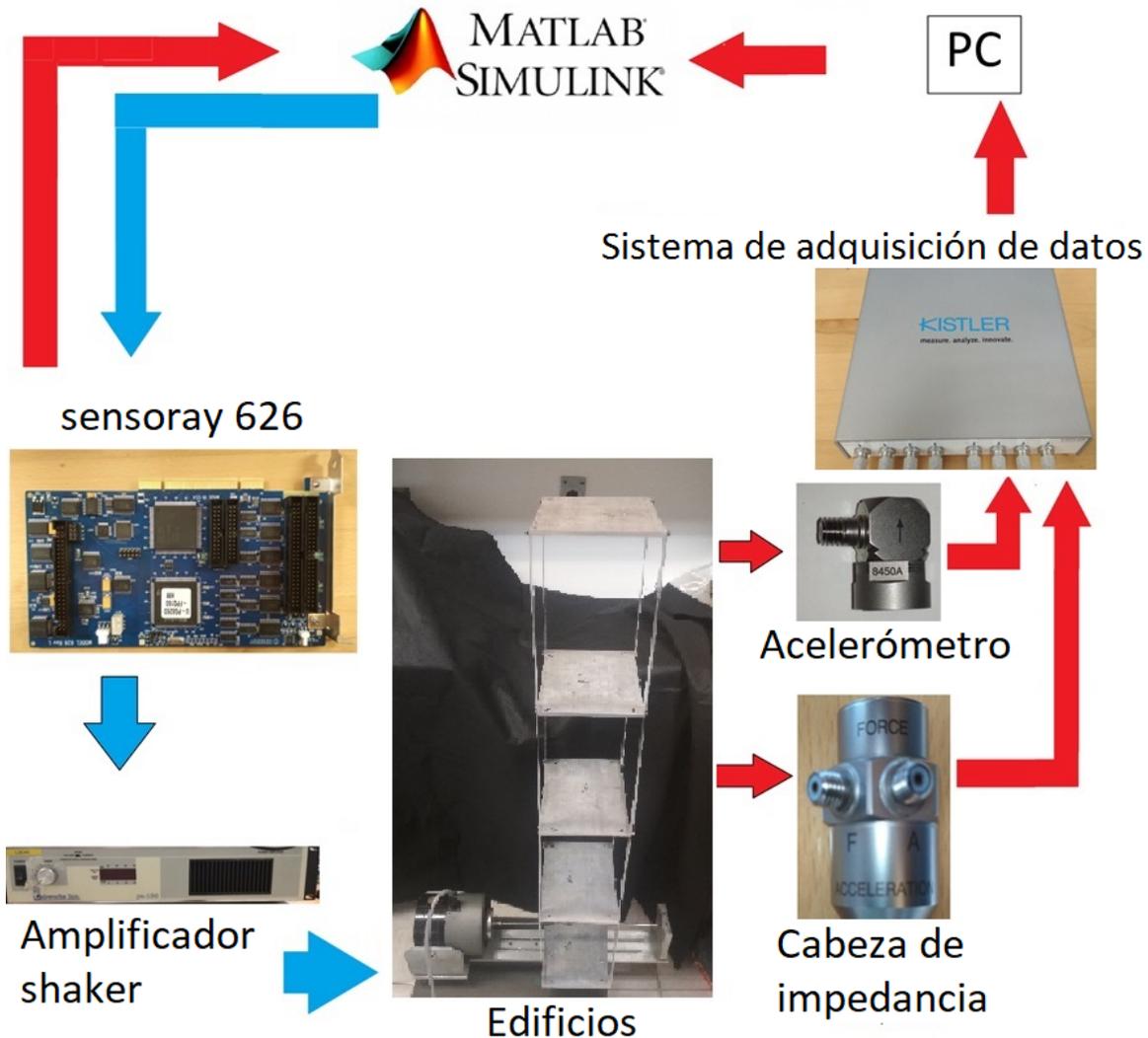


Figura 3.9: Arreglo experimental para barrido frecuencial

También se realizó un análisis modal mediante el uso de un martillo de impacto Kistler con un rango de frecuencia de 8200 Hz Fig. 3.10; con el cual se golpeaba cuidadosamente cada uno de los edificios en diferentes puntos; manteniendo fija la base del edificio, conectado por medio de un cable bnc a Lavamp, se colocan los acelerómetros en diferentes niveles con tal de obtener las aceleraciones registradas por el impacto a la estructura, estas se registran

por medio de un sistema de adquisición de datos; son analizadas cada una de las aceleraciones con ayuda de simulink así podemos obtener las frecuencias naturales de cada edificio, para posteriormente hacer una tabla comparativa verificando los datos teóricos con los datos que nos dan experimentalmente.



Figura 3.10: Arreglo experimental con martillo de impacto

3.3. Análisis de datos

Para proteger una estructura de daños sin importar si es una máquina rotativa, una estructura metálica, algo tan común como un auto o incluso un edificio, es de suma importancia conocer las frecuencias vibratorias a las que será sometido el sistema, aun más relevante es conocer las frecuencias naturales de las estructuras tipo edificio, para este caso muy particular de los edificios a escala; existen varios métodos para obtener las frecuencias naturales de un objeto, incluso se pueden obtener también de seres vivos, se optó por obtenerlas por medio de vibraciones libres, con un martillo de impacto y validando los mismos resultados teóricos y experimentales al realizar un barrido frecuencial, los datos teóricos ayudan bastante, incluso describiendo un rango de frecuencia para este caso de baja frecuencia que va de 0 a aproximadamente 10 Hz; pero como saber que los datos calculados son realmente los que se están buscando, como corroborar la experimentación podría indicar algo diferente, por tal motivo se realizan bastantes pruebas experimentales, conocemos un rango ya calculado sin embargo al experimentar no se puede confiar ciegamente en el rango obtenido, se debe ampliarlo. Se amplió primeramente de 0 a 3125 Hz con martillo de impacto Fig. 3.13 y Fig. 3.14, al realizar las pruebas se han de obtener los datos de los acelerómetros y al analizarlos, se obtuvieron respuestas frecuenciales muy bajas menores a 10 Hz. Si la prueba de martillo es correcta entonces porque no hacerlo con un barrido frecuencial reduciendo el rango de 0 a 300 Hz que es un rango no escogido al azar, siendo este rango con el que puede trabajar la tarjeta sensoray 626; de la misma forma el rango de las frecuencias obtenidas se reducía, así que se optó por bajar el rango de barrido frecuencial de 0 a 50 Hz de igual manera las frecuencias son bajas, por lo tanto se decide dejar el rango del barrido frecuencial excitando la mesa de 0 a 20 Hz, un rango aceptable para obtener los datos de los acelerómetros colocados alternadamente, en el piso más alto y alternando entre pisos, realizamos un análisis modal experimental con la ayuda de simulink Fig. 3.15 y Fig. 3.16; sabemos que una estructura tipo edificio tiene modos infinitos de vibración, es claro que no obtendremos frecuencias naturales infinitas; aunque al analizarlas si podremos visualizar las frecuencias más representativas de cada estructura, lo cual es un avance significativo, no solo podremos corroborar con cada resultado experimental los resultados teóricamente obtenidos sino también sabremos con exactitud la frecuencia a la que deben ser protegidos los edificios a escala, de la excitación proveniente del suelo, protegiendo prioritariamente el primer modo de vibración ya que en el caso de un terremoto es el que hace resonar la estructura , causando con el paso del tiempo su colapso.

Gráficas realizadas en tiempo real de los edificios de 4 Fig. 3.11 y 7 pisos Fig. 3.12, vibraciones libres.

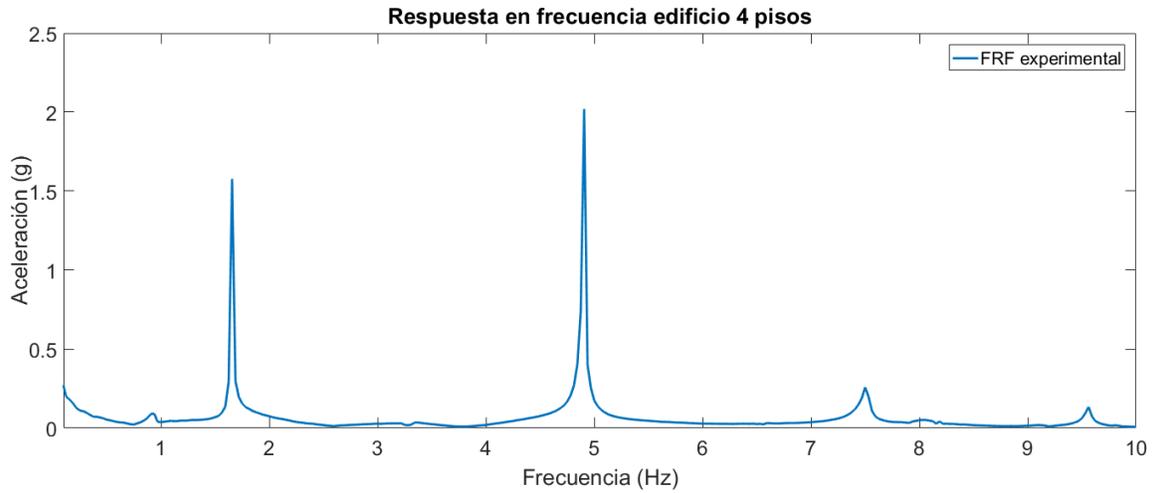


Figura 3.11: Función de respuesta frecuencial edificio 4 pisos vibraciones libres

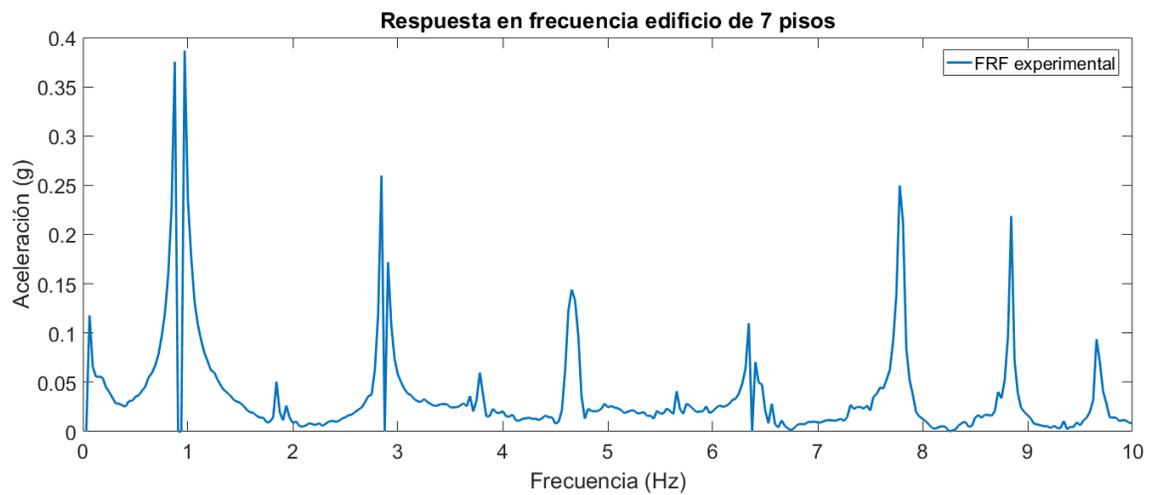


Figura 3.12: Función de respuesta frecuencia edificio 7 pisos vibraciones libres.

Gráficas realizadas con un martillo de impacto de los edificios de 4 Fig. 3.13 y 7 pisos Fig. 3.14.

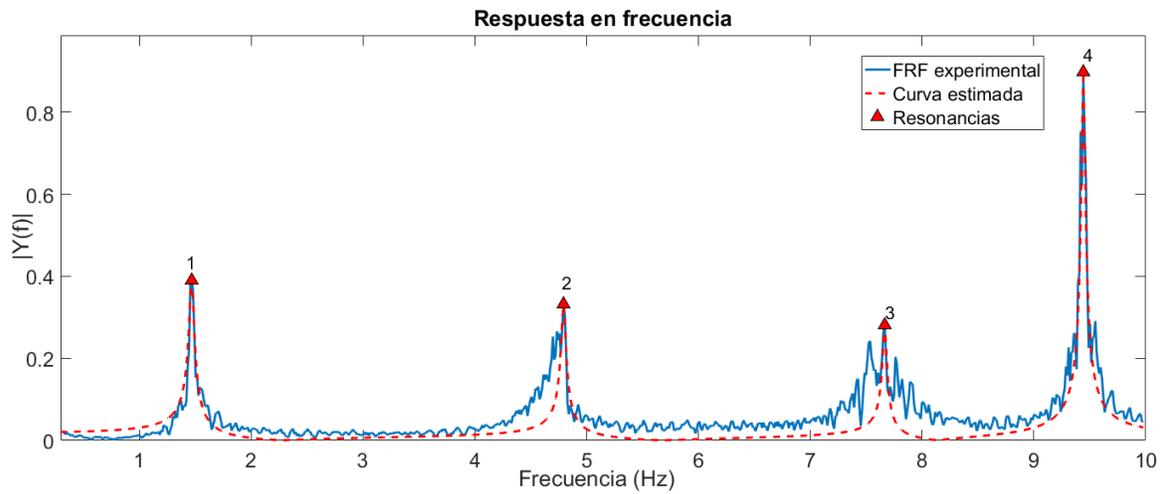


Figura 3.13: Función de respuesta frecuencial edificio de 4 pisos prueba con martillo de impacto.

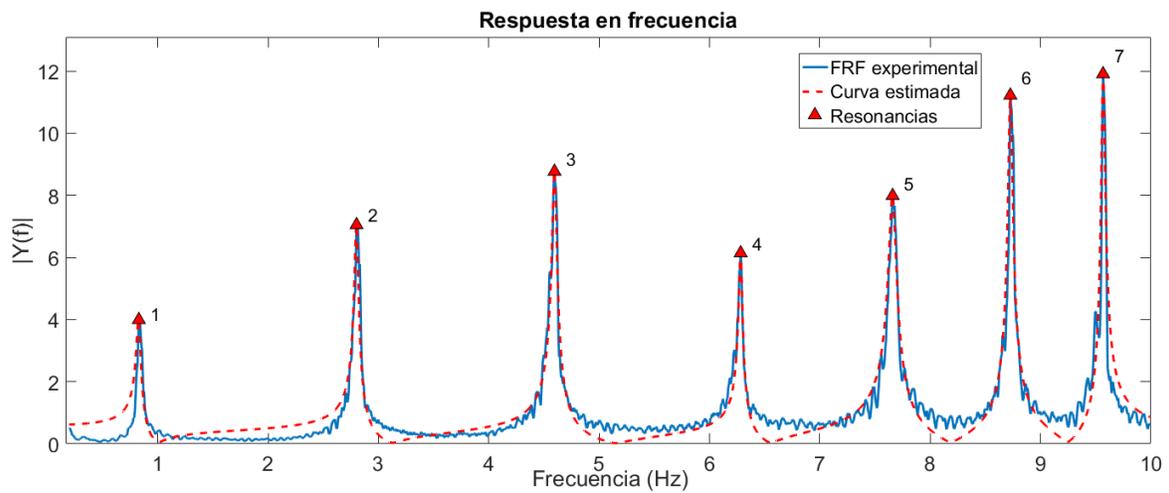


Figura 3.14: Función de respuesta frecuencial edificio 7 pisos con martillo de impacto.

Gráficas realizadas con un barrido frecuencial de los edificios de 4 Fig. 3.15 y 7 pisos Fig. 3.16.

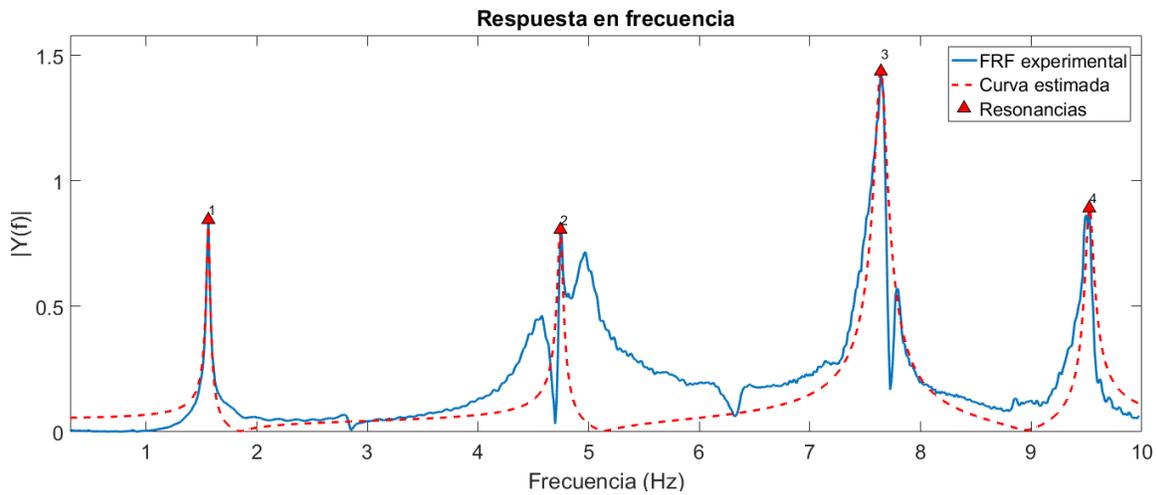


Figura 3.15: Función de respuesta frecuencial edificio 4 pisos prueba barrido frecuencial.

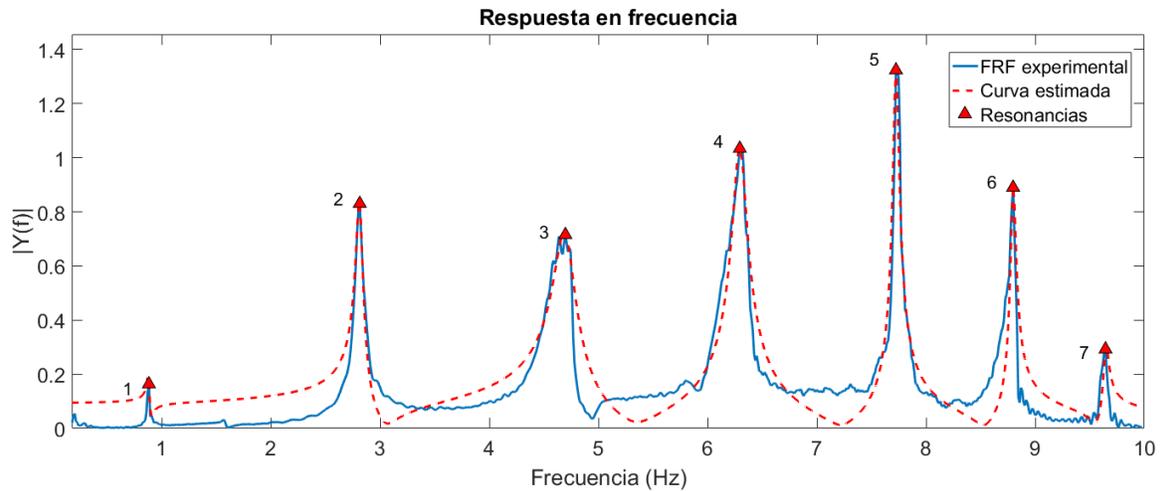


Figura 3.16: Función de respuesta frecuencial edificio 7 pisos prueba barrido frecuencial.

Después de haber analizado cuidadosamente las pruebas se tiene información suficiente para hacer las validaciones experimentales, con los datos teóricamente obtenidos, que mejor forma de visualizarlos que haciendo unas tablas comparando las frecuencias obtenidas para cada edificio, edificio de 4 pisos Tabla VI, edificio de 7 pisos Tabla VII. .

Modo	Calculadas (Hz)	Vibraciones Libres (Hz)	Martillo De Impacto (Hz)	Barrido Frecuencial (Hz)
1	1.8121	1.6562	1.4782	1.5616
2	5.2185	4.9062	4.7565	4.7445
3	7.9936	7.5	7.5221	7.6413
4	9.8071	9.5625	9.4414	9.5249

Modo	Calculada (Hz)	Vibraciones libres(Hz)	Martillo de impacto (Hz)	Barrido Frecuencial (Hz)
1	1.0946	0.9375	0.7272	0.8822
2	3.2401	2.875	2.8133	2.8133
3	5.2403	4.6525	4.6253	4.6969
4	7.0218	6.375	6.2943	6.2943
5	8.4597	7.7812	7.6771	7.7248
6	9.6287	8.8437	8.7500	8.7977
7	10.217	9.6562	9.6202	9.6441

Ya con los resultados realizados podemos darnos cuenta que los datos calculados son congruentes, pues fueron validados experimentalmente; todos en un rango de 0 a 10 Hz, siendo de baja frecuencia; si bien cada uno de los métodos experimentales utilizados es una forma de validación, comparando los datos experimentales entre ellos, son bastante cercanos además de congruentes, encontrándose dentro del mismo rango; sin embargo en esta ocasión se le dará más relevancia al método de barrido frecuencial, ya que es el único donde hay una excitación proveniente del suelo, de forma parecida como lo haría un terremoto, cuando se acoplen los edificios podremos visualizar de una forma más clara los efectos que ocurren sobre ambas estructuras, y la disminución de movimiento ocurrido sobre ellas.

Capítulo 4

Modelado de edificios con acoplamiento lateral

Si una estructura se coloca en una columna rígida uniendo dos estructuras, acoplándolas pasivamente, puede ser modelada como sistema masa-resorte-amortiguador, con mayor o menor rigidez dependiendo de la complejidad de la estructura, lo que es efectivo en la actualidad, al no requerir inyectar energía de ninguna manera al sistema, y por lo tanto, es el más económico y el más utilizado en muchos edificios, incluido en la CDMX, donde los edificios se construyen como áreas de vivienda conectadas por columnas rígidas en cada uno de sus pisos, es el más económico en términos de proporcionar protección sísmica, ha edificios de uso común del mismo tamaño, esto es con el mismo número de niveles, con masas similares, incluso los edificios de diferentes niveles con diferentes masas se han conectado en la literatura [9, 1, 11, 10]. Analizamos este tipo de control obteniendo resultados bastante favorables con conexiones rígidas como resortes, así como resultados favorables con amortiguadores, enfocándose en atenuar el primer modo en un evento sísmico.

Para este caso de estudio en particular se decidió colocar el acoplamiento en el piso más alto de la estructura más pequeña en el cuarto piso; al no requerir ningún tipo de energía de parte del sistema de edificios estamos acoplándolos de forma pasiva, cabe señalar que aun sin acoplamiento en alguno de los pisos; ambas estructuras están acopladas, acoplamiento por el suelo; para obtener datos congruentes se debe comparar y realizar varios experimentos todos con la misma ganancia de excitación, ya que experimentalmente podemos obtener resultados de amortiguamiento, los cuales tiene una estructura. Se analizaran ambos edificios y se compararan resultados de amortiguamiento con el fin de ver que tanto movimiento es absorbido por el dispositivo de acoplamiento, tomando en cuenta que son dos edificios de diferente masa, con diferentes alturas, con respuestas a excitaciones frecuenciales con valores dentro del mismo rango aun así afectados no de igual manera. Lo que se quiere es brindar protección a ambas estructuras, si un dispositivo solo protege un edificio podría darse el caso de absorber el daño del edificio contiguo, en una edificación de dimensiones reales no puede ser sacrificado un edificio a costa de otro, debe existir un equilibrio, encontrar la mejor forma posible de proteger a ambas estructuras.

4.1. Modelado

El sistema mostrado en la Fig. 4.1 es parecido al modelado anterior ecuación (3.1), incrementando rigidez y amortiguamiento al sistema, pues ahora tenemos dos matrices de masa pertenecientes a cada uno de los edificios; también tenemos matrices de amortiguamiento y rigidez donde M es la matriz de masa, C es la matriz de amortiguamiento, K es la matriz de rigidez, donde $M_1, C_1, K_1 \in R^{m \times m}$ y $M_2, C_2, K_2 \in R^{n \times n}$; $C_D, K_D \in R^{(m+n) \times (m+n)}$ son ambas matrices de acoplamiento, además las matrices $K_d, C_d \in R^{k \times k}$. En este caso \ddot{x}_g es la excitación (aceleración) proveniente del suelo, $e = [1, 1, \dots, 1]^T \in R^{m+n}$ es un vector que permite transformar la excitación en el suelo a cada piso del edificio. La ecuación de movimiento queda de la forma

$$M\ddot{x} + (C + C_D)\dot{x} + (K + K_D)x = -Me\ddot{x}_g(t)$$

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix}$$

$$C_D = \begin{bmatrix} C_d & -C_d & 0 \\ -C_d & C_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; K_D = \begin{bmatrix} K_d & -K_d & 0 \\ -K_d & K_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_d = \begin{bmatrix} C_{d1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_{d2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_{dn} \end{bmatrix}; K_d = \begin{bmatrix} K_{d1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_{d2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & K_{dn} \end{bmatrix}$$

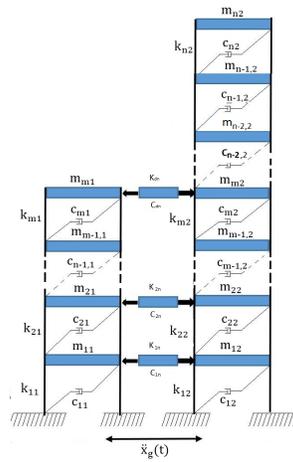


Figura 4.1: Edificios acoplados

4.2. Validación experimental

El arreglo experimental Fig. 4.2 tiene algunas similitudes con el arreglo anterior Fig. 3.9, con ayuda de matlab, se manda el barrido frecuencial por medio de la tarjeta sensoray 626 al shaker excitando la mesa unidireccional; solo que en esta ocasión se colocan ambos edificios sobre la mesa vibratoria, además de que se debe agregar un osciloscopio al arreglo, conectándolo directamente sobre el amplificador del shaker, pues debemos tener un control exacto sobre la ganancia que se va aplicar al amplificador; así al conocer la ganancia real aplicada al shaker se logra homologar la excitación, que recibe la mesa vibratoria unidireccional y los datos que obtengamos serán con la misma excitación en la base, así al comparar el amortiguamiento que existe sobre la estructura será un dato exacto y confiable; al conectar el osciloscopio también podemos observar en la pantalla la frecuencia real a la que se está excitando la mesa vibratoria, visualmente podremos notar si al acoplarlos existe algún cambio notorio en el movimiento de las estructuras; se colocan cuidadosamente cada uno de los acelerómetros en el último piso de cada uno de los edificios, alternando entre pisos la colocación de los otros dos acelerómetros, ya que no es suficiente con visualizar la disminución de movimiento al acoplarlos, debemos medir la atenuación en el primer modo de vibración, haciendo una comparativa en el amortiguamiento, sin acoplamiento, con resorte y con la barra rígida.

Para hacer la validación experimental se tienen que colocar los edificios acoplados por el suelo con una separación de 10 cm entre ellos, para que no choquen, al momento de ser excitado el suelo y por el impacto salgan errados los datos; ya conocemos las frecuencias a las que responde cada estructura, también con la ayuda del osciloscopio se conoce la ganancia a la que se excitara el shaker, con un voltaje de 1.5 volts, realizaremos el barrido frecuencial nuevamente, esta vez no solo nos interesa obtener los modos de vibración, sino también conocer el valor de amortiguamiento de cada una de las estructuras tipo edificio, después realizaremos lo mismo con una barra rígida y por ultimo con un resorte.

La barra rígida es colocada como si fuese una trabe, dando soporte y uniendo a ambos edificios en el último piso del edificio más pequeño esto es en el cuarto piso, la barra tiene una rigidez equivalente de $k_{barra} = 7001.54 \frac{N}{m}$ con una longitud de 2.54×10 cm de aluminio fabricada con aleación 6063, atornillada al centro de cada placa del cuarto piso.

Ahora se dispone a obtener las aceleraciones con los acelerómetros; pues con estas mediciones obtendremos las formas modales de vibración así como su amortiguamiento; con el resorte es un poco más complejo, se necesita un dinamómetro, un medidor de alturas, ya que se cuenta con la instrumentación adecuada, se puede caracterizar la rigidez del resorte; como se contaban con varios resortes se numeraron y caracterizaron todos con el fin de obtener el más adecuado para el acoplamiento Fig. 4.3, no muy rígido tampoco con poca rigidez usando la formula.

$$F = -kx$$

donde F es la fuerza obtenida por el dinamómetro, k es la constante de rigidez del resorte y x es la deformación del resorte al aplicar la fuerza en metros, el resorte que más se adecuó

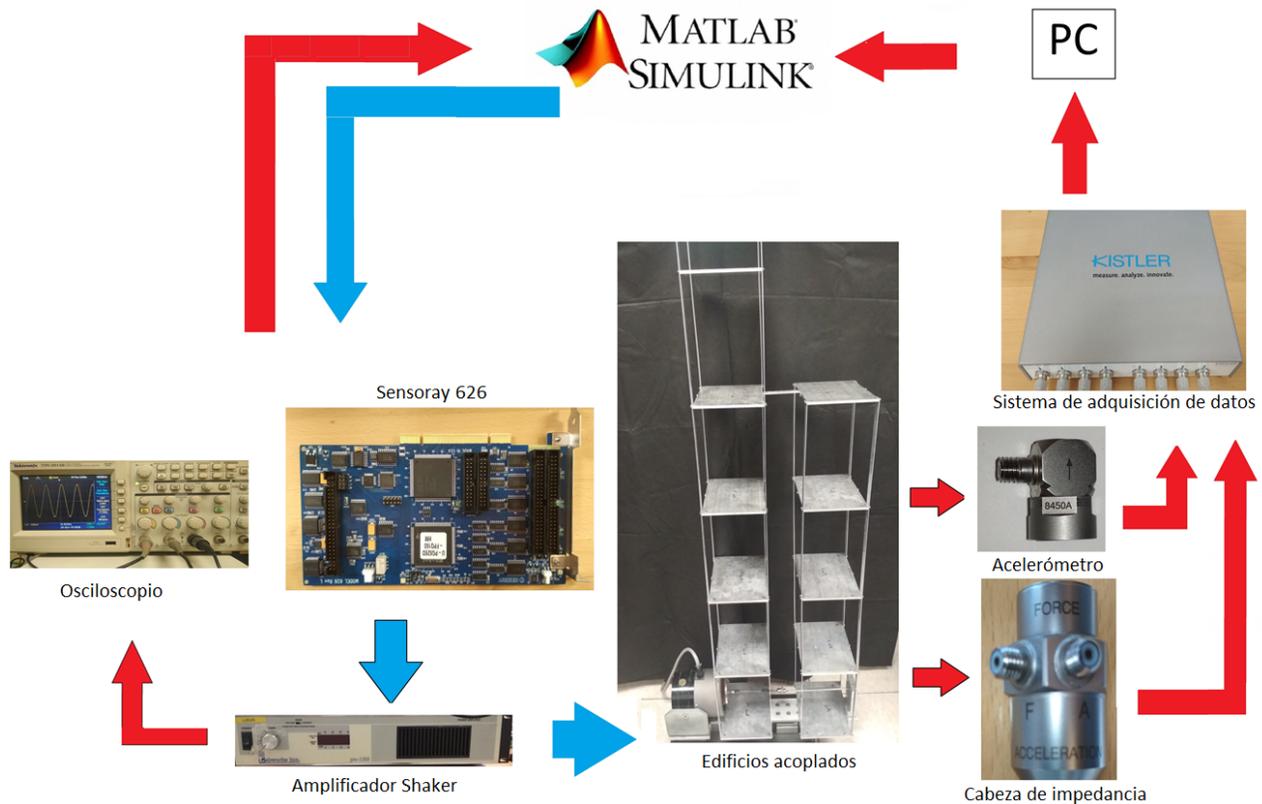


Figura 4.2: Arreglo experimental edificios acoplados 7 y 4 niveles

para el experimento tiene una rigidez $k_{resorte} = 5380.795 \frac{N}{m}$. Aquí se soldó una rondana al extremo del resorte, con tal de que pueda sujetarse a cada uno de los pisos mediante un tornillo.

4.3. Comparativa de resultados experimentales

Obtenemos de forma experimental las aceleraciones en el último piso de cada edificio, para obtener con ellas la función de respuesta frecuencial Fig. 4.4 y Fig. 4.5; a continuación se muestran las gráficas de la respuesta frecuencial de ambos edificios, con acoplamiento por el suelo y acoplamiento con una barra de aluminio.



Figura 4.3: Caracterización del resorte.

Visualizamos con las gráficas Fig. 4.4 y Fig. 4.5, que al estar acoplados se obtienen más modos de vibración, ahora es un sistema, un conjunto de edificios que comparten la misma dinámica de movimiento Fig. 4.6, aunque el sistema contenga un número más elevado de frecuencias naturales, no hay mejor manera que haciendo una comparativa de amortiguamiento en cada una de las pruebas obtenidas; cabe aclarar que al acoplar el sistema cambiara el valor numérico de la frecuencia donde se encuentren los modos, puesto que se analizan los edificios en conjunto.

Tabla VIII y Tabla IX Comparativas con los edificios acoplados por el suelo y acoplados por una barra rígida:

Tabla VIII Amortiguamiento del edificio 4 pisos, sin acoplamiento y acoplamiento por barra rígida.					
Modo	Acoplamiento suelo [Hz]	Amortiguamiento	Porcentaje	Barra rígida [Hz]	Amortiguamiento
1	1.5616	0.0100	-2 %	1.0610	0.0098
2	4.7445	0.0054	401 %	4.6969	0.0271
3	7.6413	0.0079	51 %	7.7606	0.0120
4	9.5249	0.0042	-23 %	9.6560	0.0032

Tabla IX Amortiguamiento del edificio 7 pisos, sin acoplamiento y acoplamiento por barra rígida.					
Modo	Acoplamiento suelo [Hz]	Amortiguamiento	Porcentaje	Barra rígida [Hz]	Amortiguamiento
1	0.8822	0.0115	146 %	1.0610	0.0283
2	2.8133	0.0117	25 %	2.6226	0.0147
3	4.6969	0.0220	47 %	4.6969	0.0324
4	6.2943	0.0039	233 %	6.2108	0.0130
5	7.7248	0.0039	258 %	7.7367	0.0140
6	8.7977	0.0029	60 %	8.5473	0.0045
7	9.6441	0.0025	84 %	9.6918	0.0046

Al estar acoplados las gráficas Fig. 4.7 y Fig. 4.8 nos da una clara visualización del comportamiento de ambos edificios, podemos ver el comportamiento cuando se aplica un barrido frecuencial obteniendo sus modos principales de vibración, visualizamos los modos

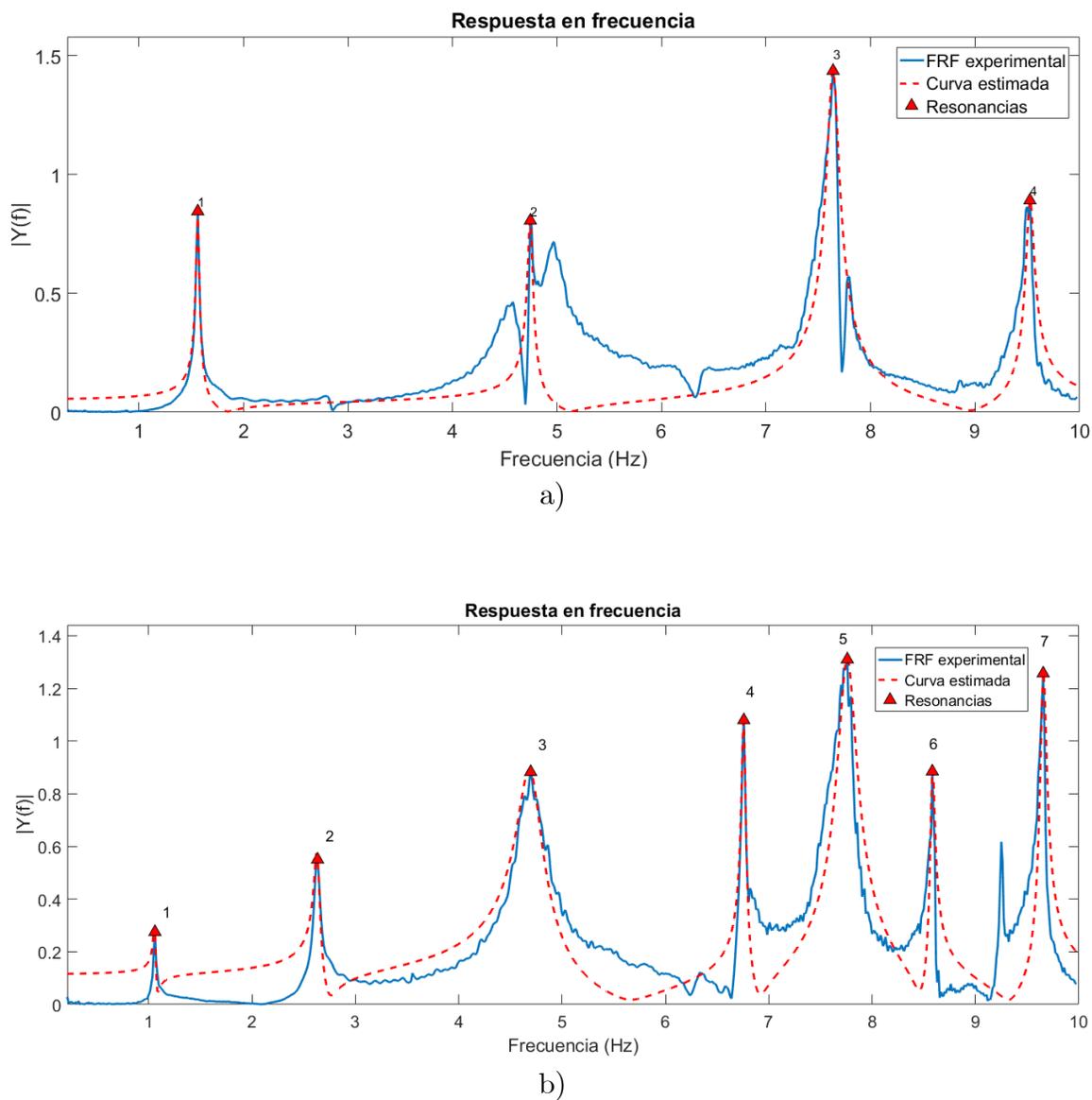


Figura 4.4: Respuesta frecuencial edificio 4 pisos a) sin acoplamiento y con acoplamiento b) con barra.

de vibración acoplados por medio de un resorte; el decrecimiento del primer modo para el edificio de 4 pisos es evidente, Fig. 4.7 mientras que hay lamentablemente un crecimiento para el caso del edificio de 7 niveles en el primer modo. Fig. 4.8, aplicando en ambos casos la misma ganancia.

Comparativa de respuesta frecuencial edificios sin acoplamiento y acoplados por medio de un resorte.

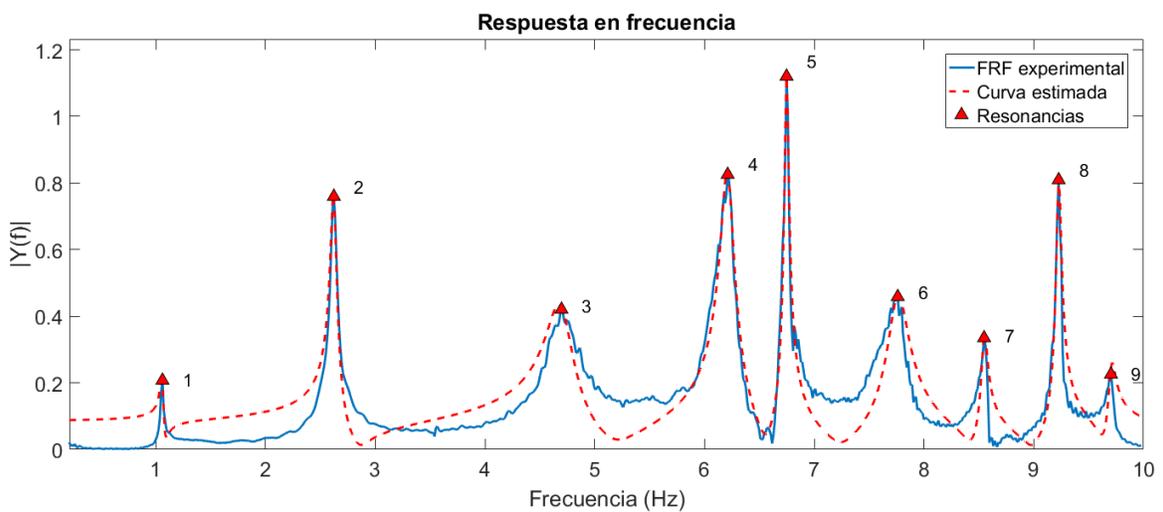
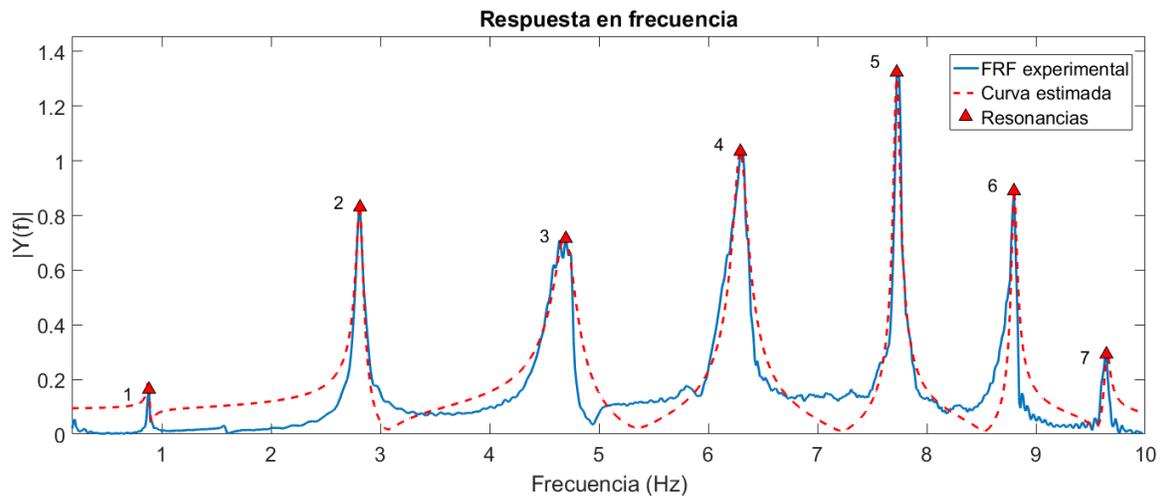


Figura 4.5: Respuesta frecuencial edificio 7 pisos sin acoplamiento a) y con acoplamiento b) barra.



Figura 4.6: Edificios acoplados barra rígida

Tabla X y Tabla XI Comparativa edificios acoplados por el suelo y acoplados por un resorte Fig. 4.9.

Tabla X Amortiguamiento edificio 4 pisos, sin acoplamiento y por medio de un resorte.					
Modo	Acoplamiento suelo [Hz]	Amortiguamiento	Porcentaje	Resorte [Hz]	Amortiguamiento
1	1.5616	0.0100	22 %	1.0490	0.0122
2	4.7445	0.0054	344 %	4.6373	0.0240
3	7.6413	0.0079	70 %	7.6294	0.0135
4	9.5249	0.0042	-40 %	9.5249	0.0025

Tabla XI Edificios acoplados amortiguamiento edificio 7 pisos, sin acoplamiento con resorte					
Mode	Acoplamiento suelo [Hz]	Amortiguamiento	Porentaje	Resorte [Hz]	Amortiguamiento
1	0.8822	0.0115	-20 %	1.0490	0.0092
2	2.8133	0.0117	5 %	2.5988	0.0123
3	4.6969	0.0220	28 %	4.6373	0.0283
4	6.2943	0.0039	251 %	6.2824	0.0137
5	7.7248	0.0039	241 %	7.6413	0.0133
6	8.7977	0.0028	53 %	8.6308	0.0043
7	9.6441	0.0025	44 %	9.5606	0.0036

4.4. Primeros resultados de acoplamiento

En las Tablas VIII y IX se muestran los resultados obtenidos con cada acoplamiento con la barra de aluminio y con el resorte Tabla X y XI, ambos acoplamientos se comparan con

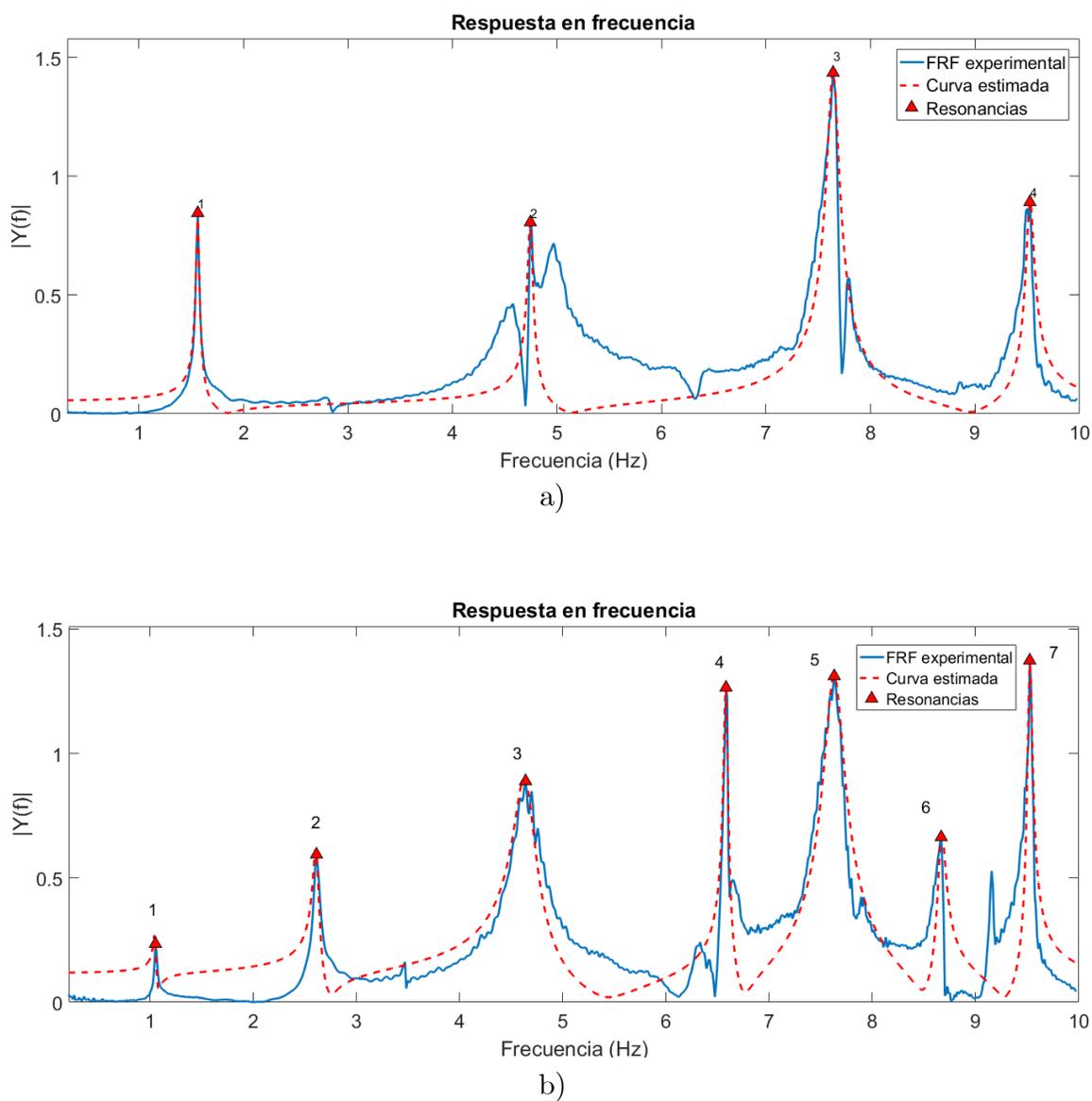


Figura 4.7: Respuesta frecuencial edificio 4 pisos, sin acoplamiento a) y acoplado por un resorte b).

las funciones de respuesta frecuencial sin ningun acoplamiento; aunque cuando no tienen acoplamiento también se conoce como acoplamiento por el suelo, debido a que comparten el mismo suelo; lo que buscamos es proteger cada uno de los edificios en caso de una excitación proveniente del suelo como es el caso de un sismo, nos enfocamos en el primer modo el cual es al que responden los edificios de esta altura ante un terremoto; debemos proteger las estructuras inyectando amortiguamiento en el primer modo de vibración; para el caso acoplado por medio de una barra de aluminio tenemos un decrecimiento de -2% en el

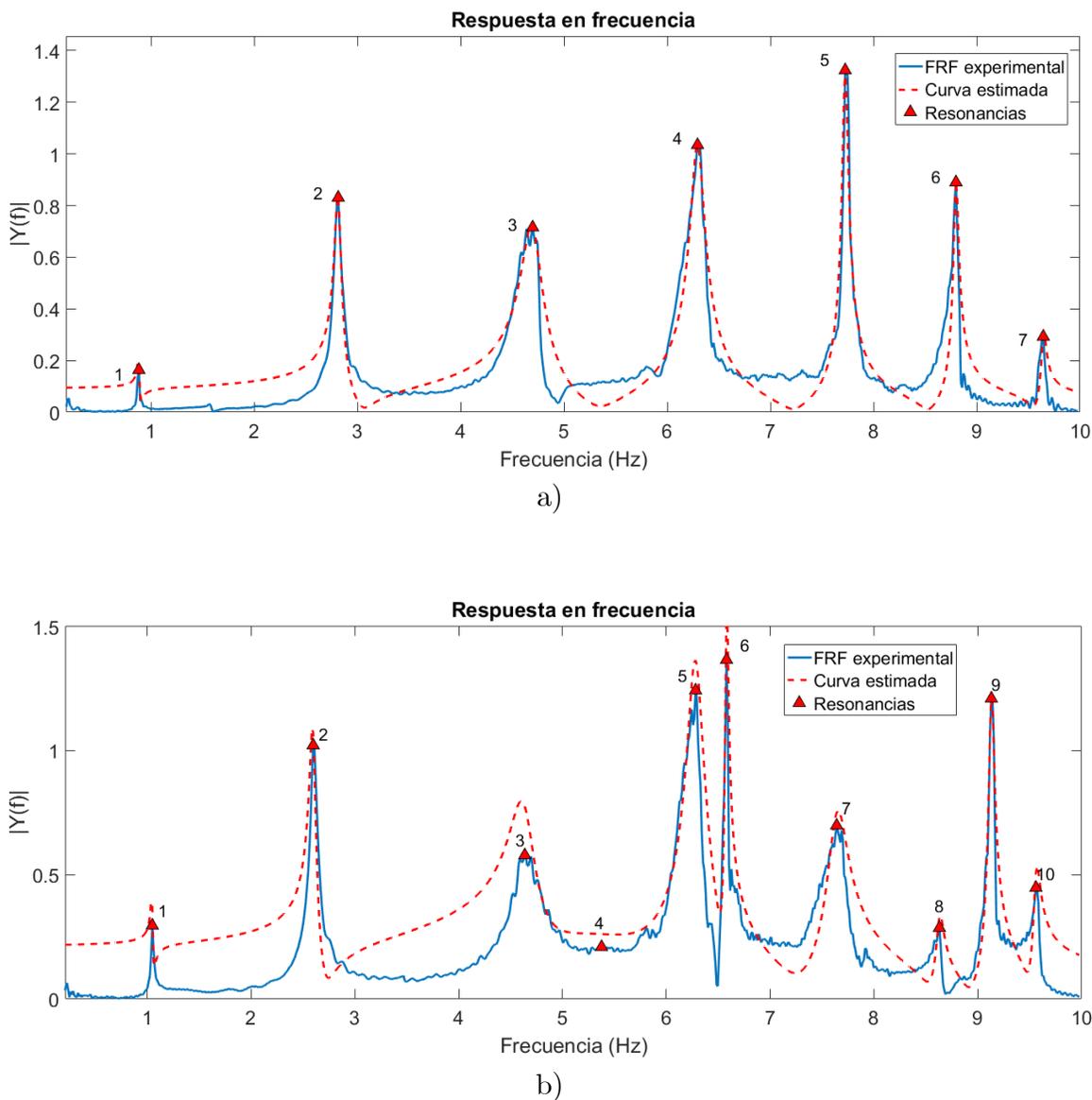


Figura 4.8: Respuesta frecuencial edificio 7 pisos, sin acoplamiento a) y acoplamiento con resorte b).

edificio de 4 pisos, mientras que con la misma barra rígida el edificio de 7 niveles tiene un 146%, esto es un incremento bastante considerable, el cual le brindaría una excelente protección, sin embargo esto sucede a costo de restar el amortiguamiento al edificio más pequeño.

Para el caso del acoplamiento con resorte, para el edificio de 4 pisos se tiene un incremento del 22%, mientras que el edificio de 7 niveles pierde un 20% de amortiguamiento; ninguno de los dos casos que se analizan acoplándolos pasivamente nos es útil para proteger ambas



Figura 4.9: Edificios acoplados con un resorte.

estructuras, para estos casos se protege una estructura a costa de la otra, en otras palabras en el caso de un terremoto es muy posible que solo una estructura tipo edificio no resiba daños considerables, mientras que la otra estructura a la que esta acoplada seguramente recibiría todo el daño quedando inservible, o en el peor de los casos podría colapsar; por este motivo se deben buscar mejores formas de acoplamiento, debemos obtener mejores resultados experimentales, ya que buscamos proteger ambas estructuras; como se muestra en este capítulo ninguna protección es útil si es a costa de otra estructura; debemos buscar un equilibrio, ambas estructuras deben ser protegidas.

Capítulo 5

Aplicación de control semiactivo para el acoplamiento lateral de estructuras tipo edificio

En el Capítulo 3, se obtuvieron experimentalmente las frecuencias naturales para cada edificio, realizando el acoplamiento lateral en el capítulo anterior; comparamos los resultados de las estructuras tipo edificio con acoplamiento lateral pasivo, mediante un resorte helicoidal y una barra rígida.

En este capítulo, se propone acoplar los dos edificios mediante el uso de un amortiguador MR, con el fin de obtener un mejor resultado, y determinar el caso con mejor respuesta por inyección de amortiguamiento en ambos edificios, aplicando excitación en la base (suelo) y comparando con los datos obtenidos en capítulos anteriores.

Se espera obtener buenos resultados con la aplicación del amortiguador MR, ya que este tipo de dispositivos semiactivos se emplean en una amplia gama de aplicaciones, desde la rama automotriz, bastante conocida, porque algunos autos deportivos los emplean, detectando y compensando las variaciones más pequeñas del asfalto y haciendo más placentero y confortable el viaje; también en la industria de la construcción, como en puentes pues existen variaciones, haciendo oscilar un puente debido al viento u ocasionados por el tráfico vehicular, con lo que se puede amortiguar la tensión en los cables que soportan el puente. En el presente trabajo se utiliza un amortiguador MR, fabricado por la compañía *Lord Corporation*, para acoplar lateralmente dos estructuras tipo edificio a escala de 4 y 7 niveles, colocando el amortiguador en el piso más alto del edificio más pequeño, que de acuerdo a investigaciones previas [41, 9, 10, 1], es la posición más adecuada.

Así, se realizarán experimentos primeramente en lazo abierto, sin retroalimentación al sistema, variando la corriente que se inyecta al amortiguador MR, variando el valor de la corriente en tres diferentes ocasiones y verificando experimentalmente, comparando con los resultados del capítulo anterior y observando cual brinda mejores resultados. Una vez hecho esto, se utiliza el mismo amortiguador MR, solo que esta vez realimentándolo con un esquema de control por retroalimentación positiva de la posición (PPF, por sus siglas en inglés), con el propósito de atenuar el primer modo de vibración y excitando la plataforma experimental

con movimiento armónico en la base, así como con señales de sismos.

5.1. Edificios acoplados utilizando un amortiguador MR

Considere el caso de dos estructuras tipo edificio de 4 y 7 niveles, con acoplamiento MR en el cuarto nivel de ambos edificios, como se muestra en la Fig. 5.1. La descripción del

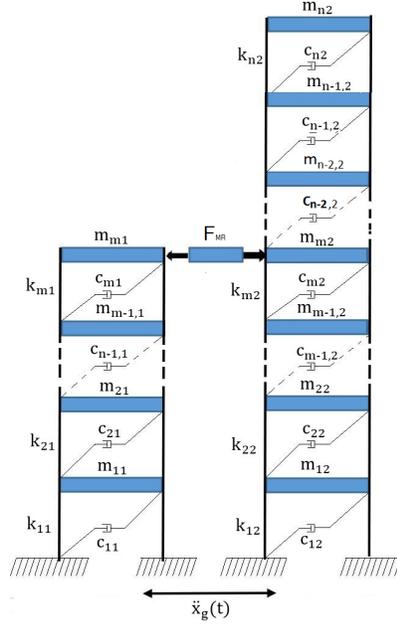


Figura 5.1: Diagrama esquemático de dos edificios acoplados con un amortiguador MR en el cuarto nivel.

movimiento de la dinámica acoplada de ambas estructuras con el amortiguador MR son

$$M\ddot{x} + (C + C_D)\dot{x} + (K + K_D)x = -Me\ddot{x}_g(t) + B_M F_{MR}(t) \quad (5.1)$$

donde el vector de desplazamiento es $x \in R^{n+m}$, con

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \in R^{n+m}, x_1 \in R^n, x_2 \in R^m$$

La matriz de masa, amortiguamiento viscoso y rigidez, incluyendo el acoplamiento, se denotan como $M, C, K \in R^{(n+m) \times (n+m)}$ es la matriz de masa, C es la matriz de amortiguamiento, K es la matriz de rigidez; donde $M_1, C_1, K_1 \in R^{m \times m}$ y $M_2, C_2, K_2 \in R^{n \times n}$; C_D y $K_D \in R^{(m+n) \times (m+n)}$ son matrices de acoplamiento; las matrices complementarias K_d y $C_d \in R^{k \times k}$; \ddot{x}_g es la excitación proveniente del suelo; donde e es un vector que representa el acoplamiento inercial entre los pisos y el movimiento del suelo; B_M es la representación de una matriz

de entrada para el sistema completo; F_{MR} es la fuerza de control aplicado al amortiguador magneto reológico conectado al piso superior del edificio de 4 pisos unido al edificio de 7 pisos en el cuarto piso; quedando la ecuación de la siguiente forma, donde

$$\begin{aligned}
 M &= \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \\
 C_D &= \begin{bmatrix} C_d & -C_d & 0 \\ -C_d & C_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad K_D = \begin{bmatrix} K_d & -K_d & 0 \\ -K_d & K_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 C_d &= \begin{bmatrix} C_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & C_{d2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & C_{dn} \end{bmatrix}, \quad K_d = \begin{bmatrix} K_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{d2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & K_{dn} \end{bmatrix} \\
 e &= [1, 1, \dots, 1]^T \in \mathbb{R}^{m+n} \\
 B_M &= [0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0]^T \in \mathbb{R}^{m+n}
 \end{aligned}$$

5.2. Validación experimental sistema de control a lazo abierto.

Antes de realizar el arreglo experimental debemos conocer un poco más sobre el amortiguador magneto reológico (MR); sabemos que los circuitos son alimentados con un voltaje de 9 volts; conectados mediante dos conexiones tipo banana a la denominada wonder box, la cual tiene una perilla donde podemos incrementar la corriente manualmente, que es inyectada al amortiguador MR; además conocemos algunos cuidados al equipo que debemos contemplar, no se debe aplicar más de 0.5 A por más de 30 segundos a la vez, o la acumulación de calor puede afectar el eje de plástico del piston, además cuidando que la temperatura de la carcasa no debe superar los 70 ° C; conociendo estas precauciones de uso del MR, tomamos como condición no exceder 0.45 A, así evitaremos causar algún daño permanente al equipo.

Por tal motivo se midieron en la Tabla XII el voltaje a la entrada y la corriente a la salida del MR Fig. 5.2, pues serán datos muy útiles a la hora de realizar algún tipo de control sobre este, realizando este pequeño experimento, con el fin de obtener las corrientes a las que está trabajando el amortiguador, conectando una fuente de voltaje a la entrada BNC de la wonder box, a la salida de esta conectamos un multímetro entre la wonder box y el amortiguador MR, podemos medir a qué corriente de salida le corresponde el voltaje de entrada que estamos aplicando, con sumo cuidado al aplicar pequeñas cantidades de voltaje, pues se desconoce totalmente la corriente de salida, para no sobrepasar los 0.5 A que dañarían el amortiguador; a continuación se muestra la tabla de voltajes obtenidos con sus respectivas corrientes.

Tabla XII Voltajes y corrientes MR	
Voltaje [V]	Corriente [A]
0.537	0.010
0.6	0.025
0.673	0.050
0.755	0.077
0.824	0.101
0.902	0.126
0.983	0.153
1.025	0.173
1.110	0.204
1.156	0.223
1.228	0.256
1.272	0.275
1.336	0.305
1.388	0.325
1.443	0.350
1.513	0.370
1.597	0.400
1.663	0.424
1.743	0.450



Figura 5.2: Obtención de corrientes MR.

Al tener un mejor entendimiento del funcionamiento de la *WonderBox* con la Tabla XII de corrientes, elegimos acoplar los edificios variando la condición de corriente, se hacen tres arreglos de corriente con valores diferentes, evidentemente se toma como primer valor 0 sin

corriente, seguido de 0.1 y 0.3 Amperes; El arreglo experimental Fig. 5.3 a lazo abierto se implementa; tomamos como base el arreglo experimental de acoplarlos pasivamente, solo que esta vez debemos hacer modificaciones a las placas donde seran colocados los nuevos dispositivos de acoplamiento, asegurarnos con el osciloscopio que la ganancia en voltaje que alimenta el amplificador del shaker sea la misma, ademas debemos monitorear el amortiguador MR con un multímetro, midiendo el valor de la corriente aplicada a este, sea correcta, debemos tomar en cuenta que la masa de los pisos en el cuarto piso se incrementara debido al dispositivo, el cual tiene una masa de 830 gr la cual debe ser sumada al cuarto piso del edificio más pequeño donde sera montado.

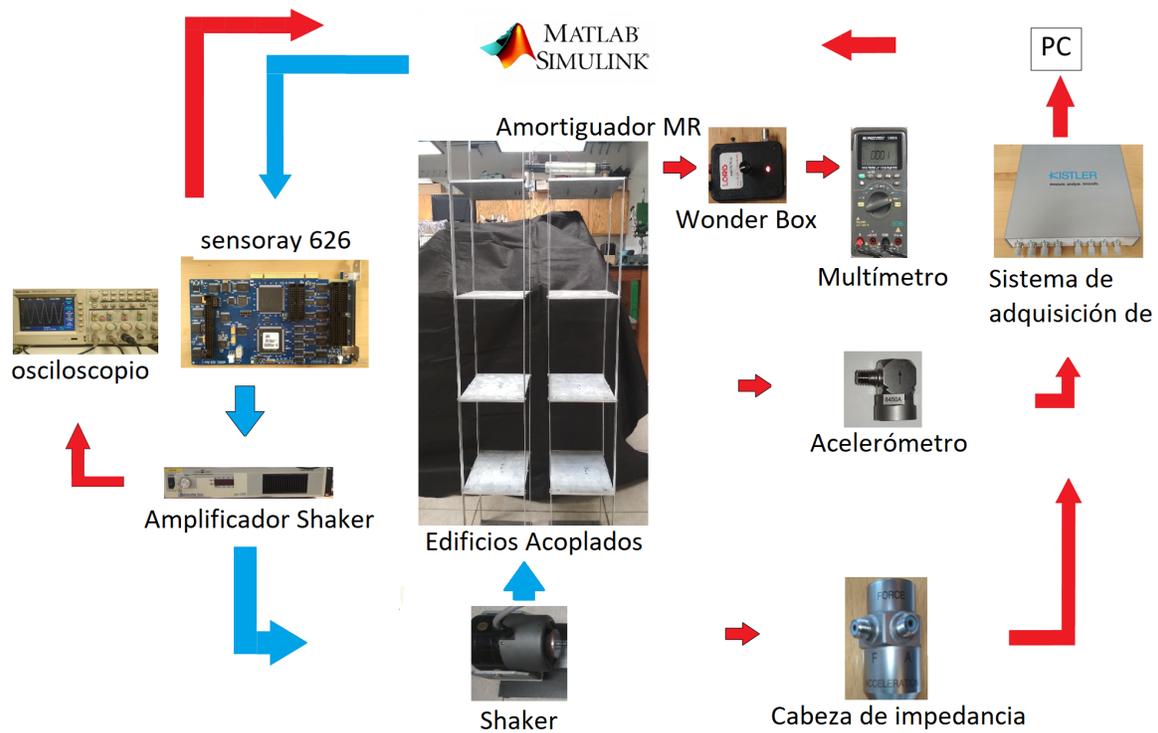


Figura 5.3: Arreglo experimental, edificios acoplados con amortiguador MR.

5.3. Gráficas lazo abierto

Gráficas respuesta frecuencial edificio 4 Fig. 5.4 y 7 pisos Fig. 5.5 con amortiguador MR 0 A.

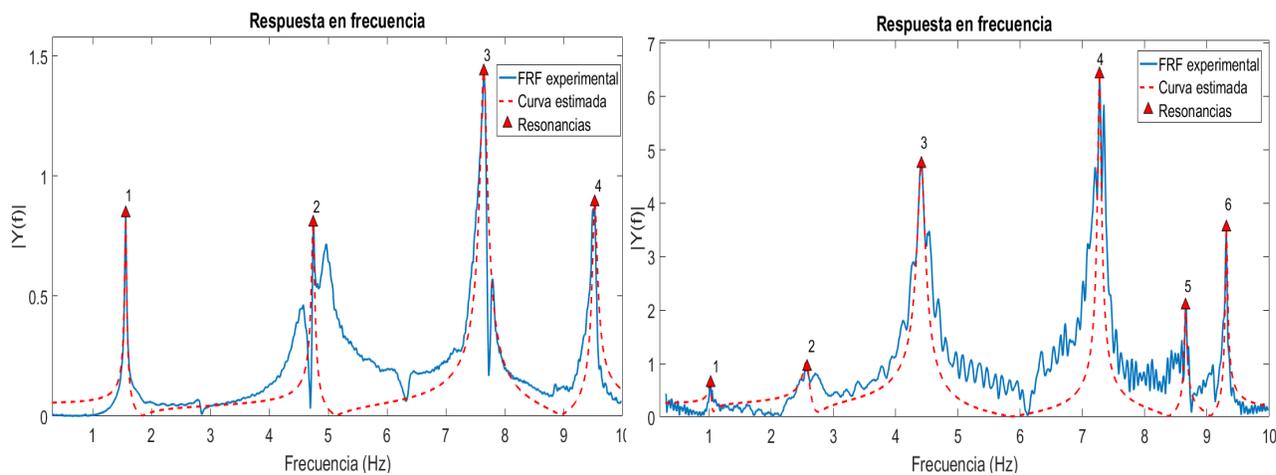


Figura 5.4: Comparativa edificio de 4 pisos sin acoplamiento y acoplado MR 0 A

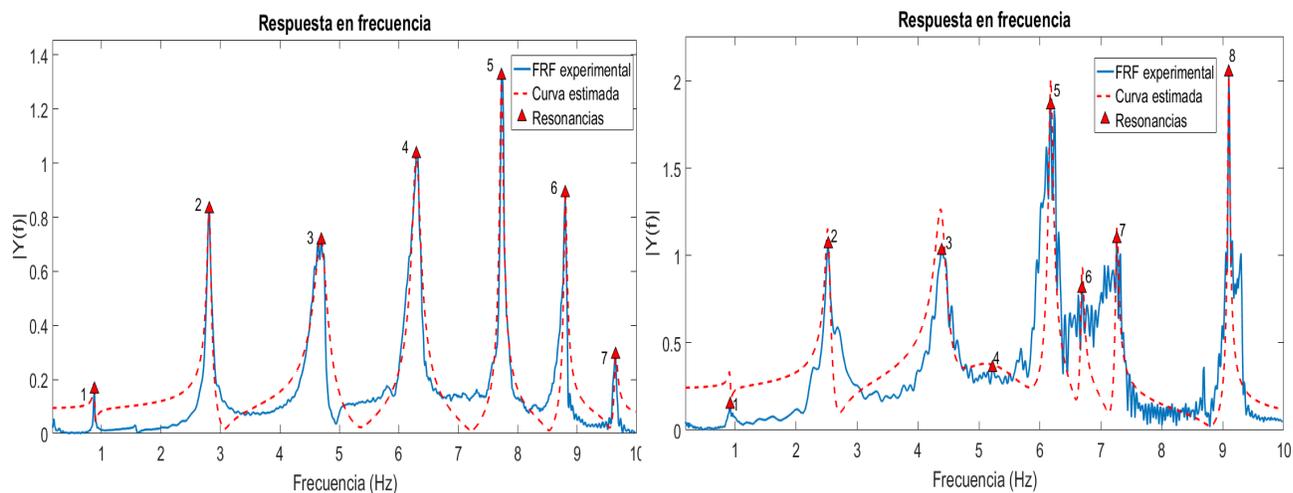


Figura 5.5: Comparativa edificio 7 pisos sin acoplamiento y acoplados MR 0 A

Gráficas función de respuesta frecuencial edificio 4 Fig. 5.6 y 7 pisos Fig. 5.7 sin acoplamiento y acoplados con amortiguador MR con una corriente de 0.1 Amperes.

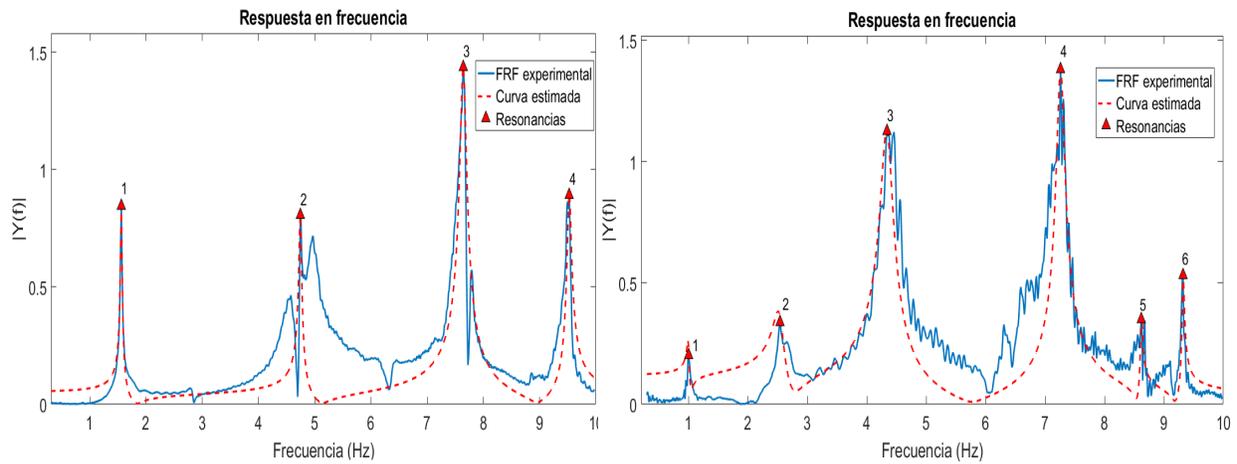


Figura 5.6: Comparativa edificio 4 pisos sin acoplamiento y acoplado con MR 0.1 A

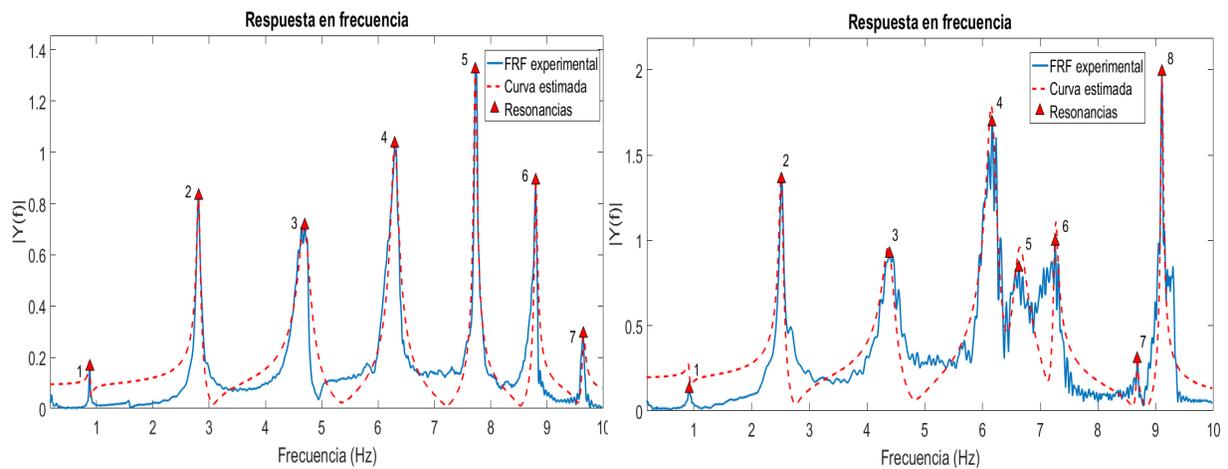


Figura 5.7: Comparativa edificio 7 pisos sin acoplamiento y acoplado MR 0.1 A

Gráficas respuesta frecuencial edificio 4 Fig. 5.8 y 7 pisos Fig. 5.9 sin acoplamiento y acoplados amortiguador MR 0.3 Amperes

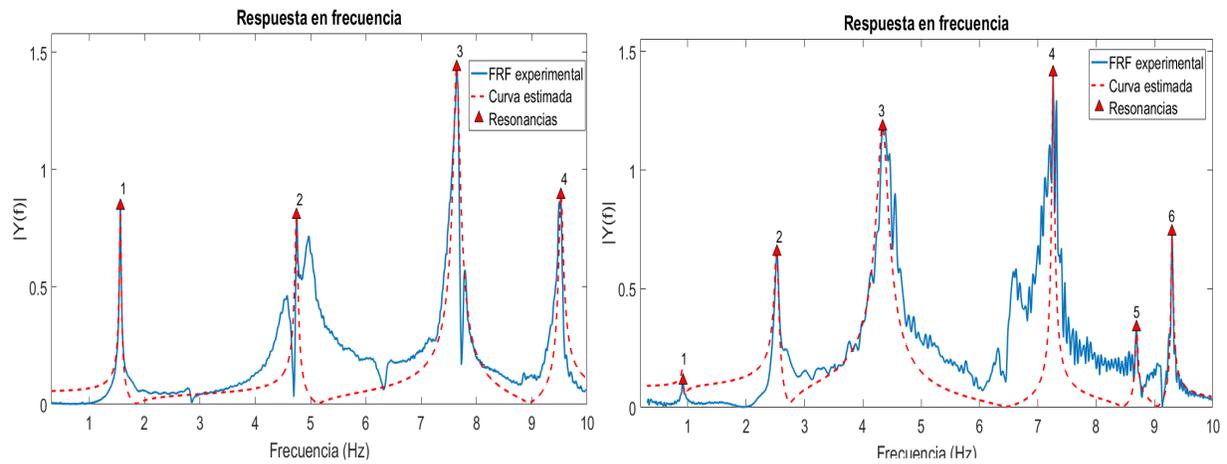


Figura 5.8: Comparativa edificio 4 pisos sin acoplamiento y acoplado MR 0.3 A

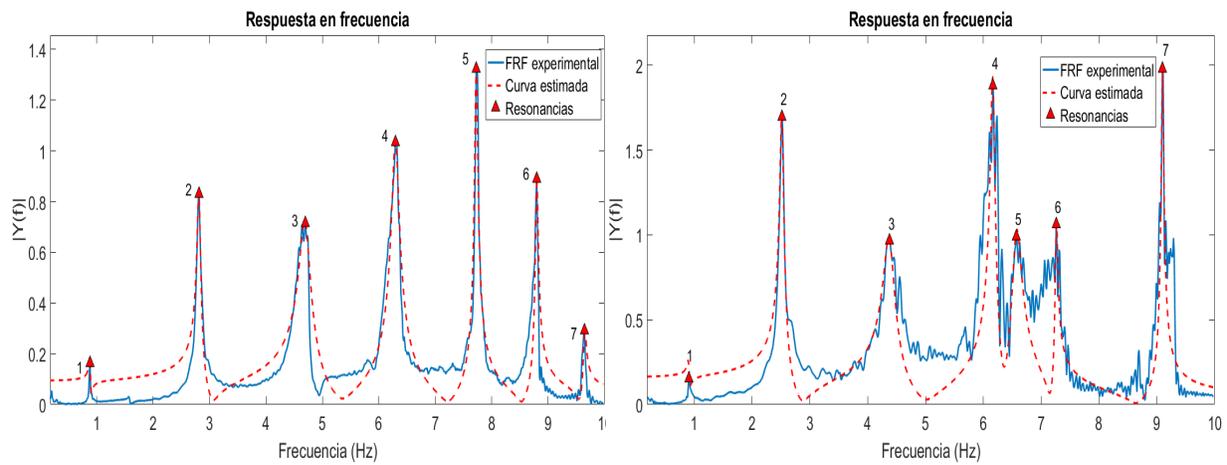


Figura 5.9: Comparativa edificio 7 pisos sin acoplamiento y acoplado MR 0.3 A

5.4. Análisis de resultados obtenidos con el amortiguador MR.

Con las gráficas nos damos una idea más clara sobre el comportamiento de cada uno de los edificios en los experimentos de lazo abierto, ya utilizando el amortiguador MR, ahora analizando estos datos podemos comparar el amortiguamiento, que esta siendo aplicado a la estructura y ver el porcentaje de este, comparandolo con el amortiguamiento que tiene el edificio estando desacoplado.

Tabla XIII y Tabla XIV de resultados comparando el amortiguamiento desacoplados versus acoplamiento con amortiguador MR aplicando 0 Amperes en edificio de 4 y 7 pisos.

Modo	Desacoplado [Hz]	Amortiguamiento ζ	Porcentaje	MR [Hz]	Amortiguamiento ζ
1	1.5616	0.0100	55 %	1.0254	0.0155
2	4.7445	0.0054	159 %	4.4108	0.0140
3	7.6413	0.0079	-50 %	7.2718	0.0039
4	9.5249	0.0042	-57 %	9.3103	0.0018

Modo	Desacoplado [Hz]	Amortiguamiento ζ	Porcentaje	MR [Hz]	Amortiguamiento ζ
1	0.8822	0.0115	38 %	0.9179	0.0159
2	2.8133	0.0117	48 %	2.5272	0.0174
3	4.6969	0.0220	1 %	4.3869	0.0223
4	6.2943	0.0039	56 %	6.1751	0.0061
5	7.7248	0.0039	0 %	6.6877	0.0039
6	8.7977	0.0028	21 %	7.2599	0.0034
7	9.6441	0.0025	-24 %	9.0957	0.0019

Tenemos el interes de atenuar el primer modo ya que el sismo es de baja frecuencia, teniendo en cuenta no afecta los demás modos con la misma intensidad, debemos evitar la resonancia de la estructura; en este caso como se observa en la Tabla XIII, para el edificio de 4 pisos incrementamos el amortiguamiento en un 55 %, se ve bastante prometedor, para el edificio de 7 pisos tenemos un incremento de amortiguamiento en 38 % Tabla XIV; si bien podria usarse, sin embargo para el caso del edificio de 4 pisos el tercer y cuarto modo tienen un decremento considerable en el amortiguamiento de la estructura superior al 50 %, en el caso del edificio de 7 pisos el septimo modo es afectado con un decremento del 24 %, para ambos casos, el resultado para el primer modo es prometedor, sin embargo es acosta de quitar amortiguamiento a los ultimos modos de ambos edificios, por tanto hay que buscar equilibrar no solo el primer modo sino tambien tener cuidado de no afectar otros modos de manera tan considerable.

Tabla XV y Tabla XVI resultados comparando el amortiguamiento desacoplados versus acoplamiento con amortiguador MR, aplicando 0.1 Amperes de corrientes en edificio de 4 y 7 pisos.

Modo	Desacoplado [Hz]	Amortiguamiento ζ	Porcentaje	MR [Hz]	Amortiguamiento ζ
1	1.5616	0.0100	111 %	1.0014	0.0211
2	4.7445	0.0054	374 %	4.3392	0.0256
3	7.6413	0.0079	26 %	7.2599	0.0100
4	9.5249	0.0042	-52 %	9.3222	0.0020

Modo	Desacoplado [Hz]	Amortiguamiento ζ	Porcentaje	MR [Hz]	Amortiguamiento ζ
1	0.8822	0.0115	99 %	0.9179	0.0229
2	2.8133	0.0117	24 %	2.5153	0.0146
3	4.6969	0.0220	12 %	4.3869	0.0247
4	6.2943	0.0039	284 %	6.1631	0.0150
5	7.7248	0.0039	41 %	7.2599	0.0055
6	8.7977	0.0028	-35 %	8.6785	0.0018
7	9.6441	0.0025	-8 %	9.1076	0.0023

Esta configuración muestra aparentemente mejores resultados, para el caso del edificio de 4 pisos se incrementa en el primer modo un amortiguamiento de 111 % esto es un resultado muy positivo superando lo esperado, en el caso del edificio de 7 pisos el amortiguamiento con el dispositivo MR se incrementa un 99 % es un resultado bastante bueno considerando que protege ambas estructuras.

Tomando en cuenta los siguientes modos, notamos que afectamos el cuarto modo decrementandolo un 52 % para el edificio de 4 pisos; ya no afectamos los dos ultimos modos solo el último. Para el caso del análisis del edificio de 7 pisos, podemos observar que los últimos dos modos tienen una afectación máxima del 35 %, si bien tiene decrementos en los últimos modos, se incrementa positivamente para ambos edificios tomando en cuenta que un sismo afectara el primer modo; para el caso del edificio de 4 pisos y afectara los primeros dos modos para el edificio de 7 pisos, es una forma que puede ser usada como protección antisísmica brindando una protección confiable en el momento de un desastre natural como lo es un terremoto.

Tabla XVII y Tabla XVIII resultados comparando el amortiguamiento desacoplados versus acoplamiento con amortiguador MR, aplicando 0.3 Amperes de corriente en edificio de 4 y 7 pisos.

Modo	Desacoplado [Hz]	Amortiguamiento ζ	Porcentaje	MR [Hz]	Amortiguamiento ζ
1	1.5616	0.0100	74 %	0.9174	0.0174
2	4.7445	0.0054	329 %	4.3392	0.0232
3	7.6413	0.0079	-63 %	7.2599	0.0029
4	9.5249	0.0042	-61 %	9.2984	0.0016

Modo	Desacoplado [Hz]	Amortiguamiento ζ	Porcentaje	MR [Hz]	Amortiguamiento ζ
1	0.8822	0.0115	51 %	0.9060	0.0174
2	2.8133	0.0117	22 %	2.5153	0.0143
3	4.6969	0.0220	4 %	4.3750	0.0230
4	6.2943	0.0039	69 %	6.1631	0.0066
5	7.7248	0.0039	22 %	6.5686	0.0128
6	8.7977	0.0028	7 %	7.2599	0.0030
7	9.6441	0.0025	-4 %	9.0957	0.0024

Esta configuración muestra resultados positivos en el incremento de amortiguamiento en el primer modo para ambos casos el edificio de 4 pisos aumenta un 74 %; mientras que para el caso del edificio de 7 pisos se incrementa un 51 %, esto parece un excelente resultado, sin embargo para el edificio de 4 pisos se decrentan el tercer y cuarto modo de manera muy considerable, ambos arriba del 60 %, en el caso del edificio de 7 pisos el decremento es de tan solo un 4 %, en el caso de un evento sísmico los datos experimentales indican que el edificio de 7 pisos no recibiría daños, sin embargo un terremoto al ser un evento errático se debe escoger una configuración que afecte positivamente el primer modo, afectando una manera viable a los otros modos de vibración.

Para el caso de acoplamiento pasivo el resorte protege favorablemente el edificio más pequeño, sin embargo la estructura de mayor tamaño tiene un resultado desfavorable, por lo que solo se protege el edificio pequeño, con esta configuración el edificio de 7 pisos sufriría daños considerables; cuando se acopla por medio de barra rígida se tiene un resultado bastante favorable a la estructura de 7 pisos, sin embargo la estructura pequeña tiene una disminución en su amortiguamiento, por tal motivo esta configuración no es favorable para ambas estructuras.

Si hacemos una comparativa en este momento del trabajo, podemos observar claramente, que los resultados experimentales en la atenuación del primer modo son bastante viables, sobre todo si observamos los resultados cuando aplicamos control semiactivo a lazo abierto, ya que aplicando una corriente de 0.1 A tenemos los mejores resultados para ambas edificaciones, aplicando corrientes de 0 y 0.3 A son resultados favorables para el primer modo sin embargo se busca un equilibrio estructural en que ambas edificaciones salgan beneficiadas del acoplamiento; para ellas esto no ocurre en los últimos modos aun así son buenos resultados.

Acoplamiento	Edificio 4 pisos	Edificio 7 pisos
Resorte	22 %	-20 %
Barra rígida	-2 %	146 %

Acoplamiento con amortiguador MR	Edificio 4 pisos	Edificio de 7 pisos
0 A	55 %	38 %
0.1 A	111 %	99 %
0.3 A	74 %	51 %

5.5. Control por Retroalimentación Positiva de la Posición (PPF)

En esta parte ya hemos experimentado utilizando acoplamiento con control pasivo, también se ha hecho utilizando el amortiguador MR con diferentes corrientes a lazo abierto, es tiempo de hacerlo de manera semiactiva a lazo cerrado; el control por retroalimentación positiva de la posición o mejor conocido por sus siglas en inglés PPF; modelamos el sistema acoplado quedando de la siguiente forma

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = B_M F_{MR}(t) + F(t)$$

donde M, C y K son matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema, utilizando la variable q que representa las coordenadas de posición del edificio; donde B_M^T es el vector de entrada de control del sistema esto es en el acoplamiento en el piso más alto de la estructura más pequeña, $F(t)$ es el vector de fuerzas debido al movimiento en la base, la salida del sistema a retroalimentar dada por Y aplicada en la parte superior de cada estructura, por medio del vector B_0 , \ddot{x}_g es la excitación (aceleración) proveniente del suelo, $e = [1, 1, \dots, 1]^T \in R^{m+n}$ es un vector que permite transformar la excitación en el suelo a cada piso del edificio.

$$q = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n]^T$$

$$B_M = [0_1, 0_2, 0_3, \dots, 1_m, \dots, 0_{n-1}, 0_n]^T \in R^{m+n}$$

$$F(t) = -Me\ddot{x}_g(t)$$

$$Y = B_o q$$

$$B_0 = [0_1, 0_2, 0_3, \dots, 0_m, \dots, 0_{n-1}, 1_n] \in R^{m+n}$$

Agregando al esquema de control PPF un sistema dinámico auxiliar, η representa el absorbedor virtual pasivo, g es la ganancia, con relación de amortiguamiento ζ_f y frecuencia natural ω_f ; la fuerza del amortiguador magnetorheológico F_{MR} es la entrada del sistema, siendo g, ζ_f, ω_f las constantes reales de diseño del controlador.

$$\ddot{\eta} + 2\omega_f \zeta_f \dot{\eta} + \omega_f^2 \eta = g\omega_f^2 B_0^T q$$

$$F_{MR}(t) = g\omega_f^2 \eta(t)$$

Ahora debemos relacionar las ecuaciones antes mencionadas al modelo del sistema acoplado, con el esquema de control PPF; obteniendo un nuevo modelo en condición de matrices globales \hat{M} , \hat{C} y \hat{K} del sistema esto es una ecuación global, relacionando ambas ecuaciones queda de forma matricial.

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \ddot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 2\omega_f \zeta_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -B_M g \omega_f^2 \\ -g \omega_f^2 B_o^T & \omega_f^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Reescribiendo la ecuación anterior en función de Q global, en un sistema de lazo cerrado queda

$$\hat{M}\ddot{Q} + \hat{C}\dot{Q} + \hat{K}Q = \hat{F}(t)$$

5.6. Análisis de estabilidad

Debemos establecer un criterio de estabilidad; en el modelado de cada una de las estructuras tipo edificio la ecuación esta compuesta por las matrices M, C y K , donde estas matrices son simétricas y definidas positivas; esto quiere decir que las matrices globales $\hat{M}, \hat{C}, \hat{K}$; también son simétricas y definidas positivas, esto ocurre solo para el caso del edificio de cuatro niveles, donde se colocara el amortiguador MR y el acelerómetro para obtener los datos en el cuarto piso; sin embargo para el caso del edificio de 7 pisos esto no ocurre así, aunque M, C, K son matrices simétricas y definidas positivas; en este caso solo las matrices globales \hat{M} y \hat{C} si son simétricas y definidas positivas; para este caso \hat{K} no es simétrica ya que $B_M \neq B_0^T$ ya que el amortiguador MR esta colocado en el cuarto piso y el acelerómetro se encuentra colocado en el septimo piso, ya que la colocación no es la misma se trata de una configuración no colocada, sin embargo podemos cambiar la configuración de sensado haciendo $B_M = B_0^T$ esto es ambas muestras tomadas en el cuarto piso, así \hat{K} también es una matriz simétrica definida positiva.

Cabe mencionar que la matriz global \hat{K} depende de tomar los valores con mejores resultados de las constantes reales de diseño del controlador, la ganancia g , la relación de amortiguamiento ζ_f y la frecuencia natural del filtro ω_f , para garantizar que el sistema sea estable.

La estabilidad se establece tomando la matriz global \hat{K} de rigidez, ya sea la matriz de rigidez del edificio de cuatro pisos o la del edificio de siete pisos.

$$\hat{K} = \begin{bmatrix} K & -B_M g \omega_f^2 \\ -g \omega_f^2 B_0^T & \omega_f^2 \end{bmatrix}$$

La colocación del amortiguador MR es de suma importancia, en ambos edificios esta colocado en el cuarto piso por tal motivo tendremos una condición de estabilidad para cada uno de los edificios.

Para el edificio de cuatro pisos la condición de estabilidad es la siguiente como se observa depende de la rigidez y de la ganancia, así como de la frecuencia natural del sistema.

$$\frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{k_1 k_2 k_4 + k_1 k_3 k_4 + k_2 k_3 k_4 + k_1 k_2 k_3} > g^2 \omega_f^2 \quad (5.2)$$

De la misma forma para el edificio de 7 pisos la condición de estabilidad depende de la rigidez, de la ganancia y de la frecuencia natural.

$$\frac{k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 k_7}{k_1 k_2 k_3 k_5 k_6 k_7 + k_1 k_2 k_4 k_5 k_6 k_7 + k_1 k_3 k_4 k_5 k_6 k_7 + k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 k_7} > g^2 \omega_f^2 \quad (5.3)$$

Ahora se calcula la ganancia g para el edificio de 4 pisos ecuación (5.2) así como para el edificio de 7 pisos ecuación (5.3), se calcula el rango para el primer modo si es el que se desea atenuar en este caso se pretenden atenuar los 3 modos del edificio pequeño y los primeros 3 modos del edificio más alto, para ello calcularemos el rango de ganancias atenuando las frecuencias que sean más dañinas para ambas estructuras en el momento de realizar la sintonización.

5.7. Sintonización del control PPF

Se ha llegado a un punto muy importante, el cual es sintonizar los parámetros del control PPF. Para esto, debemos establecer un criterio de estabilidad; en el modelado de cada una de las estructuras tipo edificio, la ecuación esta compuesta por las variables que definen el funcionamiento del control PPF siendo g, ζ_f, ω_f las variables reales de diseño del controlador.

$$\ddot{\eta} + 2\omega_f\zeta_f\dot{\eta} + \omega_f^2\eta = g\omega_f^2B_0^Tq \quad (5.4)$$

Como se puede apreciar claramente la ecuación (5.4) depende de la ganancia g , la relación de amortiguamiento ζ_f y de ω_f la frecuencia natural a atenuar; se debe probar la combinación de estos tres valores para tener una atenuación que sea claramente visible, esto se hace haciendo pruebas con ayuda de simulink, ya tenemos un rango de ganancia g para cada una de las frecuencias, solo resta dar valores a ζ_f , se propone 0.3, así al tener este valor fijo, se prueba g en el rango deseado de la frecuencia que se desea atenuar, se hacen pruebas hasta que se complete el rango de g siendo cuidadosos pues el sistema debe ser estable como vimos anteriormente, la frecuencia natural debe simplemente estar en rad, para que las unidades sean coincidentes.

Ya que se acoplaron los edificios, es un sistema dinámico con más grados de libertad, conocemos que el sismo afecta primordialmente el primer modo de vibración de cada estructura, esto es una frecuencia baja, para este caso si repetimos el procedimiento de sintonización, podemos lograr un control MPPF el cual nos asegura una mejor protección ante el movimiento generado por el shaker, si la ganancia para el primer modo del edificio de 4 pisos esta en un rango de $[-1.37, 1.37]$; ponemos ζ_f esto es el amortiguamiento con el valor constante de 0.3, atenuando una frecuencia de 1.8597 Hz, que es el valor de la frecuencia natural dada por simulación, sin embargo las unidades deben ser correspondientes por ello se multiplica por 2π para tener la frecuencia en radianes, así le damos el valor en simulink, corremos el programa en este caso con intervalos de g de 0.1, obteniendo la aceleración. Porque aceleración en vez de posición, si bien la aceleración integrandola un par de veces da el desplazamiento que es lo que nos pide el control PPF, sin embargo debemos prever que en la experimentación con el equipo que contamos para sensar cada edificio es con acelerómetros, por tal motivo se usa la aceleración como amplitud a la hora de obtener su respuesta frecuencial, ya que al analizar la atenuación en la experimentación se obtienen datos de aceleración; para visualizar con mayor facilidad que valor de ganancia el control esta obteniendo un mejor resultado, el

cual es visible si comparamos el desplazamiento cuando la ganancia sea cero, esto es a lazo abierto y si damos valores a la ganancia sintonizando a lazo cerrado.

La atenuación se realiza sintonizando dentro del rango de ganancias el que brinde un mejor resultado de atenuación hacia ambas estructuras, ya que si no se sintoniza de la forma correcta podríamos producir comportamientos negativos sobre la estructura en vez de ayudarla; esta sintonización se realiza con los edificios acoplados con el amortiguador MR como se menciona anteriormente a lazo cerrado; como se observa en cada una de las Tablas XXI y XXII, el primer modo es el que requiere una mayor potencia computacional además de mayor atención al momento de realizar la sintonización, atenuar el primer modo para ambas estructuras es de suma importancia, ya que en caso de un siniestro como los ocurridos el 19 de septiembre, en un sismo es el más afectado, ocasionando el colapso de la estructura; calculamos el rango de ganancia para todos los modos sin embargo como el proceso es complejo requiere bastante tiempo de análisis, protegeremos el primer modo proponiendo además atenuar los primeros tres modos de cada estructura tipo edificio, con esto se garantizara obtener un mejor resultado en el momento que ambas estructuras sean excitadas por el movimiento del suelo.

Tabla XXI Rango de ganancia g edificio 4 pisos		
Modo	ω_f teórico	ω_f experimental
1	[-1.37,1.37]	[-1.64,1.64]
2	[-0.47,0.47]	[-0.54,0.54]
3	[-0.31,0.31]	[-0.33,0.33]
4	[-0.25,0.25]	[-0.26,0.26]

Tabla XXII Rango de ganancia g edificio 7 pisos		
Modo	ω_f teórico	ω_f experimental
1	[-2.29,2.29]	[-2.91,2.91]
2	[-0.77,0.77]	[-0.91,0.91]
3	[-0.48,0.48]	[-0.54,0.54]
4	[-0.36,0.36]	[-0.40,0.40]
5	[-0.29,0.29]	[-0.33,0.33]
6	[-0.26,0.26]	[-0.29,0.29]
7	[-0.24,0.24]	[-0.26,0.26]

Con el fin de tener una mejor atenuación se calculan nuevamente las frecuencias naturales de cada estructura tipo edificio, así con la ayuda de simulink aplicaremos la combinación de ganancia y amortiguamiento obteniendo el mejor resultado posible.

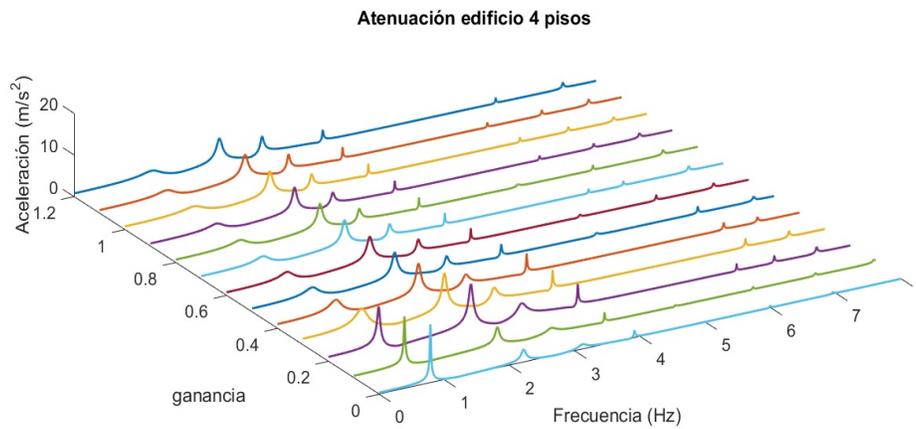


Figura 5.10: Sintonización de ganancia para el primer modo del edificio de 4 pisos con rango de ganancia de $[0,1.2]$, sintonizado con ζ fijo de 0.3

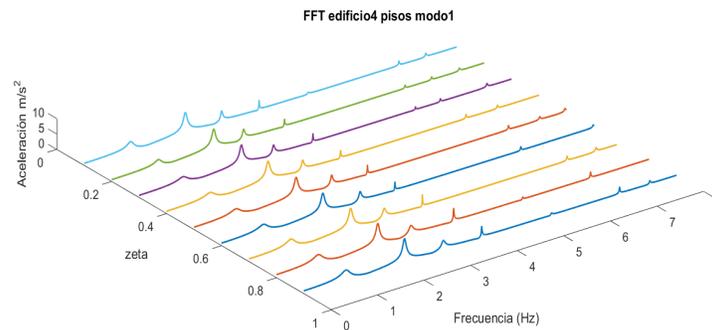


Figura 5.11: Sintonización de ζ_f modo 1, con ganancia fija de 0.7

El control MPPF tiene un mejor desempeño para el primer modo de vibración del edificio de 4 pisos, cuando la ganancia g tiene un valor de 0.7 combinado con un valor ζ_f de 0.3; hemos atenuado satisfactoriamente el primer modo, ahora pretendemos atenuar los siguientes dos modos para cada estructura.

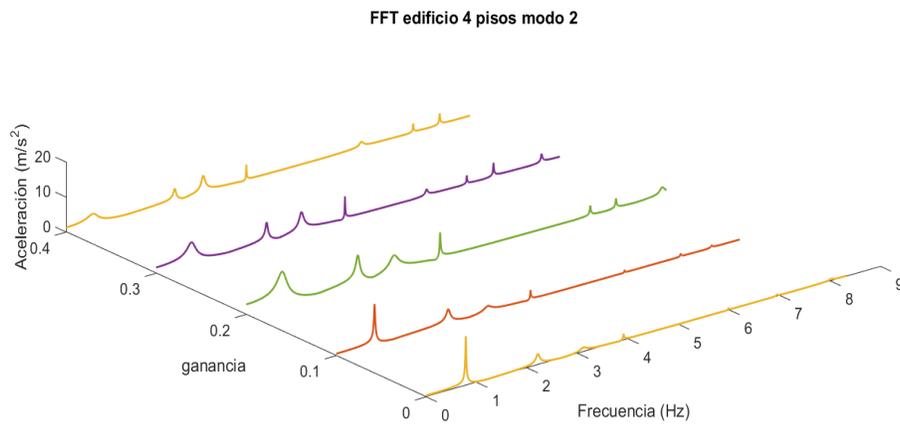


Figura 5.12: Sintonización de ganancia para el modo 2, del edificio de 4 pisos con una ζ_f de 0.3

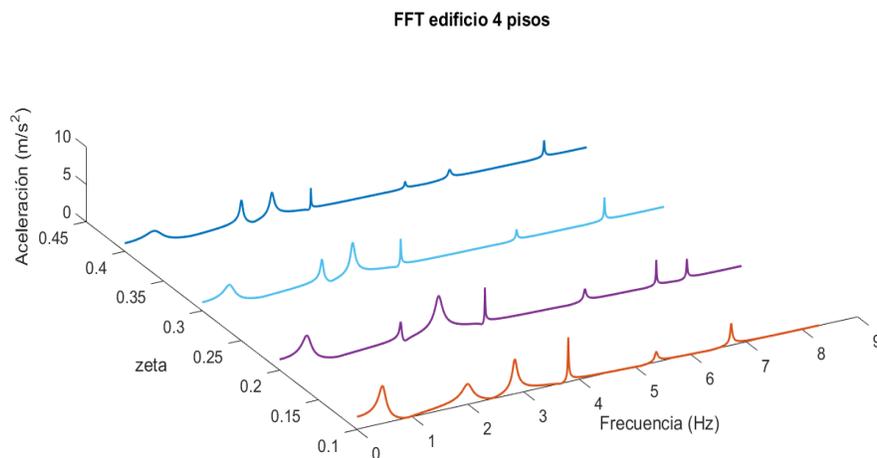


Figura 5.13: Sintonización de ζ_f edificio 4 pisos, con ganancia fija de 0.4

Las gráficas nos ayudan a visualizar fácilmente el valor adecuado de sintonización PPF, para este caso g tiene un rango de $[-0.47, 0.47]$ donde el sistema es estable; con g de 0.4, y ζ de 0.4, se tiene la mejor atenuación en el segundo modo.

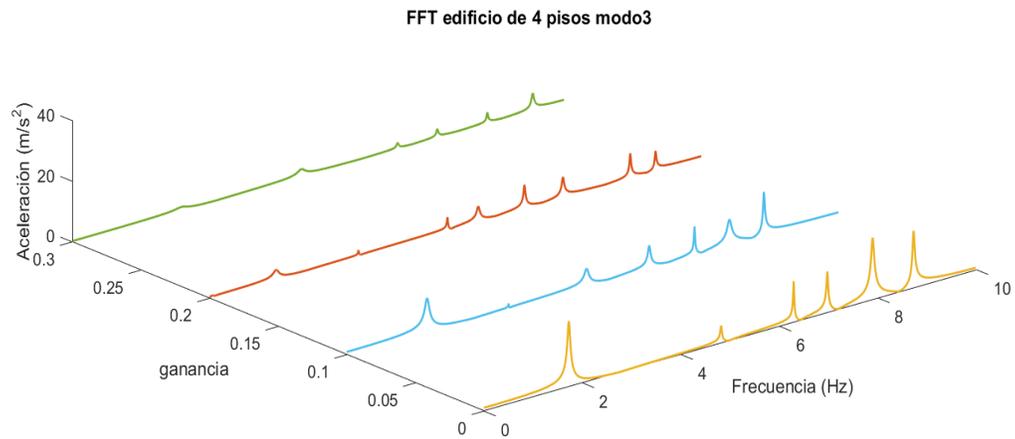


Figura 5.14: Modo 3 del edificio de 4 pisos, sintonización de ganancia con ζ_f 0.3.

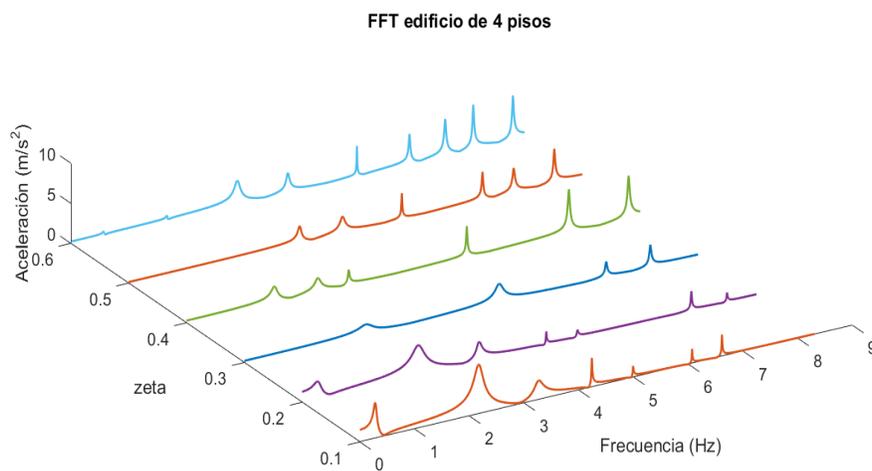


Figura 5.15: Modo 3 edificio de 4 pisos sintonización de ζ_f con ganancia fija de 0.3

En este tercer modo a atenuar la mejor opción y donde se obtienen mejores resultados es cuando la ganancia tiene un valor de 0.3 y ζ_f sintonizado a 0.3.

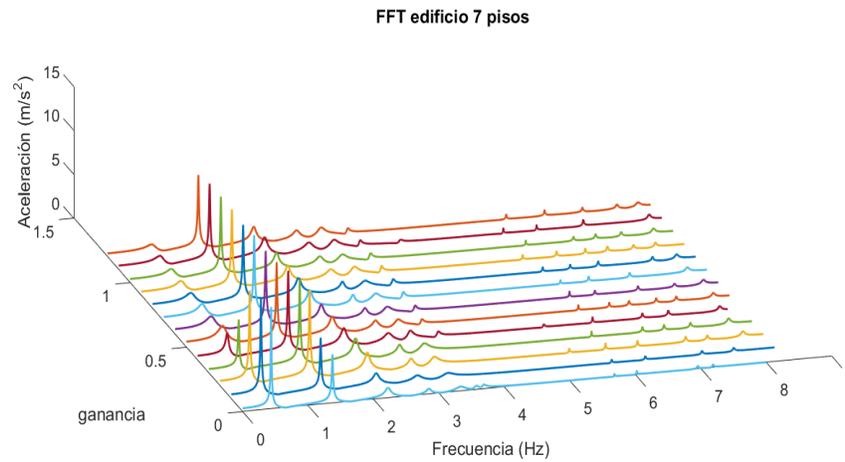


Figura 5.16: Atenuación de ganancia control MPPF modo1 edificio de 7 pisos con valor fijo de ζ_f 0.3

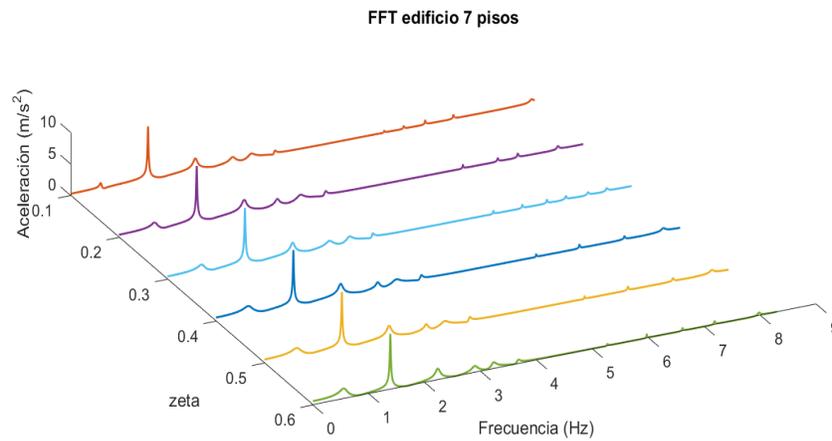


Figura 5.17: Atenuación de ζ_f edificio de 7 pisos con valor de ganancia fijo de 0.9

La atenuación del primer modo y mas importante en el momento de una excitación del suelo se logra cuando la ganancia tiene un valor de 0.9, combinado con el valor de ζ_f de 0.2.

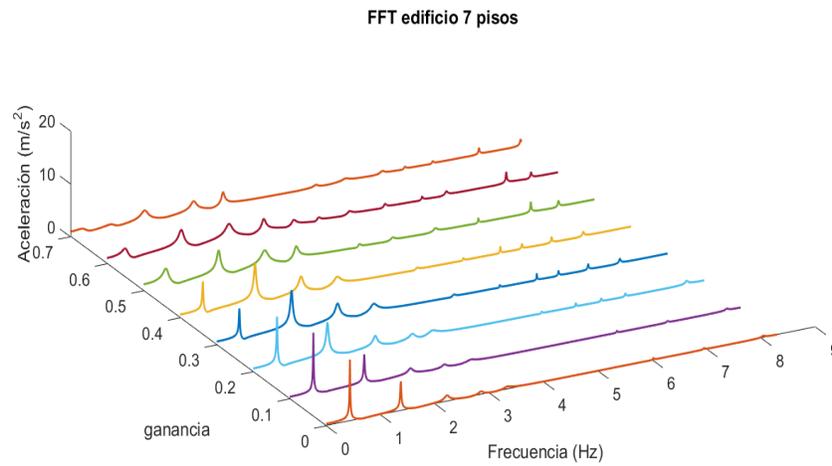


Figura 5.18: Atenuación de ganancia para el segundo modo edificio de 7 pisos con valor fijo de ζ_f de 0.3

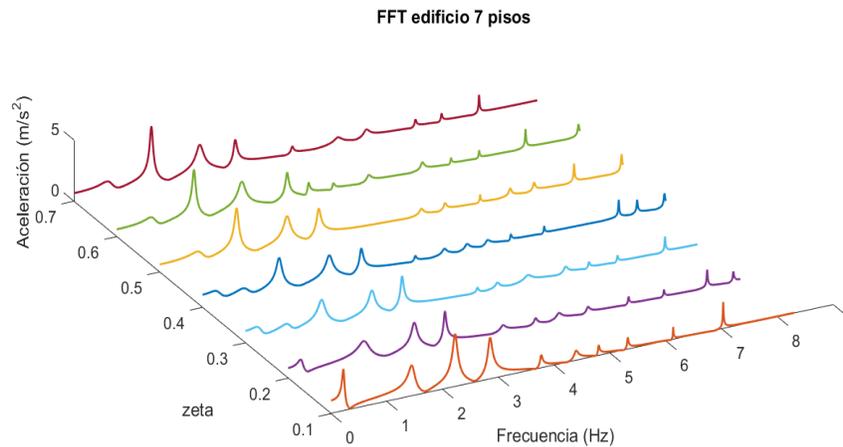


Figura 5.19: Atenuación de ζ_f modo 2 edificio de 7 pisos con ganancia fija de 0.7

En esta ocasión se muestra como el segundo modo del edificio de 7 niveles se atenúa de la mejor forma cuando la ganancia vale 0.7, combinada con el valor de 0.4 de ζ_f .

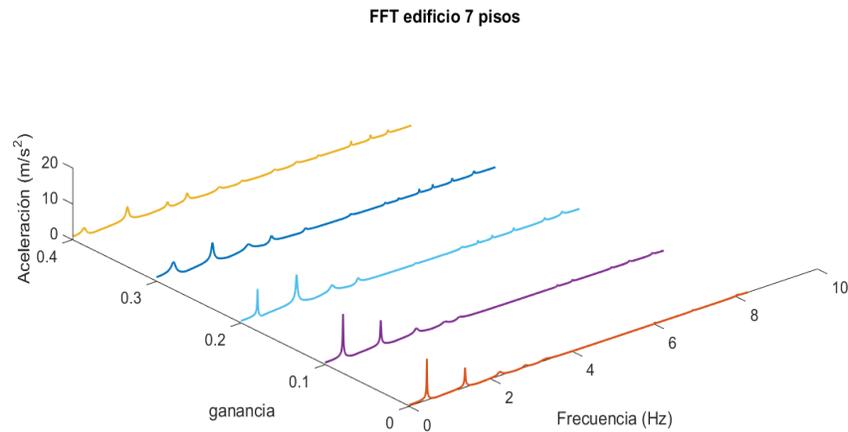


Figura 5.20: Atenuación de ganancia edificio de 7 pisos con valor fijo 0.3 de ζ_f

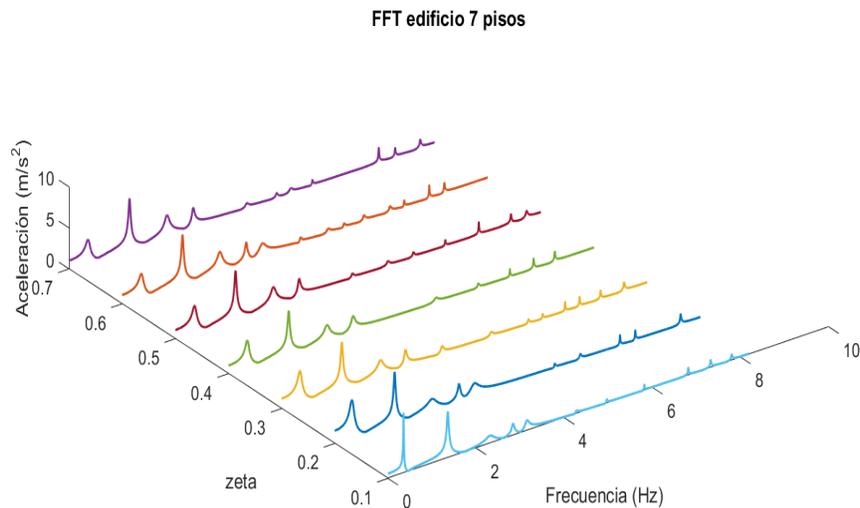


Figura 5.21: Atenuación de ζ_f para el edificio de 7 pisos con valor de ganancia fijo de 0.3

En esta ocasión la mejor atenuación del tercer modo del edificio de 7 pisos se logra cuando existe la combinación de valores de ganancia 0.3, con valor de 0.4 de ζ_f ; hemos sintonizado satisfactoriamente cada uno de los tres primeros modos de cada estructura tipo edificio que son los más afectados en el caso de un sismo, por ende podemos seguir adelante al aplicar la atenuación al control MPPF con retroalimentación, que usamos con el amortiguador MR.

5.8. Gráficas de aceleración y desplazamiento

Si bien es notorio el cambio en magnitud de las gráficas Fig. 5.22, Fig. 5.25 cuando es aplicado el control MPPF, para atenuar la excitación provocada por una excitación cuando los edificios se encuentran ya acoplados, si no se comprende del tema se puede simplificar aun más, ya que si se gráficán los desplazamientos de cada uno de los edificios, ya acoplados sin control MPPF y con control, es factible comprender la atenuación que se está obteniendo en el momento que llega una fuerza externa a excitar a ambas estructuras, el instrumento que tenemos para sensar es un acelerómetro colocado en la parte superior de cada estructura, tendremos una disminución de la aceleración que se observara con más detalle al mirar las gráficas de desplazamiento Fig. 5.28 , Fig. 5.31.

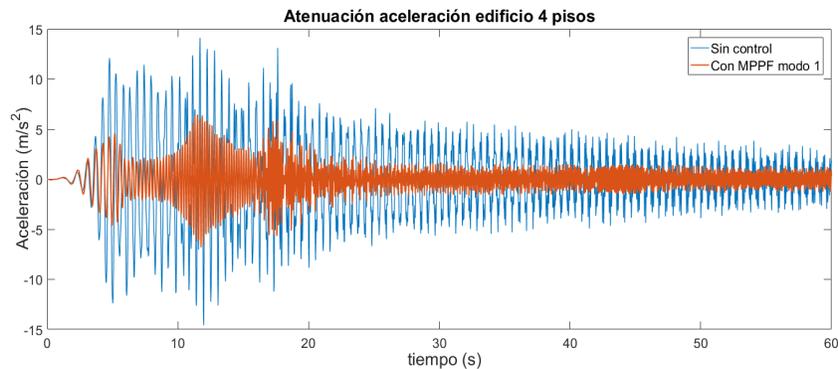


Figura 5.22: Atenuación de aceleración modo 1 edificio 4 pisos

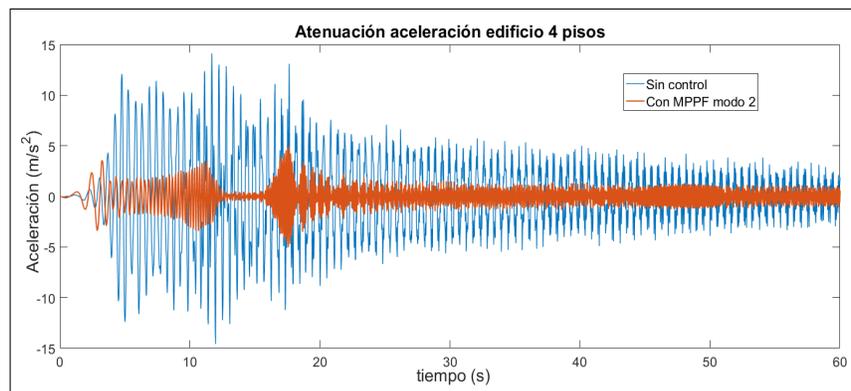


Figura 5.23: Atenuación de aceleración modo 2 edificio de 4 pisos

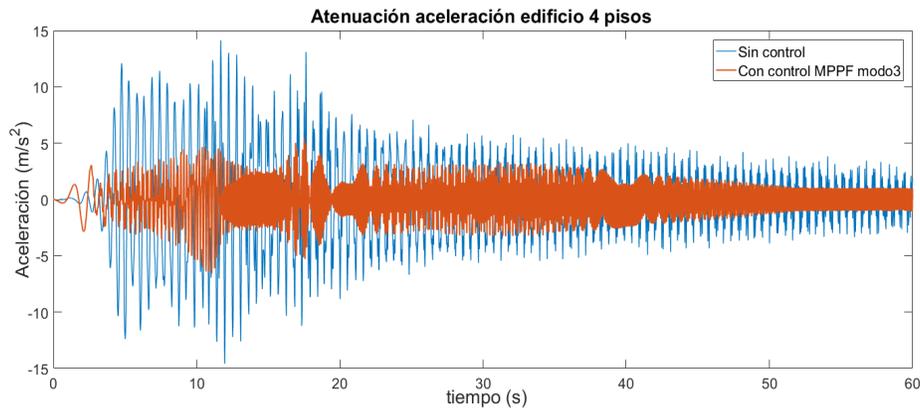


Figura 5.24: Atenuación aceleración modo 3 edificio de 4 pisos

La aceleración es atenuada cuando entra en acción el control MPPF, la finalidad de este trabajo es reducir el daño catastrófico que pueda provocar el colapso de una estructura, podemos observar una atenuación considerable, lo siguiente es analizar el desplazamiento de cada estructura.

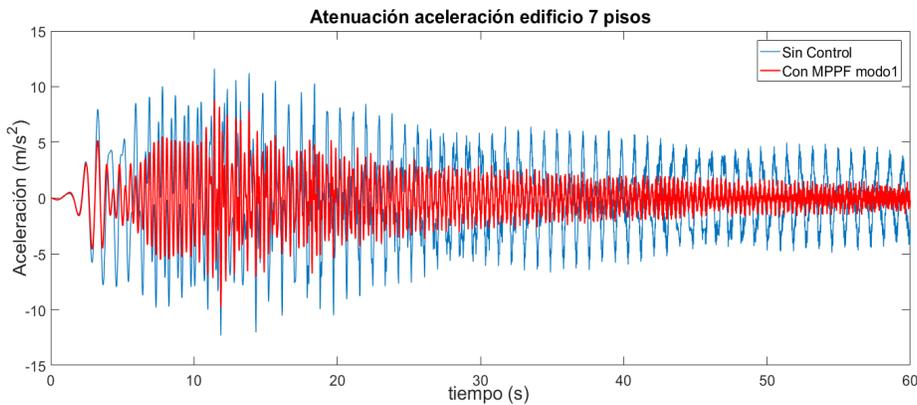


Figura 5.25: Atenuación aceleración edificio de 7 pisos modo 1

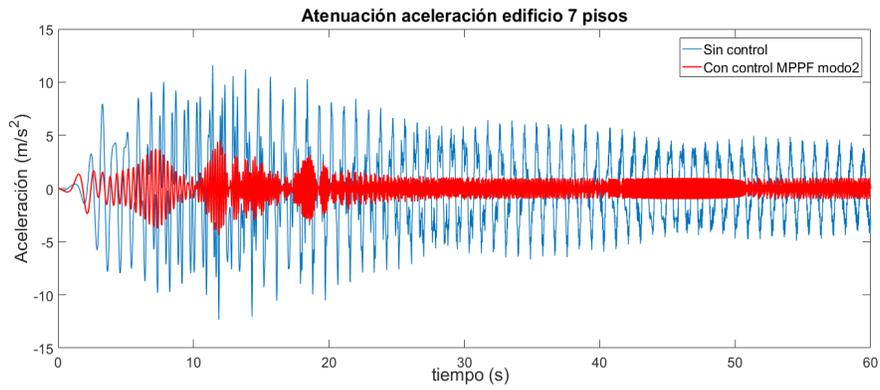


Figura 5.26: Atenuación aceleración edificio 7 pisos.

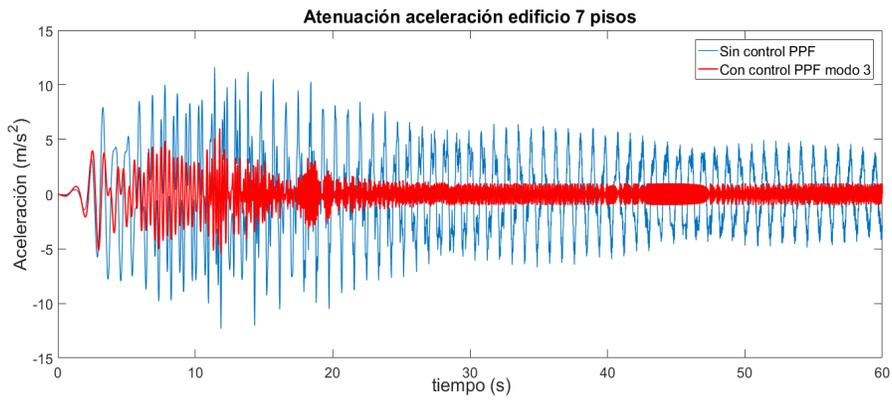


Figura 5.27: Atenuación aceleración modo 3 edificio de 7 pisos

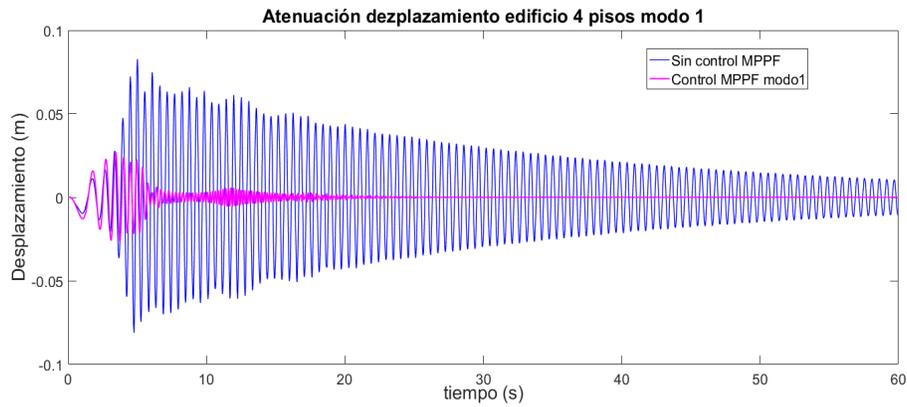


Figura 5.28: Atenuación de desplazamiento modo 1 edificio de 4 pisos con control y sin control.

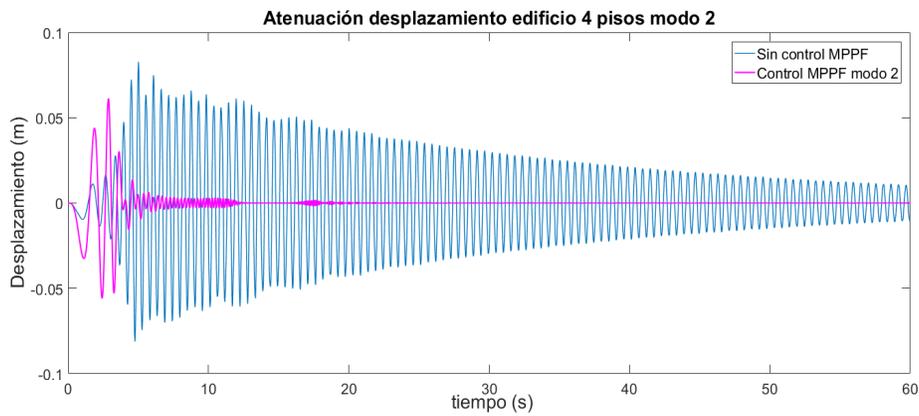


Figura 5.29: Atenuación desplazamiento modo 2 edificio de 4 pisos

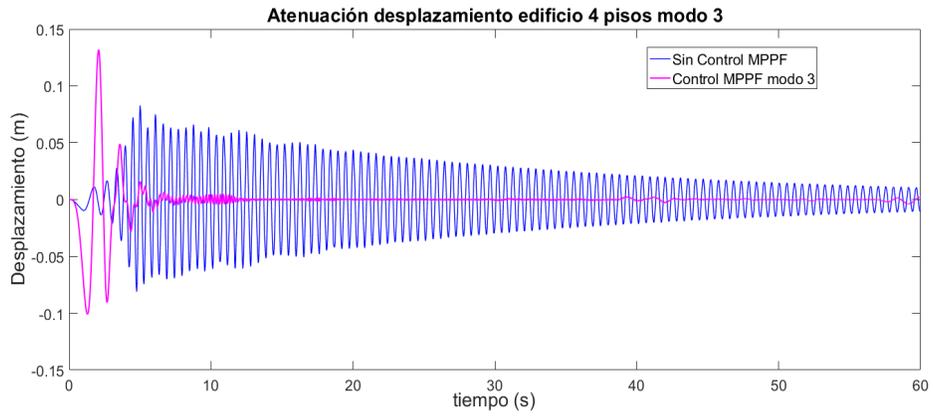


Figura 5.30: Atenuación desplazamiento modo 3 edificio de 4 pisos

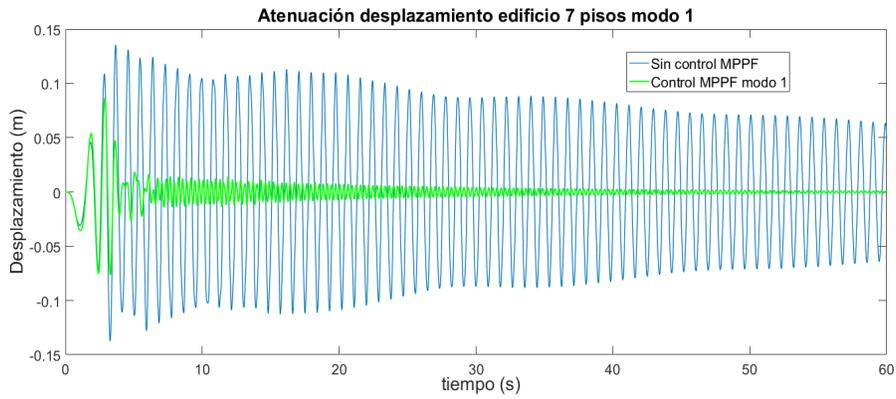


Figura 5.31: Atenuación desplazamiento edificio 7 pisos modo 1 sin control y con control MPPF

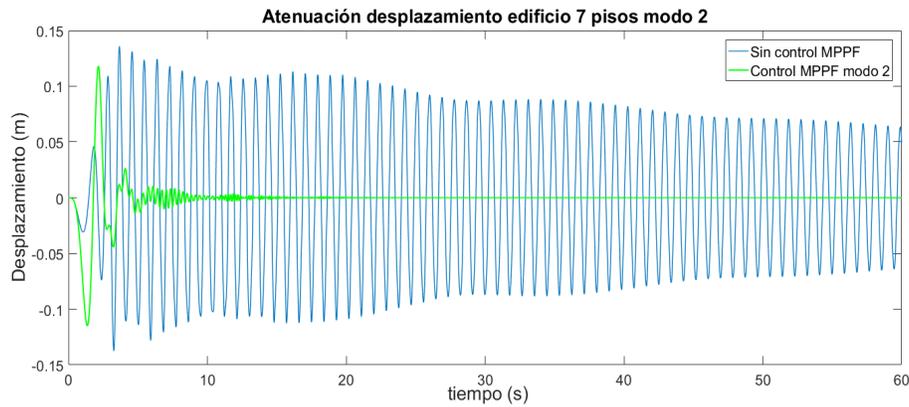


Figura 5.32: Atenuación desplazamiento modo 2 edificio de 7 pisos

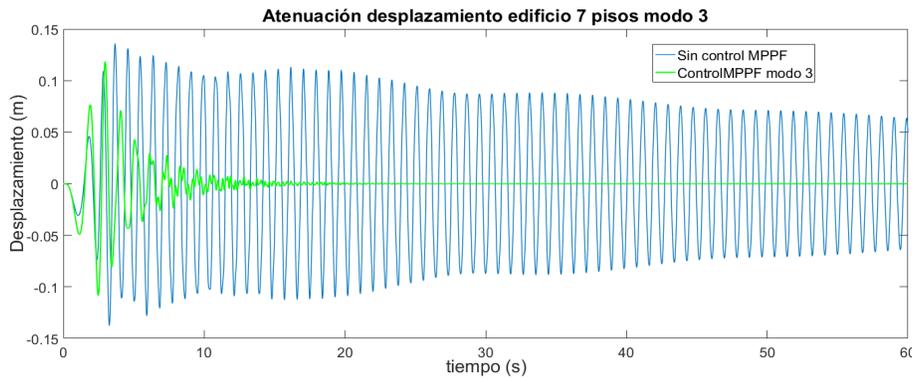


Figura 5.33: Atenuación desplazamiento modo 3 edificio de 7 pisos

El control PPF funciona con desplazamiento sin embargo la atenuación puede ser observada si se comparan las gráficas de respuesta frecuencial sin control y con control, incluso puede ser observada por una disminución en la aceleración, aunque el programa experimental exige el uso de entradas de desplazamiento, lo más adecuado para comparar su funcionalidad es haciendo la función de respuesta de cada estructura y compararlas con las muestras cuando se aplica el control, pues esta grafica debe tener una disminución en su amplitud al ser aplicado el PPF o en este caso el control MPPF.

5.9. Análisis de resultados obtenidos con el barrido frecuencial

Si bien hemos visto que el control MPPF se puede aplicar perfectamente a las estructuras acopladas a lazo cerrado con retroalimentación de manera positiva, se debe corroborar experimentalmente con ayuda de simulink, para ello hacemos el experimento a lazo cerrado con retroalimentación con un voltaje de ganancia del shaker de 1 volt así homologaremos todas las pruebas realizadas con la misma ganancia para comparar de una forma primordial cada uno de los resultados experimentales.

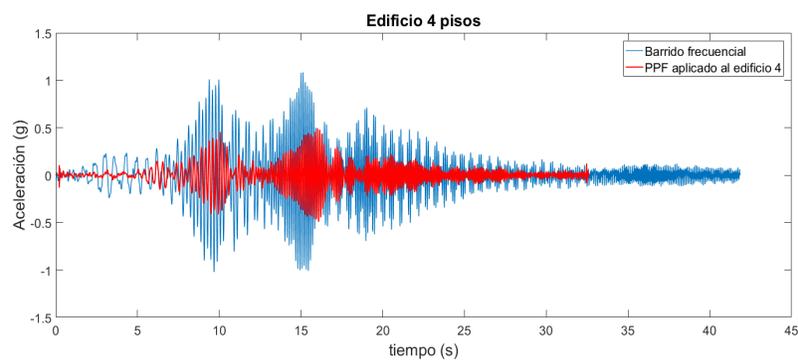


Figura 5.34: Aceleración utilizando MPPF en el edificio de 4 pisos

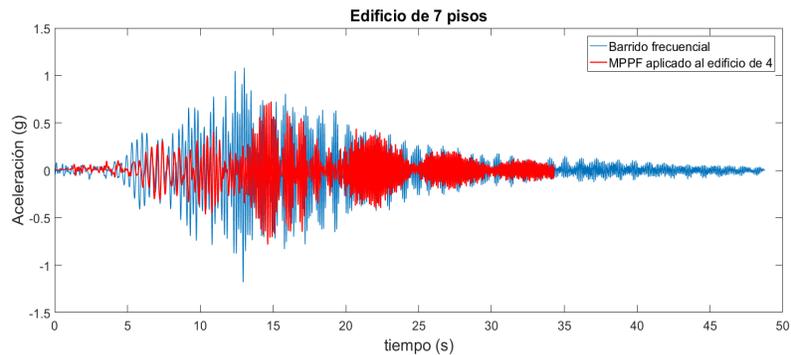


Figura 5.35: Aceleración barrido frecuencial en comparativa con la aceleración del edificio de 7 pisos

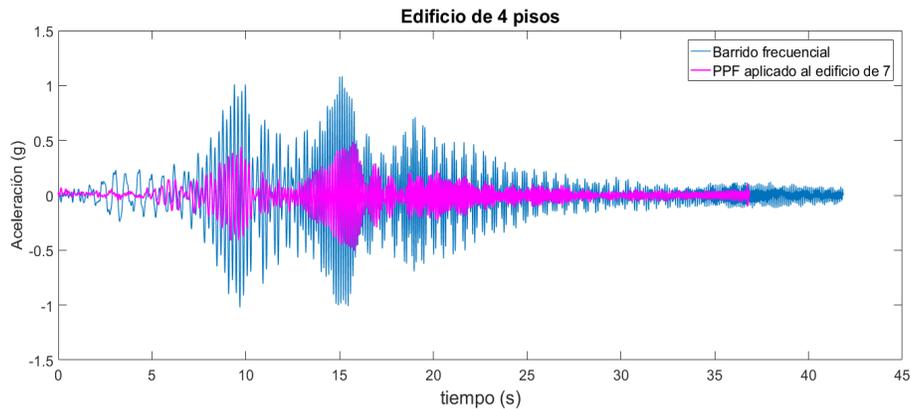


Figura 5.36: Comparativa de aceleración barrido frecuencial sin control, con control MPPF edificio de 4 pisos

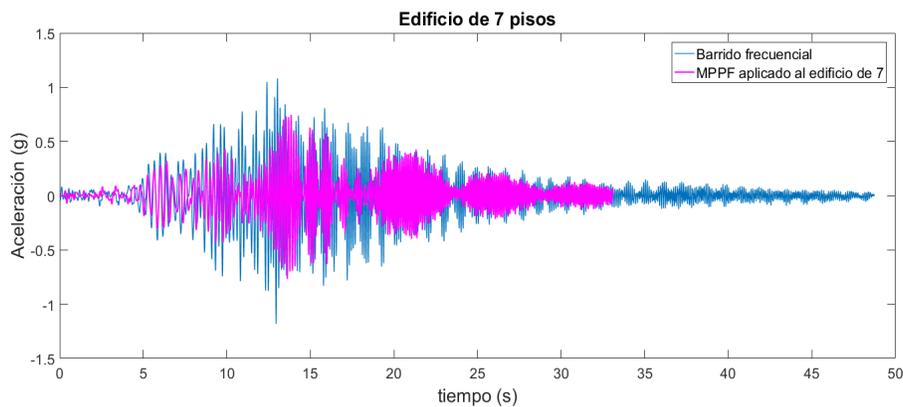


Figura 5.37: Comparativa atenuación de edificio de 7 pisos, sin control y con control MPPF

Existe una pregunta, porque dos gráficas de aceleración aplicadas a cada uno de los edificios, la respuesta es muy simple se usa control MPPF para atenuar la excitación del barrido frecuencial que se aplico de 0 a 30 Hz en un periodo de tiempo de 60 segundos, sin embargo como se miro anteriormente tenemos dos controladores MPPF uno que es aplicado a la estructura de 7 pisos, otro que atenúa específicamente la estructura de 4 pisos, así que cuando se prueba el control MPPF se prueba el que atenúa la estructura de 4 pisos aplicada a los dos edificios acoplados, posteriormente se aplica control MPPF que atenúa la estructura de 7 niveles aplicada con el barrido a ambas estructuras.

Se observa que el edificio de 4 pisos contiene una mejor atenuación cuando se aplica el control MPPF a ambas estructuras, esto se debe a que la entrada de retroalimentación al sistema experimental se sensa por medio del edificio de 4 pisos, por tal motivo la atenuación sera mayor hacia el edificio más pequeño, esto se vera reflejado cuando se hagan las gráficas comparativas de respuesta frecuencial, que se muestran a continuación Fig. 5.38, Fig 5.39, Fig. 5.40, Fig. 5.41

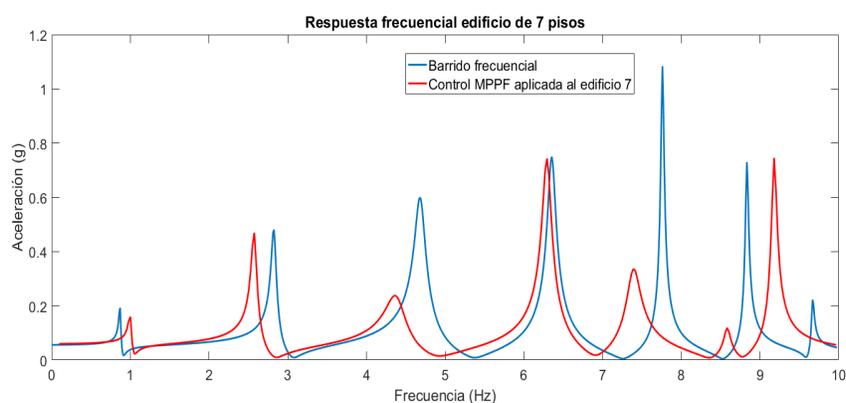


Figura 5.38: Comparativa de atenuación edificio de 7 pisos, al aplicar el barrido sin control y con control MPPF para atenuar el edificio de 7 pisos

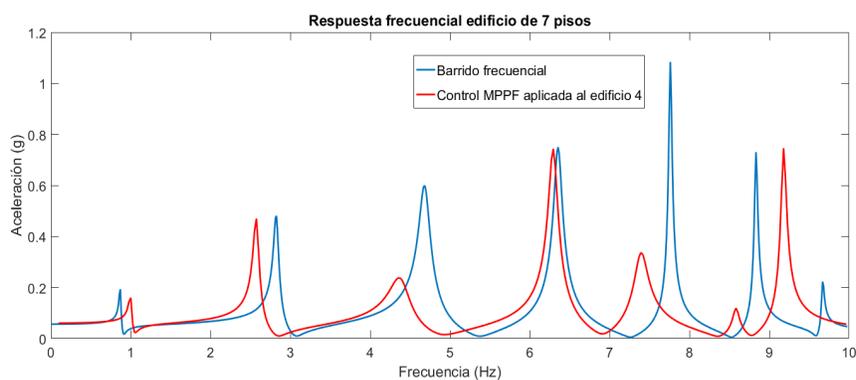


Figura 5.39: Comparativa para el edificio de 7 pisos sin control y con control MPPF para atenuar el edificio de 4 pisos

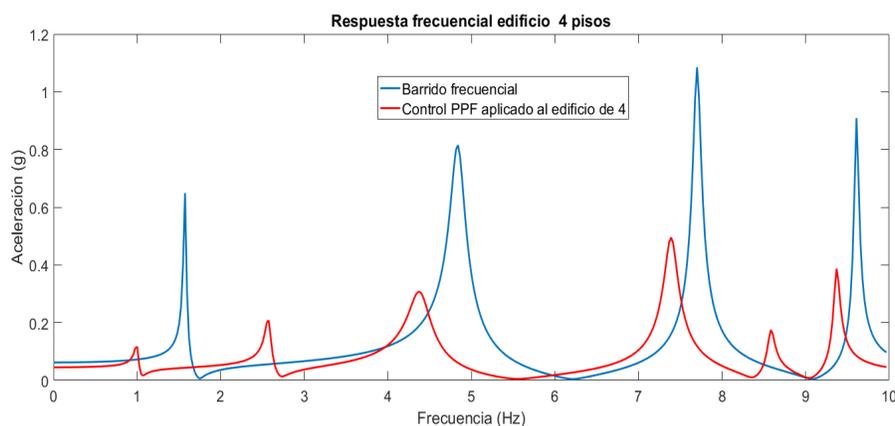


Figura 5.40: Comparativa de barrido frecuencial edificio de 4 pisos sin control y con control MPPF aplicado a atenuar el edificio de 4 pisos

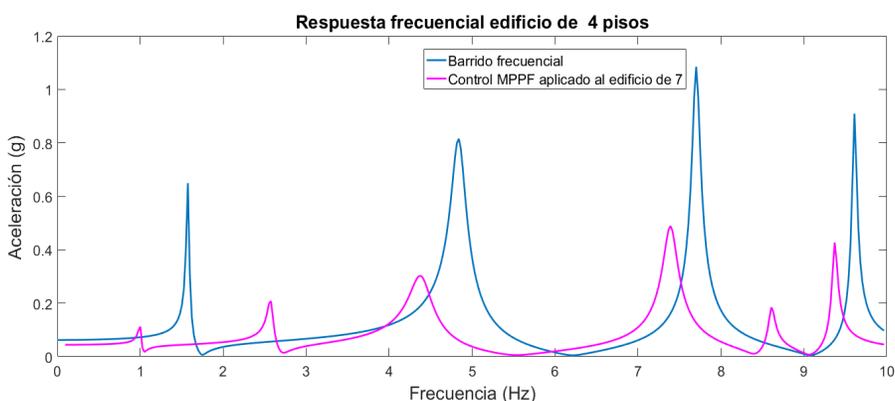


Figura 5.41: Comparativa para el edificio de 4 pisos sin control y aplicando control MPPF para atenuar el edificio de 7 pisos

El control MPPF funciona mejor para la estructura de 4 niveles como se observa en las gráficas, esto al aplicar la retroalimentación en lazo cerrado el desplazamiento que es sentido con el acelerómetro es el del edificio de 4 pisos en el último piso, sin embargo no es muy notorio en el edificio de 7 pisos, recordemos que las pruebas en laboratorio se realizan con un barrido frecuencial el cual excita el shaker, es un ambiente controlado donde la señal del barrido pasa muy rápido por el primer modo de vibración para ambas estructuras, esto provoca que no haya una excitación visual considerable, sin embargo el control MPPF que se aplica al sismo es el mismo puesto que un sismo es una señal de excitación que va de manera errante en intensidad incluso en amplitud, por tal motivo después de terminar de analizar estas pruebas la culminación del trabajo es aplicarlo a una señal real de sismo.

Si bien el control MPPF es de retroalimentación de desplazamiento, debe existir una relación con el amortiguamiento que se inyecta a la estructura pues si la señal del suelo provoca la perturbación sacandola del estado de reposo, al estar acoplada con el amortiguador MR se debe disipar mayor energia proveniente del suelo de forma indirecta, de esta forma compararemos el amortiguamiento que tuvieron las estructuras al realizar el barrido frecuencial de 0 a 30 Hz, comparandolo con una prueba ya con control, además asi homologar con los datos que tenemos anteriormente de forma a lazo abierto y pasivamente para determinar que porcentaje es inyectado en la estructura por todos los métodos que comprendieron este trabajo.

Tabla XXIII Amortiguador MR lazo cerrado edificio de 4 pisos con corriente variable					
Modo	sin control [Hz]	Amortiguamiento ζ	Porcentaje	MR [Hz] PPF4	Amortiguamiento ζ
1	1.5736	0.0099	144 %	1.0014	0.0230
2	4.8394	0.0188	63 %	4.3864	0.0307
3	7.7010	0.0063	79 %	7.3910	0.0113
4	9.6083	0.0028	39 %	9.3699	0.0039

Tabla XXIV Amortiguador MR lazo cerrado edificio de 7 pisos corriente variable					
Modo	Sin control [Hz]	Amortiguamiento ζ	Porcentaje	MR [Hz] PPF4	Amortiguamiento ζ
1	0.8702	0.0137	62 %	1.0014	0.0223
2	2.8253	0.0114	19 %	2.5749	0.0136
3	4.6849	0.0151	109 %	4.3669	0.0316
4	6.3539	0.0084	11 %	6.2943	0.0094
5	7.7606	0.0026	326 %	7.3910	0.0111
6	8.8334	0.0022	81 %	8.6070	0.0040
7	9.6679	0.0017	111 %	9.1792	0.0036

Tabla XXV Amortiguador MR lazo cerrado edificio de 4 pisos con corriente variable					
Modo	Sin control [Hz]	Amortiguamiento ζ	Porcentaje	MR [Hz] PPF7	Amortiguamiento ζ
1	1.5736	0.0099	72 %	1.0014	0.0162
2	4.8394	0.0188	64 %	4.3869	0.0310
3	7.7010	0.0063	92 %	7.3910	0.0121
4	9.6083	0.0028	17 %	9.3699	0.0033

Tabla XXVI Amortiguador MR lazo cerrado edificio de 7 pisos corriente variable					
Modo	Sin control [Hz]	Amortiguamiento ζ	Porcentaje	MR [Hz] PPF7	Amortiguamiento ζ
1	0.8702	0.0137	36 %	1.0014	0.0187
2	2.8253	0.0114	20 %	2.5749	0.0137
3	4.6849	0.0151	97 %	4.3864	0.0298
4	6.3539	0.0084	9 %	6.2943	0.0092
5	7.7606	0.0026	350 %	7.3910	0.0117
6	8.8334	0.0022	113 %	8.5831	0.0047
7	9.6679	0.0017	111 %	9.1792	0.0036

Con la información recabada podemos decir satisfactoriamente que aunque es una consecuencia indirecta el incremento de amortiguamiento, es una forma simple de comparar si la

estructura puede atenuar su amplitud, pues el amortiguamiento es un reflejo de que existe disipación de energía, en lugar de permanecer totalmente rígido y colapsar en un movimiento telúrico como es un sismo, ahora tenemos una forma de comparar el comportamiento con los datos recabados.

Es fácil observar que en lazo cerrado, sintonizando se puede llegar a una muy buena atenuación, incluso se podría pensar si con lazo abierto se tiene ya un buen resultado, porque cerrar el lazo y retroalimentar, hacer un control que se sintoniza requiere mucho trabajo computacional, la respuesta es muy simple, con el control a lazo cerrado retroalimentamos, esto es sensamos en tiempo real el movimiento que tienen los edificios acoplados en vez de permanecer con una rigidez constante el acoplamiento, como se hizo con lazo abierto y pasivamente con el resorte y la barra rígida; sin embargo al usar el control MPPF, pueden atenuarse tantos modos como se requieran, como las estructuras lo vayan pidiendo, podríamos enfocarnos solo en el primer modo, seguramente sintonizando solo este modo se hubiese tenido una muy buena atenuación, dejando al lado los otros modos que aunque en menor periodo de tiempo, con menor fuerza también son excitados por un movimiento sísmico, por ello se propuso atenuar los tres primeros modos de cada estructura, así se garantiza un mayor éxito en el momento de atenuar este movimiento; se ve reflejado en los datos obtenidos; cuando se aplica la retroalimentación usando un control MPPF, aplicando la atenuación al edificio más pequeño obtenemos mejores resultados, inyectando una cantidad de amortiguamiento de 144 % a la estructura de 4 pisos y un 62 % para la estructura de 7 pisos, son muy buenos resultados.

Cuando utilizamos el control MPPF atenuando las frecuencias del edificio de 7 pisos también obtenemos buenos resultados inyectando un 72 % más de amortiguamiento a la estructura más pequeña y un 36 % al edificio de 7 pisos a escala, además de atenuar positivamente los otros modos de vibración que afectan a ambas estructuras.

5.10. Aplicación de control MPPF a los sismos del 19 de septiembre.

La culminación del trabajo es atenuar algo que no sea con una magnitud constante, las pruebas en laboratorio en un ambiente controlado como es la ganancia o el voltaje de la misma magnitud para todas las pruebas en el caso de algo real como un sismo no es posible, hasta el momento no se puede controlar la magnitud de un sismo o un terremoto es impredecible cuando ocurrirá, o en que tiempo exacto, por ello solo se cuenta con pocos segundos para protegerse en el caso de que esto ocurra, ya que no se puede controlar el sismo, quizás si hubiese una mejor manera de evitar que un edificio colapse, podríamos proteger vidas, si las estructuras resistieran, garantizando la integridad de sus ocupantes, por ello se prueba el sismo en los edificios a escala, debemos obtener una atenuación, que garantice que la estructura no colapsara, que es segura, que no tendrá daños considerables, por lo tanto se proba el MPPF en la muestra tomada del Centro Cultural Universitario Tlatelolco Campo Libre (CCCL) ocurrido en 2017 y en el sismo tomado en el Sistema de Comunicaciones y Transportes (SCT) tomada en 1985.

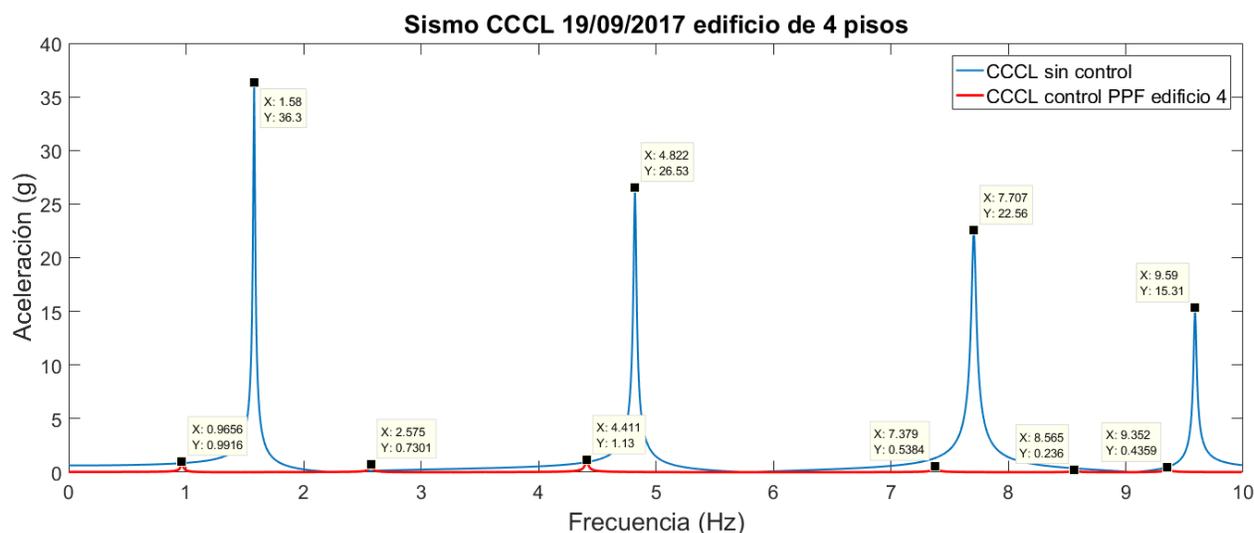
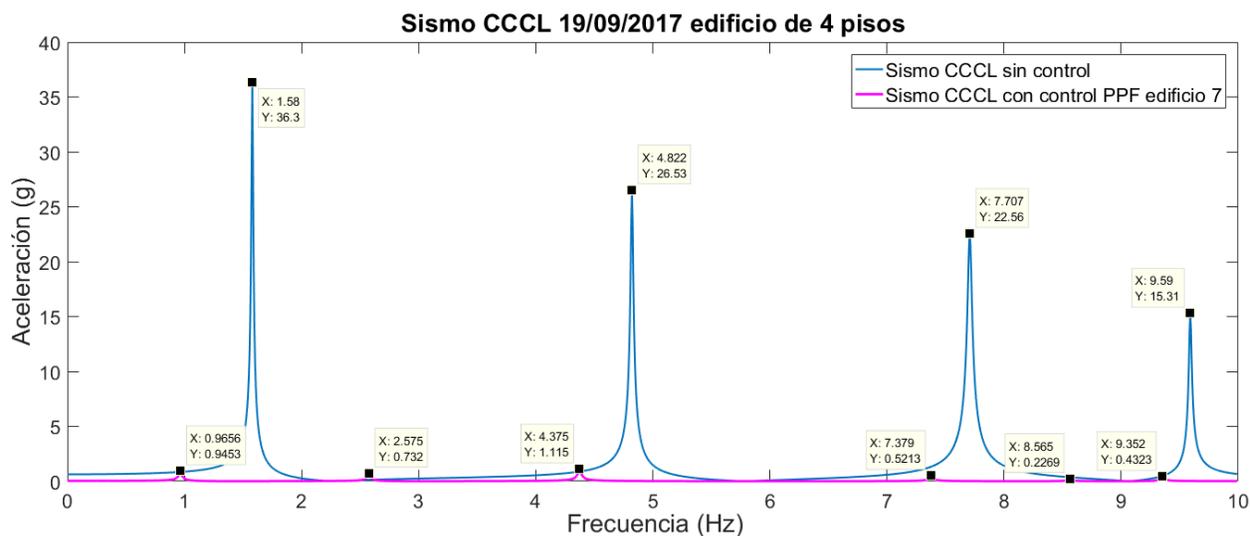
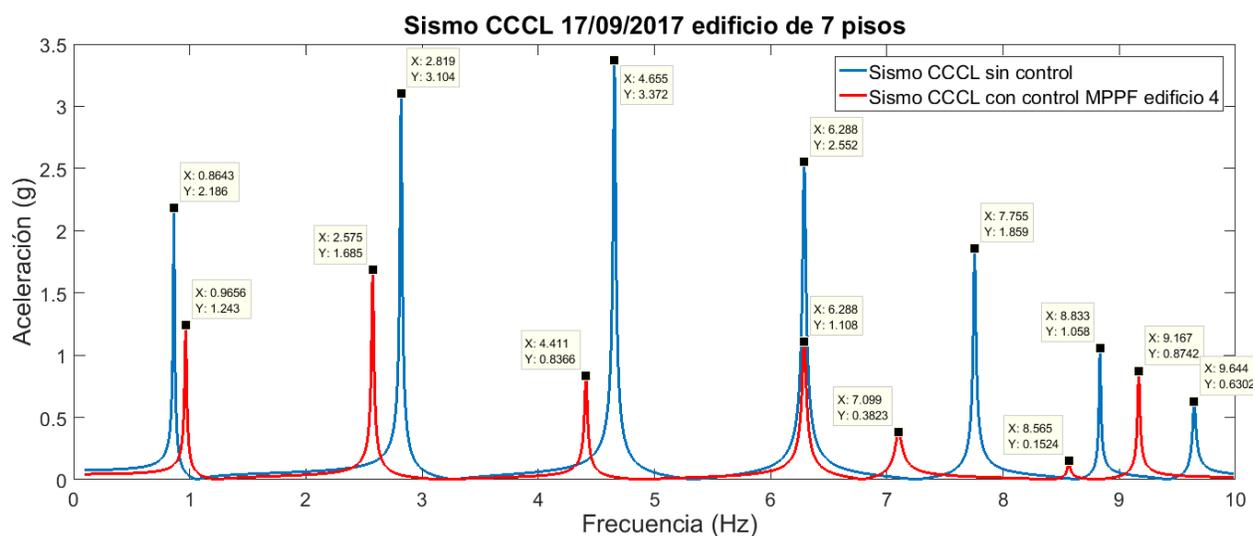


Figura 5.42: Comparativa sismo CCCL ocurrido en 2017 para el edificio de 4 pisos sin control y con control MPPF sintonizado para atenuar el edificio de 4 pisos



Comparativa sismo CCCL ocurrido en 2017 para el edificio de 4 pisos sin control y con control MPPF sintonizado para atenuar el edificio de 7 pisos.



Comparativa sismo CCCL ocurrido en 2017, para el edificio de 7 pisos sin control y con control MPPF aplicada para atenuar el edificio de 4 pisos.

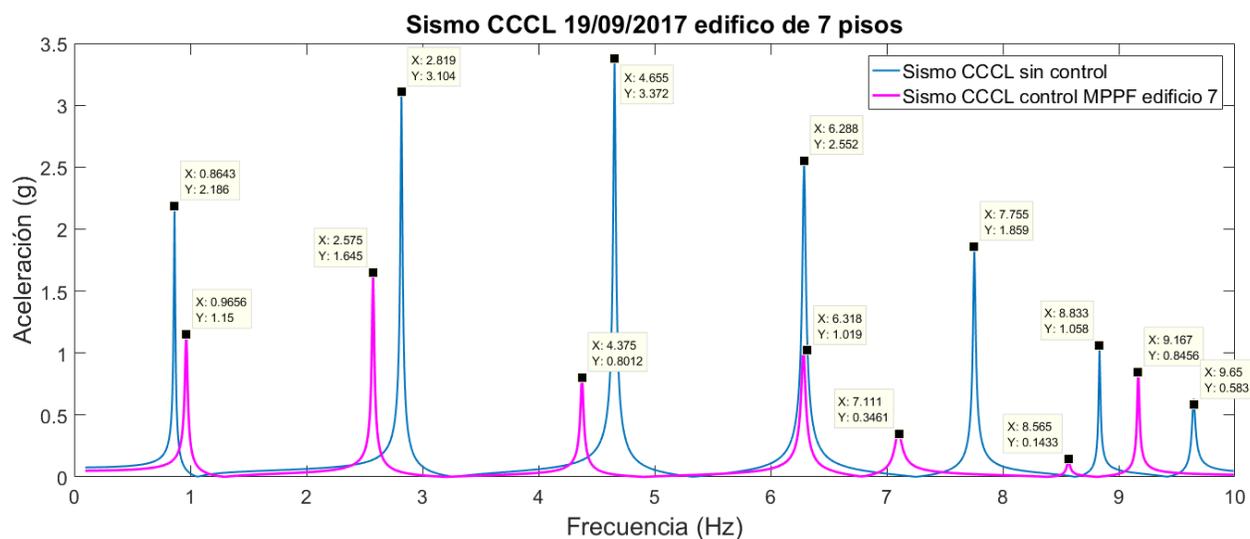


Figura 5.43: Comparativa sismo CCCL ocurrido en 2017 aplicado al edificio de 7 pisos, sin control y con control MPPF para atenuar el edificio de 7 pisos

Al analizar la magnitud de cada una de las graficas Fig. 5.42 Fig. 5.43, podemos determinar que la atenuación en el primer modo para el sismo Centro Cultural Universitario Campo Libre cuando se aplica MPPF para la Fig. 5.42 la atenuación es del 97.27%; para la Fig. 5.10 es del 97.4%; para la Fig. 5.10 la atenuación es del 44% mientras que para la Fig. 5.43 es del 48%, es la tenuación del primer modo para el sismo que ocurrió el 19 de septiembre de 2017.

Analizando la atenuación del sismo ocurrido en el sistema de comunicaciones y transportes en 1985 tenemos que para la Fig. 5.44 presenta una atenuación del 98.78%; para la Fig. 5.45 una atenuación del 98.88%, mientras que la Fig. 5.46 tenemos una atenuación del 36%; para la Fig. 5.47 tenemos una atenuación del 41.78%; si bien para todos los casos no pudimos desaparecer completamente la amplitud obtuvimos resultados bastante favorables en el momento de utilizar el MPPF en los edificios acoplados usando el amortiguador MR; como resultado de este trabajo es un dispositivo que en combinación con el control adecuado ofrece una excelente protección en el momento de un terremoto como los ocurridos en la Ciudad de Mexico.

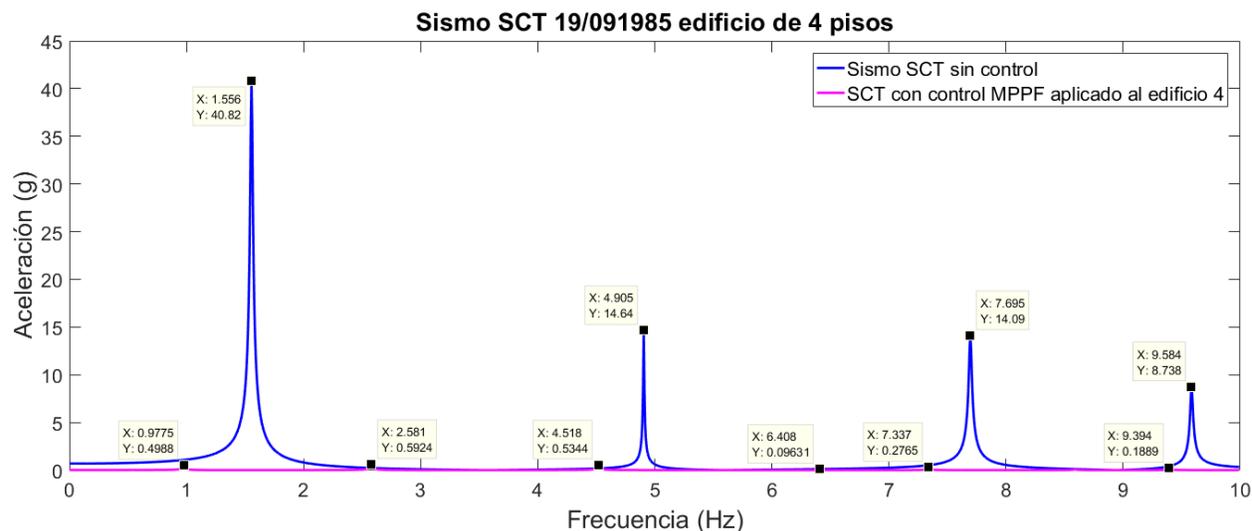


Figura 5.44: Comparativa sismo SCT ocurrido en 1985 aplicado al edificio de 4 pisos, sin control y con control MPPF para atenuar el edificio de 4 pisos

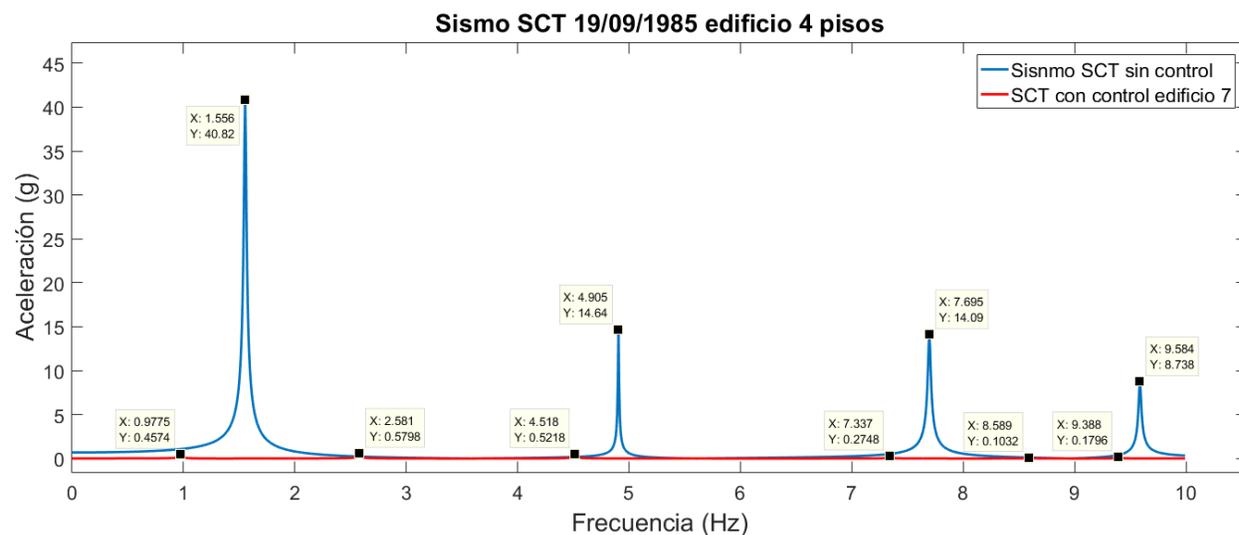


Figura 5.45: Comparativa sismo SCT para el edificio de 4 pisos, sin control y con control MPPF para atenuar el edificio de 7 pisos

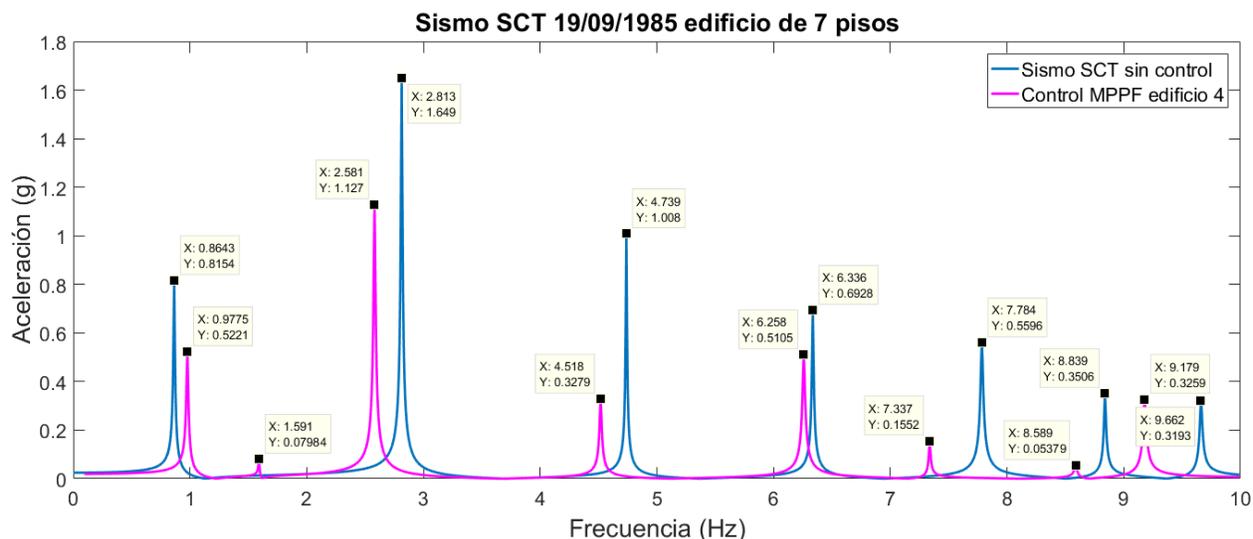


Figura 5.46: Comparativa sismo SCT ocurrido en 1985 aplicado al edificio de 7 pisos, sin control y con control MPPF sintonizado para atenuar el edificio de 4 pisos

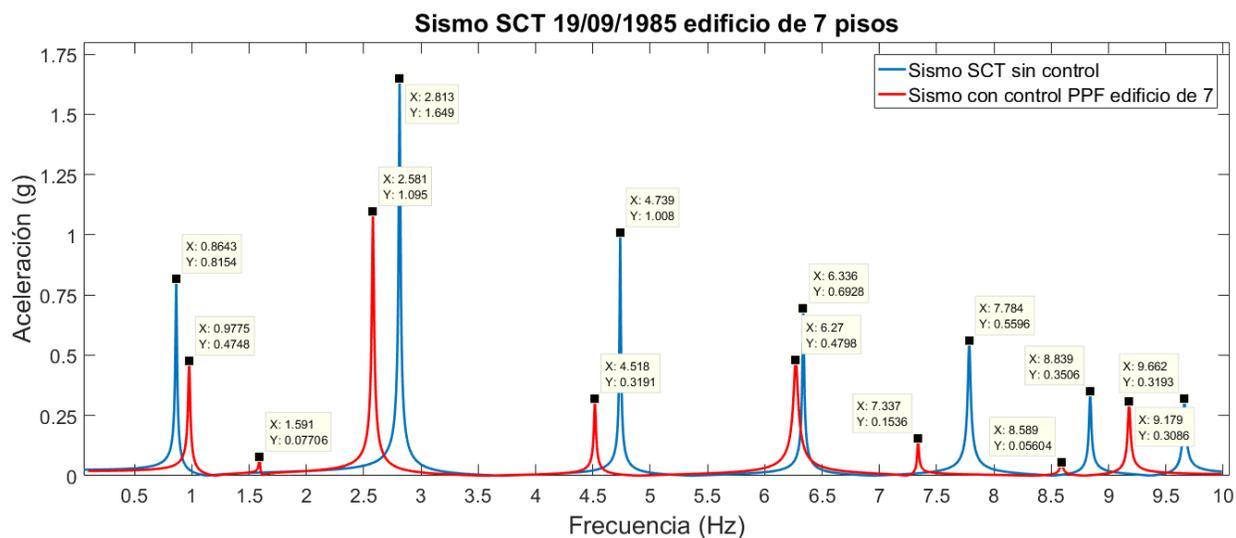


Figura 5.47: Comparativa sismo SCT ocurrido 1985 aplicado al edificio de 7 pisos, sin control y con control MPPF sintonizado para atenuar el edificio de 7 pisos

Capítulo 6

Conclusiones

Los resultados obtenidos fueron muy consistentes, mostrando como se atenúa la respuesta frecuencial de las estructuras tipo edificio con acoplamiento lateral, usando un barrido frecuencial de 0 a 30 Hz y amplitud de la excitación similar en todas las pruebas. En resumen, el trabajo se sintetizar en una tabla general donde se comparan los métodos aplicados experimentalmente:

Tabla XXVII Acoplamiento pasivo atenuación del primer modo dominante		
Acoplamiento	Edificio 4 pisos	Edificio 7 pisos
Resorte	22 %	-20 %
Barra rígida	-2 %	146 %

Tabla XXVIII Acoplamiento con amortiguador MR (lazo abierto): atenuación del primer modo dominante		
Acoplamiento	Edificio 4 pisos	Edificio de 7 pisos
MR 0 A	55 %	38 %
MR 0.1 A	111 %	99 %
MR 0.3 A	74 %	51 %

Tabla XXIX Acoplamiento semiactivo (lazo cerrado): atenuación del primer modo dominante		
Acoplamiento	Edificio 4 pisos	Edificio de 7 pisos
MR MPPF4	144 %	62 %
MR MPPF7	72 %	36 %

Resulta claro que las mejores atenuaciones ocurren cuando se aplica una corriente constante de 0.1 A al amortiguador MR y cuando se aplica el esquema de control semiactivo por Múltiple Retroalimentación Positiva de Posición MPPF, con un sorprendente incremento del amortiguamiento en el sistema de edificios acoplados. Sin embargo, con todos los resultados obtenidos se puede concluir que el desempeño dinámico se logra con el control semiactivo por Múltiple Retroalimentación Positiva de Posición, pues no solo incrementa el amortiguamiento en ambas estructuras de 4 y 7 pisos, en su primer modo de vibración, sino que incrementa

positivamente todos los modos de vibración para los que se diseñó y sintonizó un controlador, lo cual se refleja apropiadamente en todos los modos de la estructura acoplada. Por el contrario, al usar el acoplamiento pasivo solo garantizamos que el primer modo se proteja, parcialmente, modificando la respuesta frecuencial, aunque se excitan los demás modos de vibración y no se ofrece la misma capacidad de amortiguamiento o disipación de energía.

Al pasar del análisis de las estructuras en el laboratorio, se concluyó que la aplicación del esquema de control semiactivo con el amortiguador MR y controladores por Múltiple Retroalimentación Positiva de Posición puede atenuar la respuesta vibratoria ante la excitación en suelo, siendo no solo para el caso de barrido frecuencial, sino en casos reales con excitación sísmica de los registros ocurridos en los sismos en la Ciudad de México durante el 19 de septiembre de los años 1985 y 2017. Al analizar las muestras de los sismos, en estos importantes acontecimientos, se propone el uso de los amortiguadores MR como un medio capaz de atenuarlos en estructuras tipo edificio, empleando no como es costumbre costosos amortiguadores electrohidráulicos en la base o marco estructural y la aplicación de esquemas de control activo, que requieren de mucha energía y fuentes ininterrumpibles para asegurar su disponibilidad durante las catástrofes naturales. Los amortiguadores MR permiten atenuar una gran cantidad de energía con un gasto pequeño, tanto en los dispositivos como en las fuentes de energía empleadas. En particular, con el equipo disponible en el laboratorio, el generador electromagnético de vibraciones o shaker puede incrementar su potencia hasta 1000 W, mientras que el dispositivo MR puede atenuar esa potencia con un consumo energético que no implica más de 2.5 W, situación importante porque cuando ocurren los sismos es común que se corte la energía eléctrica.

Para finalizar, se reporta que, utilizando el control semiactivo por Múltiple Retroalimentación Positiva de la Posición (MPPF) para el caso del sismo ocurrido en el Centro Cultural Universitario Tlatelolco Campo Libre (CCCL) en el año 2017, se pudo atenuar hasta un 98 % la respuesta en el edificio de 4 pisos y un 48 % la respuesta del edificio de 7 pisos, utilizando este equipo. Para la atenuación del sismo ocurrido en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en el año 1985, se pudo atenuar la respuesta hasta un 98 % en el edificio de 4 pisos y hasta de un 41 % en la estructura de 7 pisos, que son resultados bastante favorables, utilizando el control semiactivo, demostrando que puede ser utilizado para proteger estructuras civiles tipo edificio de manera favorable, salvaguardando lo más importante que es la vida de quienes habitan en ellos.

Como trabajo futuro hay muchos problemas por analizar, verificar, evaluar y comparar, tanto con la aplicación de otros esquemas de control más factibles de emplear en casos a escala real, con modelos 3D que consideren las vibraciones laterales y torsionales, con excitación en la base en distintas direcciones e incluso con efectos torsionales.

Bibliografía

- [1] A. Hernández-Flores, Acoplamiento lateral de estructuras tipo edificio con excitación en la base. Tesis de Maestría del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica. México, CDMX, Diciembre 2014.
- [2] L.G. Trujillo Franco. Evaluación experimental de técnicas de identificación de parámetros modales en sistemas mecánicos. Tesis de Maestría del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica, Sección de Mecatrónica. México, CDMX, Noviembre 2012.
- [3] A. Cabrera-Amado, Diseño, construcción y control semiactivo del desbalance de un sistema rotor-chumacera utilizando amortiguadores magnetoreológicos. Tesis de Maestría del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica. México, CDMX, Marzo 2007.
- [4] H. Amador-Garrido, Absorción semi-activa y activa de vibraciones utilizando actuadores magnetoreológicos. Tesis de Maestría del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica. México, CDMX, Septiembre 2004.
- [5] A. Cabrera-Amado, Compensación semiactiva del desbalance en un sistema rotor-chumacera utilizando amortiguadores magnetoreológicos. Tesis de Doctorado del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica. México, CDMX, Julio 2011.
- [6] M. E. Belandria Carvajal, Aplicación de esquemas de control activo de vibraciones por retroalimentación positiva de posición en una viga tipo Euler-Bernoulli con parches pizoléctricos. Tesis de Maestría del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica. México, CDMX, Noviembre 2013.
- [7] G. Silva-Navarro, A. Hernández-Flores. On the passive and active lateral coupling of building-like structures under ground motion, Proceedings of the 22th International Congress on Sound and Vibration (ICSV22), The International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV), pp. 1-8, Florence, Italy, July 12-16, 2015.

- [8] S.B. Choi, S.K. Lee and Y. Park. A hysteresis model for the field-dependent damping force a magnetorheological damper, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 245, No.2, pp.375-383, 2001.
- [9] R. E. Christensen, *Semiaactive control of civil structures for natural hazard mitigation: analytical and experimental studies*, PHD disertation. University of Notre Dame, Notre DameIndiana, EUA, 2001.
- [10] L. B. Ugarte-Lucuy, *Estudio de sistemas de control semiactivo en estructuras acopladas*. Tesis de Maestria de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapozalco, Posgrado en Ingeniería Estructural. México, CDMX Julio 2011.
- [11] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures*, Prentice-Hall, 1995. 22-39
- [12] Gawronski, W.K., *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*, Springer-Verlag, NY, 2002.
- [13] Preumont, A., and Seto, K., *Active Control of Structures*, John Wiley and Sons, Cornwall, UK, 2008.
- [14] De Silva, C.W., *Vibration: Fundamentals and Practice*. CRC Press, Boca Raton, FL 2000.
- [15] M. Rios-Gutierrez, and G. Silva-Navarro, *Active vibration control in building-like structures using piezoelectric actuators and positive acceleration feedback*, *Dyna*, 80(179), Medellin, Colombia, 116-125, (2013).
- [16] G. Silva-Navarro and A. Hernandez-Flores, *On The Passive and Active Lateral Coupling of Building-Like Structures Under Ground Motion*, The 22nd International Congress of Sound and Vibration, Florence, Italy, 2015.
- [17] CJ Goh and TK Caughey. *On the stability problem caused by finite actuator dynamics in the collocated control of large space structures*. *International Journal of Control*, 41(3):787-802, 1985.
- [18] O. A. García Pérez, *Control activo de vibraciones en estructuras flexibles tipo grúa*. Tesis de Doctorado del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica, Sección Mecatrónica. México, CDMX, Junio 2019.
- [19] J.P. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill, NY, 1934
- [20] M.P. Cartmell, J. Lawson, *Performance enhancement of an autoparametric vibration absorber*, *Journal of Sound an Vibration*, Vol.177, No.2, pp. 173-195, 1994.
- [21] M.P. Cartmell, *Introduction to Linear, Parametric and Nonlinear Vibrations*. Chapman and Hall, London (1990).

- [22] Friswell, M. I., and Inman, D. J. The relationship between positive position feedback and output feedback controllers. *Smart Materials and Structures* 8, 3 (June 1999), 285-291.
- [23] C.W. De Silva, *Vibration: Fundamentals and Practice*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2000.
- [24] C.W. De Silva, *Vibration and Shock Handbook*. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 2005.
- [25] A.D. Dimarogonas, *Vibration for Engineers*, Prentice Hall, 2a ed., New York, 1995.
- [26] Dosh, J., Leo, D., and Inman, D. Modeling and control for vibration suppression of a flexible active structure. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 18, 2 (1995), 340{346.
- [27] C.M. Harris, *Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill, NY, 1996.
- [28] D.J. Inman, *Vibration with Control*. John Wiley & Sons, Ltd. Academic Press, England, 2006.
- [29] Baz, A., and Hong, J. Adaptive control of flexible structures using modal positive position feedback. *International Journal of Adaptive Control and Signal* 11, 3 (1997), 231-253.
- [30] Hu, Q., Xie, L., and Gao, H. Adaptive variable structure and active vibration reduction for flexible spacecraft under input nonlinearity. *Journal of Vibration and Control* 13, 11 (2007), 1573-1602.
- [31] L. Meirovitch, *Elements of Vibration Analysis*, Mc Graw Hill, 1986.
- [32] Mahmoodi, S., Ahmadian, M., and Inman, D. Adaptive modified positive position feedback for active vibration control of structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 21 (2010), 571-579.
- [33] Baz, A., and Poh, S. Optimal vibration control with modal positive position feedback. *Optimal Control Applications and Methods* 17 (1996), 141{149.
- [34] S.S. Rao. *Mechanical Vibrations*. Addison-Wesley, 3rd edition, NY, 1995.
- [35] G. Silva-Navarro, *Notas del Curso de Mecánica Computacional*, Sección de Mecatrónica, CINVESTAV-IPN, México, D.F. 2010.
- [36] G. Silva-Navarro, L. Macias-Cundapi and B. Vazquez-Gonzalez, Design of a Passive/Active Autoparametric Pendulum Absorber for Damped Duffing Systems. In: *New Trends in Electrical Engineering, Automatic Control, Computing and Communication Science*, Edited by C.A. Coello, A. Pozniak, J.A. Moreno and V. Azhmyakov, pp. 159-175, Logos Verlag Berlin GmbH, Germany, 2010.

- [37] G. Silva-Navarro, H.F. Abundis-Fong, B. Vázquez-González. Synthesis of a Passive/Active Autoparametric Cantilever Beam Absorber with PZT Actuator for Duffing Systems. *Proceedings of the 18th International Congress on Sound and Vibration (ICSV18), The International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV)*, Rio de Janeiro, Brasil, July 10-14, 2011.
- [38] G. Silva-Navarro, H.F. Abundis-Fong, B. Vázquez-González. Design of a Passive/Active Autoparametric Cantilever Beam Absorber with PZT Actuator for Duffing Systems. *Proceedings of the 2011 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE2011)*, Mérida, Yucatán, México. October 26-28, 2011.
- [39] A.Tondl, T. Ruijgrok, F. Verhulst, R. Nabergoj, *Autoparametric Resonance in Mechanical Systems*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [40] L. B. Ugarte-Lucuy, M. Euripides-Ruiz, Sandoval-Hernandez, B. F. Spencer. Estudio de Sistemas de Control Semiaactivo en Edificios Acoplados. Concreto y cemento. Investigación y desarrollo. Vol. 4, Núm. 1, Pág. 18-39, julio-diciembre de 2012.
- [41] Spencer, B.F., Jr., and Sain, M.K. (1997), Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback, *IEEE Control Systems Magazine: Special Issue on Emerging Technologies (Tariq Samad Guest Ed.)*, 17 (6), 19-35.
- [42] Housner W.; Bergman L. A.; Caughey T. K.; Chassiakos A. G.; Claus R. O.; Masri S. F.; Skelton R. E.; Soong T. T.; Spencer B. F.; Yao J. T. P., "Structural control: past, present, and future", en *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 9, © ASCE, Paper No. 15617, 1997.
- [43] H. Sira-Ramirez, *Notas del Curso Modelado de sistemas dinámicos*, Sección de Mecatrónica, CINVESTAV-IPN, México, D.F. 2010.
- [44] Lord Corporation, NC, USA. <https://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/industrial-suspension-systems/magneto-rheological-mr-fluid>
- [45] NASA, https://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2003/02apr_robotblood
- [46] <https://www.lord.com/latam/content/sistemas-de-suspension-automotriz>
- [47] Los datos sísmicos fueron proporcionados por la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM), producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica. Los datos son distribuidos a través del Sistema de Base de Datos Acelerográficos en web: <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>
- [48] Kistler, <https://www.kistler.com/es/producto/type-8770a/>
- [49] Servicio Sismológico Nacional, <http://www.ssn.unam.mx/>

Apéndice A

Publicaciones

El siguiente artículo fue publicado con resultados desarrollados en el presente trabajo de tesis:

1. I. Garcia-Trinidad, G. Silva-Navarro. On the Semi-Active Lateral Control of Two Building-Like Structures. *Proceedings of the 2019 16th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, IEEE, pp. 1-6, Mexico City, Mexico, September 11-13, 2019. ISSN: 2642-3774, eISSN: 2642-3766, ISBN: 978-1-7281-4840-3, DOI: 10.1109/ICEEE.2019.8884500