



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**UNIDAD ZACATENCO
DEPARTAMENTO CONTROL AUTOMÁTICO**

**"Modelado y control PID-difuso de una estructura de edificio sometida a
las vibraciones de un temblor"**

Tesis que presenta

Ing. Mónica Adriana González Padilla

Para Obtener el Grado de

Maestra en Ciencias

En la Especialidad de

Control Automático

Director de la Tesis:

Dr. Wen Yu Liu

México, Distrito Federal

Enero, 2012

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Objetivos	2
1.3. Justificación	3
1.4. Contribuciones	4
1.5. Organización de la tesis	4
2. Ingeniería Sísmica	7
2.1. Movimientos sísmicos del terreno	9
2.1.1. Ondas de cuerpo	9
2.1.2. Ondas superficiales	10
2.2. Sismicidad	11
3. Control de estructuras	15
3.1. Control pasivo	15
3.2. Control activo	16
3.3. Control híbrido	17
3.4. Control semi-activo	17
3.4.1. Actuadores de control estructural	18
3.5. Amortiguador de fluido magneteorológico (MR)	19
3.6. Configuraciones del amortiguador magneteorológico (MR)	22

3.7. Esquema de control	22
4. Modelado de un edificio sujeto a las vibraciones de un temblor	25
4.1. Modelo de un edificio sujeto a un terremoto	25
4.1.1. Modelo de un edificio de un sólo piso	25
4.1.2. Modelo de un edificio de “ n ” pisos	27
4.1.3. Variaciones del modelo	32
4.2. Modelo de un amortiguador magneteorológico (MR)	38
4.2.1. Modelos paramétricos	39
4.2.2. Modelos no paramétricos	46
4.3. Modelo de un edificio de cinco pisos con amortiguador magneteorológico (MR)	47
4.4. Simulación	51
4.4.1. Edificio de cinco pisos	51
4.4.2. Modelo del amortiguador magneteorológico (MR)	55
5. Control PID-difuso para una estructura de edificio contra vibraciones sísmicas	61
5.1. Controlador PID	61
5.2. Controlador difuso	62
5.3. Controlador PID-difuso	69
5.4. Simulaciones	76
6. Conclusiones	85
6.1. Trabajo Futuro	87

Índice de figuras

1.1. Distribución de las placas tectónicas en el mundo	2
1.2. Diagrama del sistema de control	4
2.1. Ondas P y Ondas S	9
2.2. Ondas R y Ondas L	11
2.3. Acelerograma del terremoto de Kermadec	11
2.4. Zonas sísmicas activas en el mundo	12
2.5. Microzonificación de la Ciudad de México	14
3.1. Esquema de un amortiguador MR	21
3.2. Esquema de control para el primer, tercer y quinto pisos	23
4.1. Sistema masa-resorte-amortiguador	26
4.2. Múltiples sistemas de masa-resorte-amortiguador	28
4.3. Respuesta típica de fuerza-velocidad y fuerza-desplazamiento de un amortiguador MR	39
4.4. Diagrama del modelo Bingham	40
4.5. Relación fuerza-desplazamiento y relación fuerza-velocidad obtenida con el modelo Bingham	41
4.6. Diagrama del modelo Bouc-Wen	42
4.7. Relación fuerza-desplazamiento y fuerza-velocidad obtenida con el modelo Bouc-Wen	43

4.8. Diagrama del modelo Bouc-Wen modificado	43
4.9. Relación fuerza-desplazamiento y fuerza-velocidad obtenida con el modelo Bouc-Wen modificado	45
4.10. Relación fuerza-desplazamiento y fuerza-velocidad obtenidas de forma exper- imental y con el modelo Bouc-Wen modificado	46
4.11. Respuesta del primer edificio a entrada cuadrada	53
4.12. Respuesta del primer edificio a una entrada senoidal	53
4.13. Respuesta del segundo edificio a entrada cuadrada	54
4.14. Respuesta del segundo edificio a entrada senoidal	55
4.15. Voltaje y desplazamiento aplicado al amortiguador MR en la primera prueba.	57
4.16. Fuerza proporcionada por el amortiguador MR en la primera prueba	57
4.17. Relación Fuerza-Desplazamiento y Fuerza-Velocidad de la primera prueba. .	58
4.18. Voltaje y desplazamiento aplicados al amortiguador MR en la segunda prueba	58
4.19. Fuerza proporcionada por el amortiguador MR en la segunda prueba	59
4.20. Relación Fuerza contra Desplazamiento y Fuerza contra Velocidad en la se- gunda prueba.	59
5.1. Esquema de la estructura de un controlador difuso.	69
5.2. Controlador PID-difuso como controlador PD-difuso y controlador PI-difuso en paralelo	70
5.3. Diagrama de un controlador PD-difuso	70
5.4. Diagrama de un controlador PI-difuso	71
5.5. Diagrama de un controlador PI-difuso alterno	71
5.6. Funciones de membresía de las entradas del controlador PD-difuso	72
5.7. Funciones de membresía de las entradas del controlador PI-difuso	73
5.8. Funciones de membresía de la salida de ambos controladores	73
5.9. Activación de reglas para el controlador PD-difuso	75
5.10. Activación de reglas para el controlador PI-difuso	75
5.11. Superficies de control del PID-difuso	76

5.12. Terremoto El Centro y Desplazamiento de los 5 pisos sin control	77
5.13. Desplazamiento de los 5 pisos con amortiguador MR en el piso 1	77
5.14. Error en el desplazamiento, voltaje aplicado al amortiguador MR y fuerza proporcionada por el amortiguador MR con amortiguador MR en el piso 1 .	78
5.15. Desplazamiento de los 5 pisos con amortiguador MR en el piso 3	79
5.16. Error en el desplazamiento, voltaje aplicado al amortiguador MR y fuerza proporcionada por el amortiguador MR con amortiguador MR en el piso 3 .	79
5.17. Desplazamiento de los 5 pisos con amortiguador MR en el piso 5	80
5.18. Error en el desplazamiento, voltaje aplicado al amortiguador MR y fuerza proporcionada por el amortiguador MR con amortiguador MR en el piso 5 .	80
5.19. Desplazamiento del piso 1 cuando se coloca el amortiguador MR en el primer, tercer y quinto pisos	81
5.20. Desplazamiento del piso 3 cuando se coloca el amortiguador MR en el primer, tercer y quinto pisos	81
5.21. Desplazamiento del piso 5 cuando se coloca el amortiguador MR en el primer, tercer y quinto pisos	82
5.22. Desplazamiento de los cinco pisos con controlador difuso	84

Capítulo 1

Introducción

La mayoría de los terremotos tiene lugar a lo largo de las fronteras de las placas tectónicas, cuya distribución en el mundo se muestra en la Figura 1.1. México es un país altamente sísmico debido a que su Costa del Pacífico está en el borde de una zona de subducción entre la placa de Cocos y la placa de Norteamérica. Este tramo de subducción pertenece a un gran arco conocido como Cinturón Circumpacífico. También se presentan otros sismos significativos en algunas otras áreas en las que se destacan Baja California Norte, Sonora y el Istmo de Tehuantepec [6].

El Valle de México está lejos de la Costa del Pacífico donde se generan los sismos de gran magnitud por lo que está en una región de peligro sísmico moderado. Sin embargo, existen ciertas condiciones geológicas particulares que amplifican las ondas sísmicas en toda la región. Las ondas sísmicas que llegan a esta área por la roca base sufren modificaciones y amplificaciones importantes cuando éstas se transmiten hacia la superficie a través de estratos de arcilla; que se encuentran en las zonas correspondientes a los lechos de los antiguos lagos que hubo en el Valle de México [6]. Por esta situación peculiar los sismos en el Valle de México pueden llegar a tener efectos devastadores. El temblor de 1985 causó la muerte de aproximadamente 10 000 personas, dejó 50 000 heridos y 250 000 personas se quedaron sin hogar. Aproximadamente 770 edificios se colapsaron, 1667 quedaron gravemente dañados y 4965 sufrieron daños leves [35].



Figura 1.1: Distribución de las placas tectónicas en el mundo

Es importante proteger las estructuras de los edificios en esta región por lo que en esta tesis se supone una estructura de edificio de cinco pisos situado en el Valle de México.

1.1. Planteamiento del problema

El problema que se plantea en la presente tesis es contrarrestar las vibraciones que sufre un edificio a causa de perturbaciones naturales; con el propósito de mantener la seguridad y comodidad de las personas en el interior del edificio así como evitar daños estructurales y pérdidas económicas.

1.2. Objetivos

Los objetivos que se pretenden alcanzar en el desarrollo de la tesis se enlistan a continuación.

1. Proponer un modelo de una estructura de un edificio empleando amortiguadores inteligentes.

2. Diseñar la estrategia de control PID-difuso para el modelo propuesto.
3. Simular el modelo del edificio propuesto con el algoritmo de control para comprobar su eficacia.
4. Evaluar el desempeño de tres configuraciones de control semi-activo.
5. Comparar el desempeño del controlador PID-difuso con un controlador difuso.

1.3. Justificación

Al someter a la estructura de un edificio a una perturbación natural, ya sea un terremoto o fuertes vientos, ésta experimenta grandes vibraciones que pueden ocasionarle daños estructurales. Dichos daños comprometen la integridad del esqueleto del edificio poniendo en riesgo la vida de las personas que se encuentran en el interior del mismo. Por esta razón, la protección de estas estructuras debe ser una prioridad con el fin de evitar no sólo pérdidas económicas, sino primordialmente salvaguardar la vida humana. Adicionalmente, se busca incrementar la comodidad de los ocupantes del edificio durante la presencia de perturbaciones.

El uso de dispositivos de control para reducir las vibraciones estructurales que se presentan durante un terremoto, ha cobrado gran importancia en los últimos treinta años [37]. El objetivo de diseño se basa en mantener la respuesta de la estructura del edificio en un nivel seguro [3]. Las vibraciones estructurales se disminuyen con la instalación de un dispositivo de control semi-activo: el amortiguador magneteorológico (MR) en el primer, tercer y quinto pisos del edificio comparando el desempeño de los tres casos.

Se propone un controlador lógico difuso ya que permite variar el voltaje de alimentación del amortiguador MR de forma gradual y suave, permitiendo cubrir todo el rango de posibles voltajes. Esto evita, a diferencia de otras técnicas de control que proporcionan cero o el valor máximo, cambios rápidos en el suministro de voltaje que provocan un aumento repentino en la fuerza de control causando daños estructurales locales.

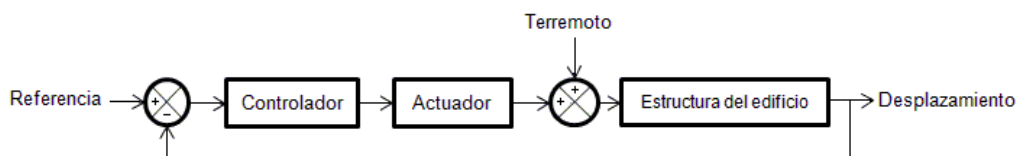


Figura 1.2: Diagrama del sistema de control

En la Figura 1.2 se muestra un diagrama de bloques con la estructura básica del sistema de control.

1.4. Contribuciones

- Modelado de un edificio de “n” pisos utilizando el Principio de D’Alembert y obtención de la representación en espacio de estados. Asimismo, este modelo generalizado se especifica para el caso de un edificio de cinco pisos.
- Diseño de un controlador PID-difuso como un controlador PD-difuso y PI-difuso en paralelo.
- Simulación y evaluación del controlador PID-difuso cuando se coloca el amortiguador magneteorológico en el primer, tercer y quinto pisos.
- Comparación del controlador PID-difuso con un controlador difuso propuesto en la literatura.

1.5. Organización de la tesis

En el capítulo uno de la tesis se presentan los antecedentes de los sistemas de control estructurales y su clasificación. Se plantea el problema a resolver, su justificación y los objetivos de la tesis. Asimismo, se presenta la contribución de este trabajo. En el capítulo

dos se presentan los fundamentos de Ingeniería Sísmica. En el capítulo tres se presentan los sistemas de control semi-activo haciendo énfasis en el amortiguador magnetorológico y se presenta la solución propuesta. En el capítulo cuatro se modela la estructura de un edificio de “ n ” pisos sujeta a las vibraciones de un temblor y se obtiene el modelo para el caso de una estructura de cinco pisos. Adicionalmente, se presenta la representación en espacio de estados. Posteriormente, se presenta el modelo de un amortiguador magnetorológico. En el capítulo cinco se presenta el diseño del controlador PID-difuso y se comparan las diferentes configuraciones del controlador. Se compara el desempeño del controlador PID-difuso con un controlador difuso basado en uno propuesto en la literatura. Finalmente, en el capítulo seis se presentan las conclusiones de la tesis y el trabajo futuro.

Capítulo 2

Ingeniería Sísmica

La ingeniería sísmica es el estudio del comportamiento de los edificios y estructuras sometidas a cargas sísmicas. Los principales objetivos de la ingeniería sísmica son:

- Comprender la interacción entre la estructura de un edificio y el suelo.
- Prever las posibles consecuencias de fuertes terremotos en las zonas urbanas y en la estructura de los edificios.
- Diseñar, construir y mantener estructuras que, ante la presencia de un terremoto, cumplan con las expectativas de operación manteniendo la seguridad de la misma y de las personas que se encuentran en el interior.

Magnitud La escala de magnitud surge ante la necesidad de clasificar objetivamente las condiciones locales del suelo así como de la necesidad de medir el tamaño de un sismo. Se pretende cuantificar la energía que se libera cuando ocurre un temblor y el potencial destructivo que éste tiene [6]. La energía total liberada por un terremoto es la suma de la energía transmitida en forma de ondas sísmicas y la disipada principalmente en forma de calor. La magnitud caracteriza la energía total de un sismo calculada a partir de los registros sísmicos [8]. El científico japonés Wadati introdujo el término en 1931 con el fin de comparar el tamaño de los sismos en Japón [7].

Existen diferentes escalas para medir la magnitud de un sismo. La escala de magnitud más común es la escala de Richter más propiamente llamada magnitud local M_L [6]. Esta escala consiste en asociar la magnitud de un temblor con la amplitud de la onda sísmica, lo que redundaría en propagación del movimiento en un área determinada [36].

Es importante la determinación de la magnitud de un sismo para conocer la destructividad de un sismo sobretodo con fines de estudio del riesgo sísmico que hay en una cierta región.

Intensidad La intensidad es un parámetro que permite describir los daños producidos en edificios y estructuras, así como las consecuencias del sismo sobre el terreno y los efectos sobre las personas [8]. La intensidad se refiere a la severidad del sismo que experimenta un sitio determinado por lo que un sismo tiene una sola magnitud pero la intensidad con la que se siente depende de varios factores como [36]:

- La energía del terremoto.
- La distancia de la falla donde se produjo el terremoto.
- La forma cómo las ondas llegan al sitio en que se registra.
- Las características geológicas del material subyacente del sitio donde se registra la intensidad.
- Cómo la población sintió o dejó registros del terremoto.

En general, la intensidad decrece a medida que aumenta la distancia entre un sitio determinado y el epicentro; a una misma distancia epicentral son más intensos los sismos de mayor magnitud [6].

La escala más utilizada es la de Mercalli Modificada que es de tipo cualitativo y se basa en el efecto o daño producido en las estructuras y en la sensación percibida por la gente. Para establecer la intensidad se recurre a la revisión de registros históricos, entrevistas a la gente, noticias de los diarios públicos y personales, entre otros [36]. La mayor debilidad de la escala de Mercalli es que toma en cuenta sólo marginalmente la calidad sismorresistente de los edificios que se encuentran en la zona afectada [6].

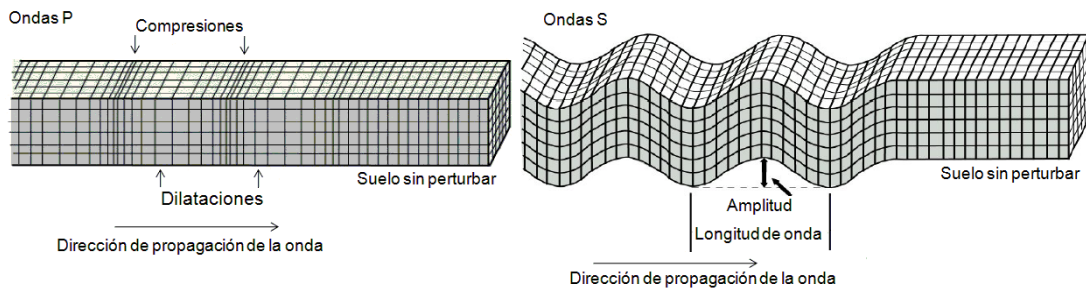


Figura 2.1: Ondas P y Ondas S

2.1. Movimientos sísmicos del terreno

La energía que es liberada durante un sismo se propaga a través de distintos tipos de ondas. Dichas ondas se pueden clasificar en ondas de cuerpo y ondas superficiales [6].

2.1.1. Ondas de cuerpo

Este tipo de ondas viajan grandes distancias a través de la roca y su amplitud se va atenuando poco a poco [6]. Siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición del interior de la Tierra. Las ondas de cuerpo se clasifican en ondas P y ondas S [6],[36].

Ondas P

Las ondas P también son conocidas como ondas principales o de dilatación. En este tipo de onda las partículas de la corteza experimentan un movimiento paralelo a la dirección de propagación [6]. Las ondas P son ondas compresionales lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado como se aprecia en la Figura 2.1. Las ondas P pueden viajar a través de cualquier tipo de material.

Ondas S

Las ondas S también son conocidas como ondas secundarias o de cortante. En este tipo de onda las partículas se mueven transversalmente a la dirección de propagación [6], alternadamente hacia un lado y hacia el otro como se muestra en la Figura 2.1. Las ondas S pueden viajar únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar esfuerzos de corte [36].

Un movimiento sísmico es una combinación de ondas P y S. La velocidad de propagación de las ondas P es mayor a la velocidad de propagación de las ondas S, por lo que esta diferencia de velocidades es utilizada para calcular la ubicación del epicentro. Las ondas S producen un movimiento del terreno más intenso y con características que son más dañinas para las edificaciones [6].

2.1.2. Ondas superficiales

Las ondas superficiales se deben a reflexiones y refracciones de las ondas de cuerpo cuando éstas llegan a la superficie. Este tipo de ondas viajan sobre la superficie de la Tierra [6] desplazándose a menor velocidad que las ondas de cuerpo. Las ondas superficiales son de baja frecuencia por lo que provocan que los edificios entren en resonancia con mucha más facilidad que las ondas de cuerpo. Por esta razón, las ondas superficiales son las ondas sísmicas más destructivas. Se pueden clasificar en ondas R y ondas L [36].

Ondas R

Las ondas R o Rayleigh son ondas superficiales que viajan como ondulaciones similares a aquellas encontradas en la superficie del agua como se muestra en la Figura 2.2. La existencia de estas ondas fue predicha por John William Strutt [36].

Ondas L

Las ondas L o Love son ondas superficiales que provocan cortes horizontales en la tierra como se aprecia en la figura 2.2. Las ondas Love son levemente más lentas que las ondas de

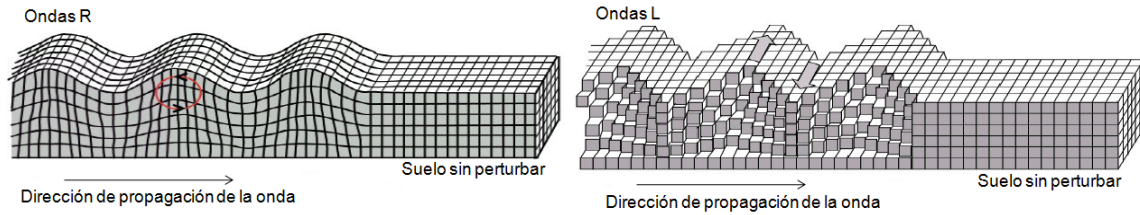


Figura 2.2: Ondas R y Ondas L

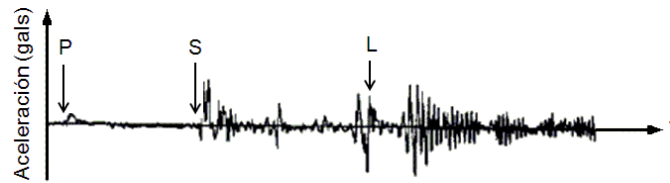


Figura 2.3: Acelerograma del terremoto de Kermadec

Rayleigh [36].

En la figura 2.3 se muestra el acelerograma del terremoto de Kermadec (1957) donde se identifica la llegada de las ondas P, seguidas de las ondas S y finalmente las ondas L.

2.2. Sismicidad

La sismicidad es considerada como la distribución espacio-tiempo de los terremotos que han tenido lugar en la Tierra y de los efectos destructivos que se obtienen a partir la recopilación histórica de los datos. Esto ha dado lugar a la creación de catálogos sísmicos muy completos que incluyen datos como magnitud, duración, coordenadas exactas del foco, dirección de propagación, profundidad, entre otros [8].

En los nuevos estudios de sismicidad se relaciona la actividad sísmica con su distribución espacial y temporal y se correlaciona con las características fisiográficas y geológicas de cada región. En la Figura 2.4 se señalan las zonas sísmicas más activas. Existen tres grandes zonas

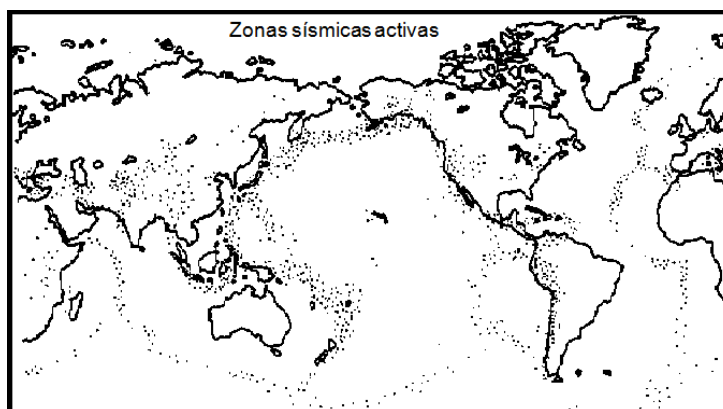


Figura 2.4: Zonas sísmicas activas en el mundo

sísmicas denominadas cinturones y son: el cinturón Circumpacífico, el cinturón Transasiático y el cinturón situado en el centro del Océano Atlántico. México está ubicado en el denominado cinturón Circumpacífico que tiene una extensión de 40 000 kilómetros.

El riesgo sísmico de una zona no puede determinarse basándose únicamente en la actividad sísmica reciente. Por ejemplo, la Ciudad de Kobe, Japón en 1990 era considerada por la Agencia Meteorológica de Japón como una zona de baja sismicidad ya que no habían registrado terremotos fuertes en los últimos treinta años. Sin embargo, después del temblor que ocurrió en 1990 se le considera como una de las zonas más peligrosas debido a la falta de energía liberada. Este argumento permite afirmar que aún las zonas de peligrosidad sísmica moderada, donde el período que transcurre entre los temblores fuertes es largo, son de alto riesgo [8]. Tal es el caso del Valle de México que es una zona de peligro sísmico moderado.

Peligro sísmico

Las zonas sismogénicas son aquellas donde existen fallas tectónicas activas cuya ruptura genera sismos. Los movimientos sísmicos del terreno se presentan no sólo en las zonas sismogénicas sino también en zonas que están lo suficientemente cerca. Por esta razón, el peligro sísmico indica el grado de exposición que tiene una determinada región a un temblor

en lo referente a las máximas intensidades que se puedan presentar [6].

Las ondas sísmicas que se generan en la corteza terrestre por un evento de gran magnitud se propagan a mucha distancia, pero su amplitud va disminuyendo debido a la distancia por efectos de dispersión y de amortiguamiento. Se han desarrollado ecuaciones empíricas para relacionar la intensidad del movimiento en un sitio con su distancia epicentral y con la magnitud del sismo. Sin embargo, estas relaciones son sumamente erráticas y las ecuaciones propuestas difieren significativamente entre sí y tienen coeficientes de variación elevados. Estas ecuaciones son conocidas como leyes de atenuación. La manera en que se atenúan los efectos sísmicos con la distancia desde la zona epicentral se aprecia directamente de las intensidades que se determinan en distintos sitios [6].

El peligro sísmico en un sitio específico depende de su cercanía a fuentes de eventos de magnitud suficiente para producir intensidades significativas en el sitio.

Efectos locales y microzonificación

Los efectos locales son alteraciones de las ondas sísmicas en un lugar determinado causadas por efectos geológicos, topográficos y de rigidez del subsuelo, provocando que el movimiento sísmico del terreno difiera de manera significativa en comparación con el movimiento de la roca base. La importancia de los efectos locales ha conducido a la microzonificación con el fin de detectar zonas que tengan problemas especiales. En zonas de suelos inestables se tienen fenómenos locales extremos donde la vibración sísmica puede provocar fallas de suelo, deslizamiento de laderas o problemas de licuación. Asimismo, la presencia de estratos de suelo blando altera en forma significativa las características de las ondas cuando éstas pasan por dichos estratos hacia la superficie. Se filtran las ondas de período corto y se amplifican las ondas de período largo. En general, la intensidad sísmica aumenta en los sitios de terreno blando. Los daños en los sismos importantes han sido sistemáticamente más graves en estos sitios que en los de terreno firme [6].

La microzonificación de la Ciudad de México ha dado lugar a tres zonas como se muestra en la Figura 2.5. La zona de Lomas es de terreno firme y de peligro sísmico menor, la zona del Lago tiene depósitos de arcilla de por lo menos 20 metros de espesor y corresponde al

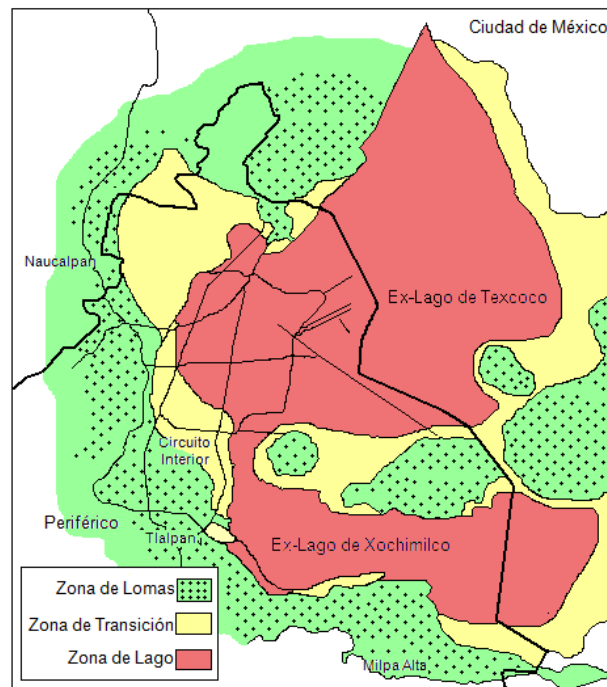


Figura 2.5: Microzonificación de la Ciudad de México

peligro sísmico mayor. Entre estas dos zonas se encuentra la zona de Transición donde los estratos de arcilla son de menor espesor y producen amplificaciones importantes de las ondas sísmicas [6].

Capítulo 3

Control de estructuras

Existen varias técnicas innovadoras para mejorar la funcionalidad y seguridad de la estructura de un edificio. Se pueden clasificar de acuerdo al nivel de energía requerido para su operación y del tipo de dispositivo que se utiliza, en los siguientes grupos: control pasivo, activo, semi-activo e híbrido [34].

3.1. Control pasivo

El control pasivo consiste en un actuador que se encuentra adjunto o incrustado a la estructura para modificar la rigidez o el amortiguamiento de la misma; sin requerir de una fuente externa de energía para su operación y sin añadir energía al sistema.

Los actuadores de control pasivo imparten fuerzas que se generan por los desplazamientos mutuos que se producen en los puntos de conexión del actuador con la estructura [9] y se caracterizan por su capacidad de disipar la energía en un sistema estructural.

Se destacan las siguientes ventajas del control pasivo: es relativamente barato, no consume energía externa y es inherentemente estable.

Dentro del control pasivo se puede distinguir los grupos de aislamiento de la base y disipación de energía pasiva.

Aislamiento de la base

El uso de dispositivos para aislar la base es una de las técnicas más aceptadas ya que puede reducir el desvío entre los distintos pisos y la aceleración absoluta de una estructura.[3]. El objetivo del aislamiento de la base consiste en desacoplar el movimiento de la base de un edificio del movimiento del suelo. Esto se consigue mediante conexiones especialmente diseñadas que se ubican entre la estructura del edificio y su cimentación. El edificio aislado reduce las fuerzas dinámicas mediante dos mecanismos básicos [8]:

1. Un plano deslizante construido con un material de bajo coeficiente de fricción.
2. Elementos flexibles del tipo de neopreno.

Disipación de energía pasiva

Los dispositivos de disipación de energía pasiva se utilizan tanto para contrarrestar las vibraciones causadas por un sismo como para la rehabilitación de edificios viejos o deficientes [8]. Estos mecanismos son simples, confiables y de bajo costo. La controlabilidad de dichos dispositivos es limitada. Su eficiencia depende de la sintonización del sistema con la perturbación esperada y el comportamiento de la estructura; por lo que sólo son efectivos para los modos de vibración para los cuales se realizó la sintonización.

3.2. Control activo

El control activo reduce la respuesta de una estructura utilizando una fuente de energía externa para operar los actuadores que generan la fuerza necesaria para contrarrestar las vibraciones. Esta característica representa una desventaja, ya que al necesitar de una fuente externa para generar las fuerzas de control, es vulnerable a las fallas eléctricas, situación que es común durante un sismo.

Los actuadores que se utilizan en el control activo son completamente controlables, pero requieren de una gran cantidad de energía que no siempre es fácil de generar. Sin embar-

go, son considerablemente más flexibles para reducir los efectos de una gran variedad de perturbaciones [10].

3.3. Control híbrido

El control híbrido combina el uso de elementos del control activo y pasivo. Un sistema de control híbrido puede utilizar un sistema de control activo para mejorar el desempeño de un sistema de control pasivo; o bien, un sistema de control pasivo se puede utilizar para disminuir los requerimientos de energía de un sistema activo [9].

3.4. Control semi-activo

El control semi-activo llena el vacío que hay entre el control activo y pasivo. Los dispositivos de control semi-activo tienen propiedades que se pueden variar de forma dinámica permitiendo absorber de manera efectiva la energía proveniente de las vibraciones; reduciendo la respuesta de la estructura bajo una gran variedad de condiciones de carga dinámica. Asimismo, los dispositivos de control semi-activo ofrecen la gran adaptabilidad de los dispositivos de control activo sin requerir de grandes fuentes de potencia, ya que incluso estos sistemas pueden trabajar con baterías. Esta es una gran ventaja debido a que durante un sismo puede llegar a fallar el suministro de energía eléctrica [29], [37]. Varios estudios indican que los dispositivos semi-activos tienen un mejor comportamiento que los dispositivos pasivos y tienen el potencial de alcanzar tan buen desempeño como el de un dispositivo activo [37].

Los dispositivos de control semi-activo pueden ser operados en tiempo real y a diferencia de los dispositivos activos, los semi-activos no pueden incrementar energía mecánica a la estructura que se desea controlar; por lo que estos sistemas no tienen el potencial de desestabilizar al sistema en el sentido de BIBO estabilidad. A los dispositivos semi-activos también se les conoce como amortiguadores pasivos controlables y son tan confiables como los de control activos.

3.4.1. Actuadores de control estructural

Existen diferentes tipos de actuadores que pertenecen a la clase de sistemas de control semi-activo de los cuales se pueden destacar los siguientes:

Actuadores de viscosidad variable

Los actuadores de viscosidad variable consisten de un cilindro hidráulico que contiene un pistón que divide al cilindro en dos partes. El pistón permite fluir aceite a través de un orificio creando la fuerza de salida. Si dicho orificio tiene una apertura constante, entonces el actuador funciona como un amortiguador pasivo viscoso, pero si la fuerza de salida se puede regular por medio de una servo-válvula entonces el amortiguador es semi-activo y se puede cambiar el coeficiente de viscosidad de acuerdo a una determinada ley de control.

Actuadores de rigidez variable

Los actuadores de rigidez variable se utilizan para modificar la rigidez de un sistema determinado. Fueron propuestos para evitar la resonancia en tiempo real al momento de un temblor. Al variar la rigidez de una estructura se modifica a su vez la frecuencia natural de la misma con el fin de obtener siempre una respuesta conveniente a perturbaciones externas. Los dispositivos de control de la rigidez actúan como refuerzos que se activan o desactivan para proporcionarle o no rigidez adicional al sistema.

Un caso especial de funcionamiento para los amortiguadores de rigidez variable es que pueden actuar como un “on-off” y solamente se pueden tener dos valores, un valor bajo en el que el refuerzo no agrega rigidez a la estructura y un valor alto en el que el refuerzo agrega rigidez a la estructura.

Uno de los esquemas más comunes para estos amortiguadores es utilizar un refuerzo que puede variar la rigidez de la estructura en base a una ley de control determinada. Esto se logra con actuadores hidráulicos que sujeta los refuerzos a la estructura. En este caso, el actuador de rigidez variable se acopla con un amortiguador activo, resultando en un actuador de viscoelasticidad variable. Otra forma de variar la rigidez de la estructura es por medio

de un amortiguador de masa sintonizado adaptado en el que la variación de la rigidez de un resorte helicoidal se puede modificar variando el número de bobinas alrededor del resorte.

Actuadores de control de la fricción

Los actuadores de control de la fricción son disipadores de energía que se encuentran en los soportes laterales de una estructura o bien, son componentes de un sistema de aislación por deslizamiento. El coeficiente de fricción del deslizamiento es controlado por la modulación de la presión de un fluido en una presión neumática [2], [15].

Amortiguadores de fluido controlable

Esta clase de actuadores semi-activos utilizan fluidos controlables. Los principales fluidos controlables que se utilizan en la construcción de un amortiguador de fluido controlable son los fluidos electroreológicos y los fluidos magnetorológicos. La ventaja de estos actuadores es que la única parte que se puede mover es un pistón por lo que son simples y muy confiables [37].

Los amortiguadores electroreológicos consisten de un cilindro hidráulico que contiene micro partículas dieléctricas suspendidas en un fluido. Cuando dicho fluido es sometido a la presencia de una corriente eléctrica las partículas se polarizan y el fluido se vuelve sólido en cuestión de mili segundos, ofreciendo un incremento de la resistencia del fluido [11].

Los amortiguadores magnetorológicos son los análogos magnéticos de los amortiguadores electroreológicos, las partículas suspendidas en el fluido se alinean cuando se les somete a la presencia de un campo magnético. Estos amortiguadores cuentan con electromagnetos ubicados dentro de la cabeza del pistón para generar el campo magnético [11].

3.5. Amortiguador de fluido magnetorológico (MR)

Los amortiguadores MR son amortiguadores de fluido controlable en los que el control de fluido se realiza por medio de un campo magnético.

La aplicación de los amortiguadores magneteorológicos se ha centrado principalmente en el control de vibraciones que experimenta una estructura cuando está sometida a fuertes vientos o a un terremoto. Un amortiguador magneteorológico es uno de los actuadores semi-activos más prometedores ya que requieren de poca energía para su funcionamiento e incluso pueden operar con baterías, son compactos, confiables, relativamente económicos, responden rápidamente y es factible implementarlos en una estructura de tamaño real. Un esquema de este amortiguador se muestra en la Figura 3.1.

La construcción de un amortiguador MR es parecida a la de un amortiguador hidráulico convencional pero con la principal diferencia de que el amortiguador MR funciona con fluido magneteorológico.

La característica esencial del fluido magneteorológico es que tiene la capacidad de cambiar de estado líquido a un estado semi-sólido cuando se le somete a la presencia de un campo magnético. Asimismo, éste vuelve a su estado líquido cuando se le retira dicho campo magnético. Esta característica provee de una simple, silenciosa y rápida respuesta de la interfaz entre el controlador y el sistema mecánico.

La habilidad de cambiar de forma reversible entre estado líquido y semi-sólido se debe a que el fluido magneteorológico es una suspensión no coloidal compuesto por partículas de hierro magnetizables suspendidas en un líquido que funciona como portador [26]. Cuando un electromagneto se aplica al líquido estas pequeñas partículas se alinean haciendo que el fluido se endurezca convirtiéndolo en sólido. Esto es por el campo magnético de corriente directa, haciendo que las partículas tengan polaridad uniforme.

Los fluidos magneteorológicos son conocidos como fluidos inteligentes. Comparado con un fluido ER, necesitan de menor voltaje para cambiar de un estado al otro lo que es conveniente por razones de seguridad y razones prácticas. El fluido MR tiene características atractivas: buena fluencia, baja viscosidad, comportamiento estable con histéresis ante un gran rango de temperaturas, es insensible a los contaminantes por lo que facilita y reduce el costo de su producción. La principal ventaja de un fluido MR se encuentra en la gran fluencia debida a la densidad de energía magnética que se puede establecer en el fluido. Es de veinte a cincuenta veces más fuerte comparado con un fluido ER.

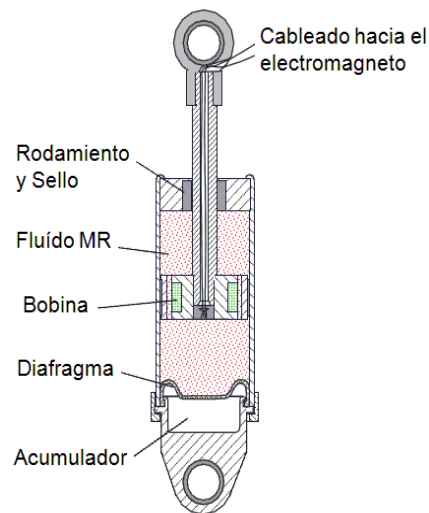


Figura 3.1: Esquema de un amortiguador MR

La rigidez de la sustancia se especifica ajustando la magnitud del campo magnético que se produce con una bobina que se encuentra alrededor de la cabeza del pistón del amortiguador. De esta manera, es posible regular el amortiguamiento y por ende la resistencia al movimiento.

El comportamiento con histéresis de un amortiguador MR se monitorea utilizando una fuente de voltaje externa lo que hace que el voltaje de alimentación del amortiguador sea una variable de control.

La naturaleza no lineal de un amortiguador MR hace que el diseño de un algoritmo de control adecuado que pueda sacar provecho de sus características únicas, sea una tarea interesante y difícil.

3.6. Configuraciones del amortiguador magneteorológico (MR)

En esta sección se presentan algunas configuraciones del amortiguador MR propuestas en la literatura con el fin de conocer las más comúnmente utilizadas.

En [?] se verifica de forma experimental la efectividad de un sistema de control semi-activo que integra al amortiguador MR; con el fin de proteger una estructura de acero de un edificio de tamaño real de cinco pisos. En dicha estructura se colocan dos amortiguadores MR entre el suelo y el primer piso.

De igual forma, en [32] se considera el modelo de un edificio de diez pisos sujeto a la vibración provocada por un temblor. Los autores proponen el uso de dos amortiguadores MR en una configuración diferencial para contrarrestar el problema de offset de la fuerza que surge por el uso de un sólo amortiguador MR. Dichos amortiguadores son instalados en el primer piso del edificio y se demuestra la efectividad con una simulación del modelo del edificio de diez pisos sujeta a excitaciones similares a las de un temblor. Asimismo, en [3] se utiliza un amortiguador MR en el primer piso.

En [42], se considera el modelo de un edificio de seis pisos sujeto a la vibración de un temblor. En este caso, el actuador que se utiliza para contrarrestar las vibraciones del sismo se coloca en el sexto piso.

3.7. Esquema de control

En el presente trabajo se propone el uso de un amortiguador magneteorológico con el fin de reducir las vibraciones de la estructura de un edificio de cinco pisos cuando a ésta se le somete a un terremoto. El amortiguador magneteorológico es uno de los actuadores semi-activos más prometedores ya que requieren de poca energía para su funcionamiento e incluso pueden operar con baterías, son compactos, confiables, relativamente económicos, responden rápidamente y es factible implementarlos en una estructura de tamaño real.

De la sección anterior, es posible observar que en la literatura se ha propuesto la colocación

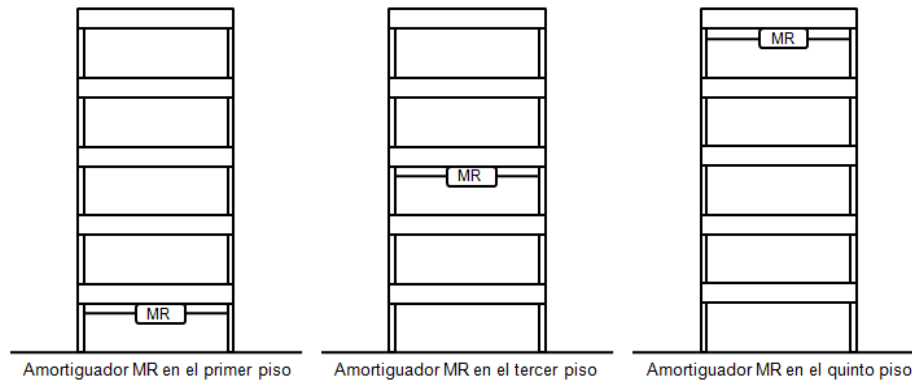


Figura 3.2: Esquema de control para el primer, tercer y quinto pisos

de los amortiguadores MR en el primer piso y en el último piso con el fin de reducir el efecto de las perturbaciones. En este trabajo se proponen distintas configuraciones, colocando el amortiguador MR en el primer piso, en el tercer piso y en el último piso, con el fin de comparar el desempeño de cada una y encontrar la más eficaz para este determinado problema. Los amortiguadores MR se colocan como se muestra en la Figura 3.2.

Capítulo 4

Modelado de un edificio sujeto a las vibraciones de un temblor

Este capítulo presenta el modelado de la dinámica de un edificio de un sólo piso sujeto a las vibraciones de un terremoto, así como algunos modelos de un edificio de “ n ” pisos sometido a la misma perturbación. Después se presentan los distintos modelos de un amortiguador magneteorológico. Finalmente, se presenta el modelo propuesto para este trabajo en representación de espacio de estados.

4.1. Modelo de un edificio sujeto a un terremoto

4.1.1. Modelo de un edificio de un sólo piso

Una apreciación aproximada de la respuesta que una estructura tiene ante un sismo, se puede obtener analizando un modelo simple de un grado de libertad. Este sistema consiste de una masa concentrada y un elemento resistente con rigidez lateral y amortiguamiento. Este sistema se caracteriza por su período natural de vibración [6].

En la figura 4.1 se muestra un sistema de este tipo con parámetros constantes. Se establece como m a la masa del edificio, f_r a la fuerza cortante en los elementos elásticos, f_a a la fuerza

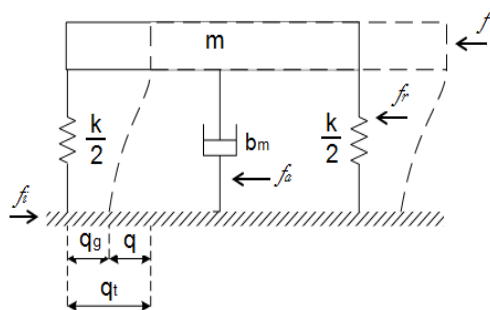


Figura 4.1: Sistema masa-resorte-amortiguador

en el amortiguador, q_g al desplazamiento del suelo, q_t al desplazamiento total de la masa, $q = q_t - q_g$ al desplazamiento de la masa con respecto al suelo, f la fuerza externa que obra sobre la masa y f_i la fuerza ejercida por el terremoto.

Se toman los desplazamientos y las fuerzas que actúan sobre la masa como positivos de izquierda a derecha. De acuerdo con el principio de D'Alembert [31] que establece que la suma de las fuerzas externas que actúan sobre un cuerpo y las fuerzas de inercia forman un sistema de fuerzas en equilibrio, se tiene la siguiente expresión:

$$-f_i = f_a + f_r + f \quad (4.1)$$

y dado que

$$f_i = -m\ddot{q}$$

es posible escribir (4.1) como:

$$\begin{aligned} m\ddot{q} &= f_a + f_r + f \\ m\ddot{q} - f_a - f_r &= f \end{aligned} \quad (4.2)$$

Ahora bien, se considera el caso en que la fuerza amortiguadora f_a es proporcional a la rapidez de deformación:

$$f_a = -b_m \dot{q}$$

donde c_m es la constante de amortiguamiento. Se tiene que la fuerza elástica f_r es proporcional a la deformación:

$$f_r = -kq$$

donde k es la constante del resorte. Sustituyendo estas expresiones en (4.2) se obtiene entonces:

$$m\ddot{q} + b_m\dot{q} + kq = f \quad (4.3)$$

Cuando a esta estructura de edificio de un sólo piso se le somete a la perturbación de un sismo, a la ecuación (4.3) se le añade un término que describe dicha excitación externa de la siguiente manera:

$$m\ddot{q} + b_m\dot{q} + kq = f + m\ddot{q}_g \quad (4.4)$$

De aquí que el modelo matemático que describe la dinámica de un edificio de un sólo piso sometido a un terremoto está regido por una ecuación diferencial lineal donde q es el desplazamiento del piso con respecto al suelo, \dot{q} es la velocidad, \ddot{q} es la aceleración y \ddot{q}_g es la aceleración del suelo.

4.1.2. Modelo de un edificio de “ n ” pisos

En esta sección, se presenta el modelo de un edificio de “ n ” pisos como el que se muestra en la Figura 4.2.

Se considera que el sistema tiene parámetros constantes, integrados por masas rígidas unidas entre sí y al terreno por medio de resortes y amortiguadores lineales y carentes de masa. Cada masa puede tener hasta seis grados de libertad, tres correspondientes a las traslaciones y tres correspondientes a las rotaciones. La mayor parte de los problemas de

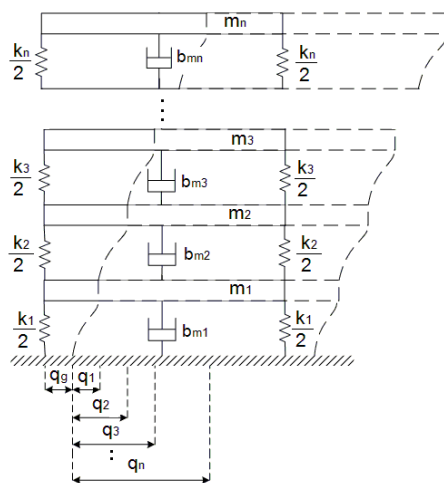


Figura 4.2: Múltiples sistemas de masa-resorte-amortiguador

diseño se pueden reducir sin problemas, considerando que cada masa solamente tiene un grado de libertad, aún en los casos en que interviene la fuerza cortante [31].

Cada uno de los pisos i se puede considerar como un sistema masa-resorte-amortiguador, como se expuso en la sección anterior, y que tiene un sólo grado de libertad correspondiente a los desplazamientos del piso i con respecto el suelo.

Se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales para el modelo de la Figura 4.2:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{q}_1(t) + (b_{m_1} + b_{m_2}) \dot{q}_1(t) + (k_1 + k_2) q_1(t) - b_{m_2} \dot{q}_2(t) - k_2 q_2(t) &= m_1 \ddot{q}_g(t) \\
 m_2 \ddot{q}_2(t) + (b_{m_2} + b_{m_3}) \dot{q}_2(t) + (k_2 + k_3) q_2(t) - b_{m_2} \dot{q}_1(t) - k_2 q_1(t) - b_{m_3} \dot{q}_3(t) - k_3 q_3(t) &= m_2 \ddot{q}_g(t) \\
 m_3 \ddot{q}_3(t) + (b_{m_3} + b_{m_4}) \dot{q}_3(t) + (k_3 + k_4) q_3(t) - b_{m_3} \dot{q}_2(t) - k_3 q_2(t) - b_{m_4} \dot{q}_4(t) - k_4 q_4(t) &= m_3 \ddot{q}_g(t) \\
 &\vdots \\
 m_n \ddot{q}_n(t) + b_{m_n} \dot{q}_n(t) + k_n q_n(t) - b_{m_n} \dot{q}_{n-1}(t) - k_n q_{n-1}(t) &= m_n \ddot{q}_g(t)
 \end{aligned}$$

Se escribe en forma matricial las expresiones anteriores:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & m_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1(t) \\ \ddot{q}_2(t) \\ \ddot{q}_3(t) \\ \vdots \\ \ddot{q}_{n-1}(t) \\ \ddot{q}_n(t) \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} b_{m1} + b_{m2} & -b_{m2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b_{m2} & b_{m2} + b_{m3} & -b_{m3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b_{m3} & b_{m3} + b_{m4} & & & \vdots \\ 0 & 0 & & \ddots & -b_{mn-1} & 0 \\ \vdots & \vdots & & -b_{mn-1} & b_{mn-1} + b_{mn} & -b_{mn} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -b_{mn} & b_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1(t) \\ \dot{q}_2(t) \\ \dot{q}_3(t) \\ \vdots \\ \dot{q}_{n-1}(t) \\ \dot{q}_n(t) \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_2 + k_3 & & & \vdots \\ 0 & 0 & & \ddots & -k_{n-1} & 0 \\ \vdots & \vdots & & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -k_n & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \\ \vdots \\ q_{n-1}(t) \\ q_n(t) \end{bmatrix} = \Lambda f(t) + M\Gamma \ddot{q}_g(t)
\end{aligned}$$

Este es un sistema de múltiples grados de libertad donde cada piso es un grado de libertad. Se puede expresar como:

$$M\ddot{q}(t) + B_m\dot{q}(t) + Kq(t) = \Lambda f(t) + M\Gamma \ddot{q}_g(t) \quad (4.5)$$

donde

M es la matriz de masas de los “ n ” pisos del edificio de dimensión $n \times n$, B_m es la matriz de amortiguamiento de dimensión $n \times n$, K es la matriz de rigidez de dimensión $n \times n$, q es

el vector de desplazamiento del piso con respecto al suelo de dimensión $n \times 1$, \dot{q} es el vector de la velocidad de dimensión $n \times 1$, \ddot{q} es el vector de la aceleración de dimensión $n \times 1$, \ddot{q}_g es la aceleración del suelo y $f(t)$ es el vector columna de dimensión $n \times 1$ correspondiente a la fuerza proporcionada por el amortiguador.

Se introduce el vector de posición del amortiguador Λ indicando el piso donde es colocado de dimensión $n \times 1$, Γ es el vector de influencia del sismo sobre cada piso de dimensión $n \times 1$. El vector Λ tienen la forma:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

El vector Λ que se representa, es el caso cuando el amortiguador encuentra solamente en el primer piso. Se obtendrán diferentes vectores Λ al modificar la configuración y colocar amortiguadores en otros pisos.

Finalmente, el vector Γ tiene la forma:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

El vector Γ tiene como elementos unos ya que el sismo tiene influencia sobre todos los pisos del edificio.

Representación general en espacio de estados

En esta sección se presenta la representación general en espacio de estados del modelo anterior. Se definen dos vectores de variables de estado \mathbf{x}_1 y \mathbf{x}_2 de dimensión $n \times 1$ de la

siguiente manera [23]:

$$\begin{aligned}x_{1,i} &= q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ \dot{x}_{2,i} &= \dot{q}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n\end{aligned}\tag{4.8}$$

De tal forma que se tiene que:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{x}_2$$

Se sigue que la ecuación (4.5) se puede escribir como sigue:

$$\begin{aligned}M\dot{\mathbf{x}}_2 + B_m\mathbf{x}_2 + K\mathbf{x}_1 &= \Lambda f(t) + M\Gamma\ddot{q}_g(t) \\ M\dot{\mathbf{x}}_2 &= -B_m\mathbf{x}_2 - K\mathbf{x}_1 + \Lambda f(t) + M\Gamma\ddot{q}_g(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_2 &= -M^{-1}B_m\mathbf{x}_2 - M^{-1}K\mathbf{x}_1 + M^{-1}\Lambda f(t) + \Gamma\ddot{q}_g(t)\end{aligned}\tag{4.9}$$

El vector de estado \mathbf{x} de dimensión $2n \times 1$ queda definido como:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \dots \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix}\tag{4.10}$$

Entonces, se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B\Lambda u(t) + E\Gamma\ddot{q}_g(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{4.11}$$

donde:

A es una matriz de dimensión $4n \times 4n$, B es una matriz de dimensión $2n \times k$, C es una matriz de dimensión $n \times 2n$, D es una matriz de dimensión $n \times k$ y E es una matriz de $2n \times k$.

Dichas matrices están definidas como:

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_n & \vdots & \mathbf{I} \\ \dots & \vdots & \dots \\ -M^{-1}K & \vdots & -M^{-1}B_m \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$B = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_k \\ \dots \\ M^{-1} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$C = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \vdots & \mathbf{0}_n \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$D = \mathbf{0}_k \quad (4.15)$$

$$E = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_k \\ \dots \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

\mathbf{I} es la matriz identidad de dimensión $n \times n$, $\mathbf{0}_n$ es la matriz de ceros de dimensión $n \times n$ y $\mathbf{0}_k$ es la matriz de ceros de dimensión $n \times k$.

4.1.3. Variaciones del modelo

En esta sección se presenta algunas variaciones propuestas por algunos autores para el modelo de un edificio de “ n ” pisos mostrado anteriormente.

Modelado con la teoría de Vigas de Euler-Bernoulli

En [38], se modela un edificio de “ n ” pisos sometido al movimiento de un terremoto utilizando la teoría de vigas de Euler-Bernoulli. Se considera la longitud de la viga L , la densidad de la masa ρ , el área de sección transversal A , módulo elástico E y el momento de inercia I . Las posiciones de las lozas están localizadas en q_i , ($i = 1, 2, \dots, n$). Adicionalmente, se consideran dos sistemas de referencia, uno fijo y otro móvil. La desviación transversal $v(t, x)$ se mide con respecto del sistema de referencia móvil. Se obtiene una ecuación diferencial de

segundo orden no lineal con un término no lineal $N(q)$ y un vector de fuerza F que incluye la aceleración del terremoto, la fuerza de control y la fricción seca.

$$M\ddot{q} + B_m\dot{q} + Kq + N(q) = F$$

El amortiguamiento de Rayleigh modela el amortiguamiento natural de la estructura, donde α y β se seleccionan dependiendo de la estructura que se está considerando.

$$B_m = \alpha M + \beta K$$

Modelo no lineal con dos subsistemas acoplados

En [28] se considera una estructura de edificio con “ n ” grados de libertad, no lineal con la base aislada cuyo comportamiento dinámico se puede describir por medio de un modelo compuesto por dos subsistemas acoplados; la estructura principal S_r y el aislamiento de la base S_c .

$$S_r : M\ddot{q}_r + B_m\dot{q}_r + Kq_r = B_m J\dot{q}_c + K Jq_c$$

$$S_c : m_o\ddot{q}_c + (b_{m0} + J^T C J)\dot{q}_c + (k_0 + J^T K J)q_c - J^T B_m\dot{q}_r - J^T K q_r + f(q_c, \dot{q}_c, d, \dot{d}) = 0$$

donde

$$f(q_c, \dot{q}_c, d, \dot{d}) = -b_{md}\dot{d} - k_0 d + f_N(q_c, \dot{q}_c, d, \dot{d})$$

$$f_N(q_c, \dot{q}_c, d, \dot{d}) = -\text{sgn}(\dot{q}_c - \dot{d}) \left[\mu_{\text{máx}} - \Delta\mu e^{-v[\dot{q}_c - \dot{d}]} \right] Q$$

Este modelo asume que la estructura tiene un comportamiento lineal debido al aislamiento de la base. Su comportamiento está representado por una matriz definida positiva de masa M , amortiguamiento B_m y rigidez K . Se utiliza un vector $q_r = [q_{r1}, q_{r2}, \dots, q_{rn}]^T \in \mathbb{R}^n$ para

representar el desplazamiento horizontal de cada piso con respecto a un referencial inercial. El aislamiento de la base se describe como un sólo grado de libertad con un desplazamiento horizontal $q_c \in \mathbb{R}$. Se asume que presenta un comportamiento lineal caracterizado por masa m_0 , amortiguamiento b_{m0} y rigidez k_0 ; además de un comportamiento no lineal representado por la fuerza f_N suministrada por un aislador de fricción; el cual está caracterizado por una fuerza normal Q a la superficie de fricción, el coeficiente de fricción μ , una constante v , el coeficiente para alta velocidad de deslizamiento $\mu_{\text{máx}}$ y $\Delta\mu$ es la diferencia entre $\mu_{\text{máx}}$ y el coeficiente de baja velocidad de deslizamiento. Se considera el término $-b_{md}\dot{d} - k_0d$ que es la fuerza de excitación dinámica actuando sobre la base debido al movimiento horizontal del suelo provocado por el terremoto, representado por el desplazamiento inercial $d(t)$ y velocidad $\dot{d}(t)$ en cada instante de tiempo t . Se introduce un vector $J \in \mathbb{R}^n$ que representa al movimiento de cuerpo rígido de acuerdo a los grados de libertad de la estructura y representa el acoplamiento lineal entre la estructura y el aislamiento de la base.

Modelo con incertidumbre en los parámetros

En [44] se establece un modelo en representación de espacio de estados del edificio con incertidumbres en los parámetros definiendo las variables de estados como $x = [q(t) \dot{q}(t)]^T$.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B\Lambda u(t) + E\Gamma\ddot{q}_g(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}$$

Se considera que el amortiguamiento y la viscosidad de un edificio no puede ser medida de manera sencilla y precisa, a diferencia de la masa que sí puede ser medida de manera precisa. Las incertidumbres en los parámetros de los sistemas de control se ubican principalmente en la matriz A . De esta manera, es posible incluir un término Δ_A que represente las incertidumbres del sistema asumiendo que está acotado. Por lo tanto, el sistema de control de vibración con incertidumbres en los parámetros puede ser descrito de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= (A + \Delta_A)x(t) + B\Lambda u(t) + E\Gamma\ddot{q}_g(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}$$

Modelo que considera perturbaciones causadas por el viento y las vibraciones de un temblor

En [1] se presenta un modelo con representación en espacio de estados de una estructura de cinco grados de libertad sujeto a perturbaciones por viento en cada piso y perturbaciones debido a terremotos y choques en el suelo. Se instala en el primer y quinto pisos un dispositivo de control activo para suprimir las vibraciones.

El modelo está conformado por dos subsistemas que dividen a los pisos que tienen actuador y a los pisos que no tienen. Ambos modelos toman en cuenta un factor de interconexión que representa la afectación a los subsistemas adyacentes y la perturbación a la que está sometido cada subsistema. Dicha perturbación representa la vibración inducida por el terremoto, la fuerza cortante debida al terremoto y la fuerza del viento.

Se brinda también la expresión para el cálculo de la fuerza del viento que incluye parámetros como la fuerza y velocidad del viento, factor de respuesta de ráfaga. Se modela la fuerza cortante del terremoto sobre la estructura e incluye parámetros como la carga muerta de la estructura, la aceleración debida a la gravedad, factor sísmico de la zona, factor dinámico, coeficiente estructural.

A continuación se presenta dicho modelo en su representación en espacio de estados utilizando las notaciones siguientes:

1. Los subsistemas que tienen actuadores están denotados por el conjunto N .
2. Los subsistemas que no tienen actuadores están denotadas por el conjunto M .

Las siguientes ecuaciones se pueden obtener para cada subsistema

- Subsistema con actuador $S_i, i \in N$

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + B_i L_i^T(t) x_{i-1}(t) + B_i L_{i+1}^T(t) x_{i+1}(t) + T_i(t) \\ y_i(t) &= C x_i(t)\end{aligned}$$

- Subsistema sin actuador S_i , $i \in M$

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + B_i L_i^T(t) x_{i-1}(t) + B_i L_{i+1}^T(t) x_{i+1}(t) + T_i(t) \\ y_i(t) &= C x_i(t)\end{aligned}$$

donde

A_i, B_i, C son las matrices del espacio de estado de los subsistemas de la planta

L_i es el factor de interconexión que afecta a los subsistemas adyacentes

$T_i(t)$ es la perturbación a la que está sujeta cada subsistema

Aquí,

$$x_i(t) = \begin{bmatrix} y_i(t) \\ \dot{y}_i(t) \end{bmatrix}$$

$y_i(t)$ es el desplazamiento del piso i .

La fuerza de control $F_i(t)$ generada por el i -ésimo actuador para el subsistema n -ésimo está dada por

$$u_i(t) = \begin{cases} F_i(t), & i = 1 \\ -F_i(t), & i \neq 1 \end{cases}$$

A_i, B_i, C están dadas por:

$$\begin{aligned}
 A_i(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_i+k_{i+1}}{m_i} & -\frac{c_i+c_{i+1}}{m_i} \end{bmatrix} \\
 B_i(t) &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_i} \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

donde

k_i es la constante del resorte para el piso i

m_i es la masa del piso i

b_i es el coeficiente de amortiguamiento.

$T_i(t)$ se calcula como

$$T_i(t) = B_i(t)\hat{T}_i(t), i \in (1, \dots, n)$$

$\hat{T}_i(t)$ representa las perturbaciones a las que el sistema está sometido; las vibraciones debido al terremoto, la fuerza cortante del terremoto y la fuerza del viento. Está dada por

$$\begin{aligned}
 \hat{T}_i(t) &= \left\{ \begin{array}{l} L_i^T [e(t), \dot{e}(t)], i = 1 \\ H_i(t) + S_i, i = M, N \end{array} \right\} \\
 L_i(t) &= \begin{bmatrix} k_i \\ b_i \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$L_i(t)$ es la matriz de resorte amortiguador que aumenta la perturbación y la interconexión del piso i

$e(t)$ es la perturbación del terremoto en el primer piso

$H_i(t)$ es la fuerza del viento en el piso i

S_i es la fuerza cortante del viento en el piso i

La fuerza cortante S_i de una estructura de múltiples grados de libertad está dada por

$$S_i = \frac{V_i W_i h_i}{\sum_{t=1}^N W_t h_t}$$

$$V_i = Z Q N C S W_i$$

donde

W_i es el peso muerto de la estructura

h_i altura por encima del suelo en el centro de la pared

Z factor de zona sísmica

Q coeficiente de ocupación

S coeficiente de resonancia del sitio de la estructura

N coeficiente estructural

C factor dinámico

4.2. Modelo de un amortiguador magneteorológico (MR)

El amortiguador magneteorológico es un dispositivo de naturaleza altamente no lineal y su comportamiento presenta histéresis. La histéresis que presenta el amortiguador MR se debe a la relación de fuerza-velocidad. En la Figura 4.3 se puede observar la respuesta típica de fuerza-velocidad y fuerza-desplazamiento de un amortiguador MR bajo una excitación senoidal. La presencia de histéresis puede ocasionar problemas serios en los sistemas que se desean controlar como inestabilidad y pérdida de robustez [43].

Es necesario obtener un modelo matemático que pueda caracterizar el comportamiento no lineal de un amortiguador MR, de tal forma que sea posible evaluar su potencial para aplicaciones en control de sistemas estructurales así como para aprovechar sus características únicas. Dicho modelo matemático se obtiene a través de varios experimentos utilizando el amortiguador MR.

En general, se han propuesto varios modelos matemáticos que se pueden clasificar, dependiendo de la forma en la que se obtuvieron, en modelos paramétricos y modelos no paramétri-

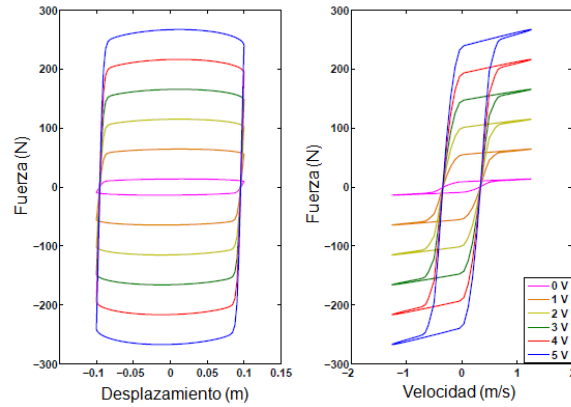


Figura 4.3: Respuesta típica de fuerza-velocidad y fuerza-desplazamiento de un amortiguador MR

cos. Los modelos paramétricos utilizan conceptos físicos como la fricción y la viscosidad para describir el comportamiento del amortiguador MR y los modelos no paramétricos utilizan técnicas como redes neuronales y lógica difusa para construir el modelo matemático de acuerdo a la información experimental obtenida.

4.2.1. Modelos paramétricos

Modelo Bingham

El modelo Bingham está basado en el modelo viscoplastico Bingham el cual se utiliza para describir el comportamiento de tensión-deformación de un fluido MR. Se asume que un cuerpo se comporta como un sólido hasta que se excede de un mínimo de fluencia y entonces exhibe una relación lineal entre la tensión y la velocidad de deformación.

El modelo Bingham consiste de un elemento de fricción de Coulomb colocado en paralelo con un amortiguador viscoso. Este modelo se puede observar en la Figura 4.4 donde x_{MR1} es el desplazamiento del pistón y f_{MR} es la fuerza que está dada por:

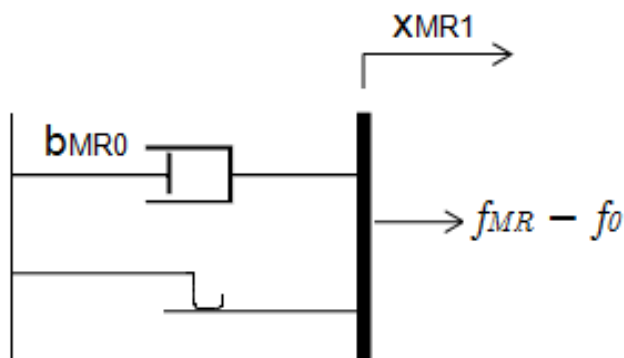


Figura 4.4: Diagrama del modelo Bingham

$$f_{MR} = f_f \cdot \text{sgn}(\dot{x}_{MR1}) + b_{MR0}\dot{x}_{MR1} + f_0 \quad (4.17)$$

donde f_f es la fuerza de fricción asociada con la fluencia del fluido, b_{MR0} es el coeficiente de amortiguamiento, \dot{x}_{MR1} es la velocidad del pistón y f_0 es un offset de la fuerza que se incluye para tomar en cuenta el nonzero mean observada en la fuerza que se mide debido a la presencia del acumulador presente en algunos actuadores. Cabe destacar que si en algún punto la velocidad del pistón es cero, la fuerza generada en el elemento de fricción es igual a la fuerza aplicada.

En la Figura 4.5 se observa la relación fuerza-desplazamiento y la relación fuerza-velocidad que se obtiene con el modelo Bingham. La simulación que se realiza para observar la capacidad de este modelo para reproducir la dinámica de un amortiguador MR, se realiza considerando para el desplazamiento x_{MR1} una señal senoidal de amplitud 1 y frecuencia de 1 rad/s , la fuerza de fricción f_f es de 1 N y f_0 es 1. Si se compara la respuesta obtenida utilizando el modelo Bingham en la Figura 4.5 con la respuesta típica de un amortiguador MR en la Figura 4.3, se puede observar que el modelo Bingham no modela el comportamiento con histéresis de un amortiguador MR, sino que describe una relación uno-a-uno. Esto puede no ser apropiado para aplicaciones de control de sistemas estructurales [43].

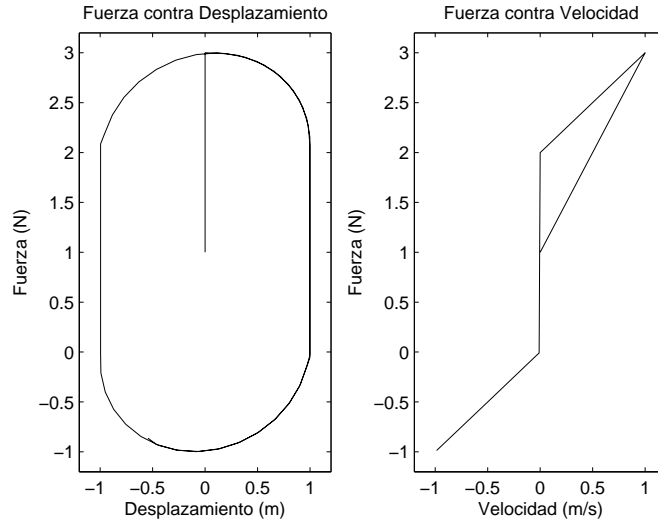


Figura 4.5: Relación fuerza-desplazamiento y relación fuerza-velocidad obtenida con el modelo Bingham

Modelo Bouc-Wen

El modelo Bouc-Wen es un modelo que se ha utilizado de forma extensiva para la caracterización de los sistemas con histéresis, ya que es uno de los modelos matemáticamente más sencillos y efectivos que pueden representar una gran variedad de comportamientos con histéresis.

En la Figura 4.6 se muestra dicho modelo. Las ecuaciones que gobiernan la fuerza producida por el amortiguador magnetoelástico están dadas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} f_{MR} &= b_{MR0}\dot{x}_{MR1}(t) + k_{MR0}(x_{MR1} - x_{MR0})(t) + \alpha z(t, x) \\ \dot{z} &= -\gamma |\dot{x}_{MR1}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x}_{MR1} |z|^n + \varphi \dot{x}_{MR1} \end{aligned} \quad (4.18)$$

donde

x_{MR1} es el desplazamiento en la ubicación en la que se encuentra el amortiguador; \dot{x}_{MR1} es la velocidad del pistón, z es la variable evolutiva que describe la histéresis del amortiguador

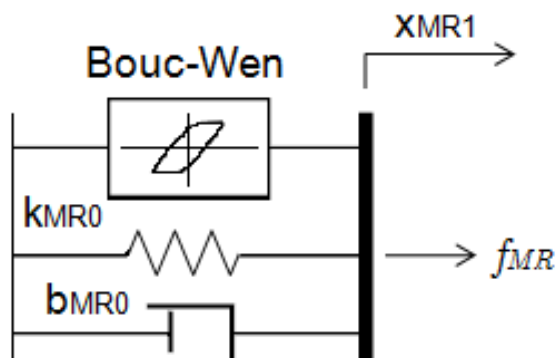


Figura 4.6: Diagrama del modelo Bouc-Wen

MR; γ, β, n y φ son parámetros que controlan la linealidad en la descarga y en la suavidad en la transición de la región de pre-tensión y post-tensión; k_{MR0}, b_{MR0} y α son parámetros que dependen del voltaje.

En la Figura 4.7 se observa la relación fuerza-desplazamiento y la relación fuerza-velocidad que se obtiene con el modelo Bouc-Wen. La simulación que se realiza para observar la capacidad de este modelo para reproducir la dinámica de un amortiguador MR, se realiza considerando para el desplazamiento x_{MR1} una señal senoidal de amplitud 1 y frecuencia de 1 rad/s . Adicionalmente, considerando las expresiones (4.22), tomando los parámetros de la Tabla 4.3 y considerando un voltaje constante de 3 V . Si se compara la respuesta obtenida utilizando el modelo Bouc-Wen en la Figura 4.7 con la respuesta típica de un amortiguador MR en la Figura 4.3, se puede observar que el modelo Bouc-Wen reproduce mejor la dinámica del amortiguador MR que el modelo Bingham.

Modelo Bouc-Wen modificado

En [13] se parte del Modelo Bouc-Wen con una modificación que permite modelar de forma precisa el comportamiento de un amortiguador MR. Este modelo se muestra en la Figura 4.8.

La fuerza total del modelo se expresa como:

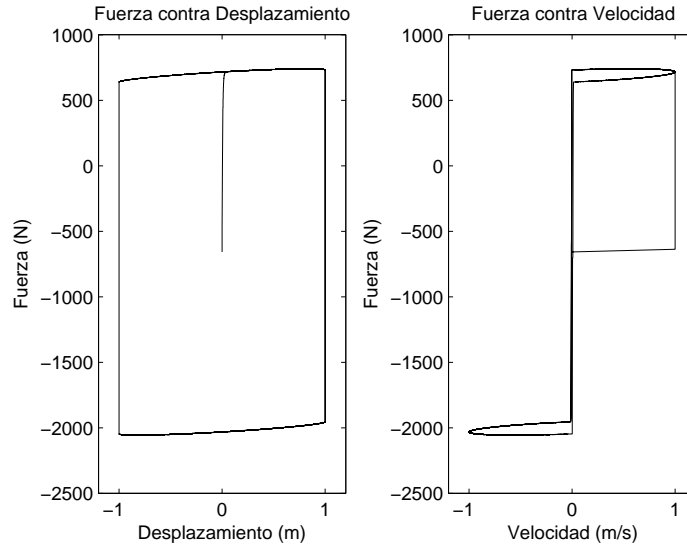


Figura 4.7: Relación fuerza-desplazamiento y fuerza-velocidad obtenida con el modelo Bouc-Wen

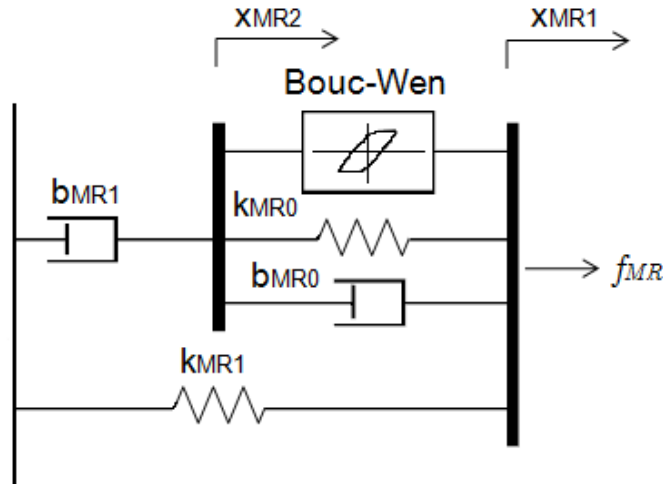


Figura 4.8: Diagrama del modelo Bouc-Wen modificado

$$f_{MR} = b_{MR1}\dot{x}_{MR2} + k_{MR1}(x_{MR1} - x_{MR0}) \quad (4.19)$$

$$\dot{x}_{MR2} = \frac{1}{(b_{MR0} + b_{MR1})}\alpha z + b_{MR0}\dot{x}_{MR1} + k_{MR0}(x_{MR1} - x_{MR2}) \quad (4.20)$$

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}_{MR1} - \dot{x}_{MR2}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x}_{MR1} - \dot{x}_{MR2})|z|^n + \varphi(\dot{x}_{MR1} - \dot{x}_{MR2}) \quad (4.21)$$

donde k_{MR1} es la rigidez del resorte, b_{MR0} es el amortiguamiento viscoso que se observa a grandes velocidades, b_{MR1} representa un amortiguador que se incluye en el modelo para producir el roll-off que se observa en los datos experimentales a bajas velocidades, k_{MR0} representa la rigidez a grandes velocidades, x_{MR0} es el desplazamiento inicial del resorte k_{MR1} , z es la variable evolutiva que describe la histéresis del amortiguador MR, α es la fluencia del fluido.

En la Figura 4.9 se observa la relación fuerza-desplazamiento y la relación fuerza-velocidad que se obtiene con el modelo Bouc-Wen. La simulación que se realiza para observar la capacidad de este modelo para reproducir la dinámica de un amortiguador MR, se realiza considerando para el desplazamiento x_{MR1} una señal senoidal de amplitud 1 y frecuencia de 1 *rad/s*. Adicionalmente, considerando las expresiones (4.22), tomando los parámetros de la Tabla 4.3 y para el voltaje se utiliza una señal senoidal de amplitud de 3 con frecuencia de 10 *rad/s*. Si se compara la respuesta obtenida utilizando el modelo Bouc-Wen en la Figura 4.9 con la respuesta típica de un amortiguador MR en la Figura 4.3, se puede observar que el modelo Bouc-Wen reproduce mejor la dinámica del amortiguador MR que el modelo Bingham.

Generalización del modelo Bouc-Wen Para obtener el desempeño óptimo de un sistema de control estructural, es necesario variar el voltaje y por ende, el campo magnético, basándose en la respuesta que se mide del sistema. De acuerdo a los resultados observados de forma experimental en [13], se observa que la fluencia α del fluido MR depende directamente de la fuerza del campo magnético. La fluencia varía linealmente con el voltaje aplicado y tiene un valor no cero en 0 V. Asimismo, las constantes de amortiguamiento viscoso varían linealmente con el voltaje aplicado. Se obtienen las siguientes expresiones:

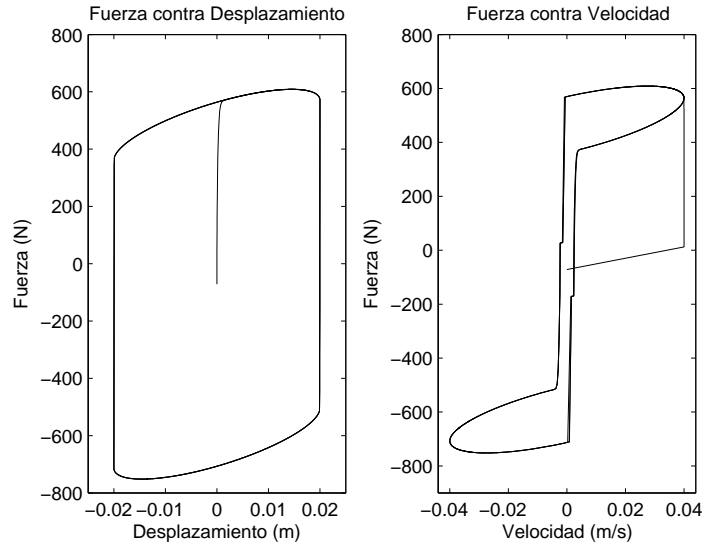


Figura 4.9: Relación fuerza-desplazamiento y fuerza-velocidad obtenida con el modelo Bouc-Wen modificado

$$\alpha = \alpha(v_c) = \alpha_a + \alpha_b v_c \quad (4.22)$$

$$b_1 = b_1(v_c) = b_{1a} + b_{1b} v_c$$

$$b_0 = b_0(v_c) = b_{0a} + b_{0b} v_c$$

La dinámica involucrada del fluido MR que se acerca al equilibrio reológico se toma en cuenta por el filtro de primer orden que se muestra a continuación:

$$\dot{v}_c = -\eta(v_c - v) \quad (4.23)$$

donde v es el voltaje aplicado al driver de corriente.

En la Figura 4.10 se muestra un comparativo entre el comportamiento del amortiguador MR que se obtuvo de manera experimental (realizado en [13]) y la respuesta que se obtuvo con el modelo. Es posible observar que el modelo propuesto caracteriza muy bien el

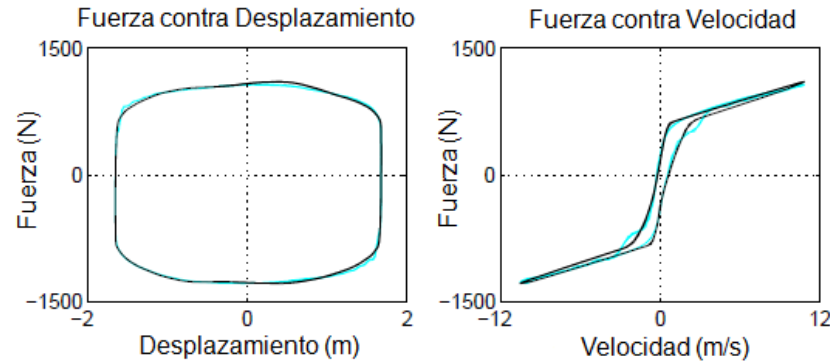


Figura 4.10: Relación fuerza-desplazamiento y fuerza-velocidad obtenidas de forma experimental y con el modelo Bouc-Wen modificado

comportamiento no lineal del amortiguador, en especial de la relación fuerza-velocidad.

4.2.2. Modelos no paramétricos

Modelos con redes neuronales

Las redes neuronales son ampliamente utilizadas ya que permiten modelar sistemas no lineales. Las redes neuronales se han explotado en el modelado de amortiguadores MR por la habilidad que tienen para aprender la relación que existe entre las entradas y las salidas. Una de las grandes ventajas de las redes neuronales es la facilidad de entrenarla para aprender la dinámica inversa del amortiguador MR; esto es, un modelo que produce la salida de una señal de control que hace que el amortiguador genere la fuerza de amortiguamiento deseada [43].

Modelos de lógica difusa

Se han utilizado metodologías de lógica difusa, como la de Sistema de Inferencia Neuro-Difusa Adaptable ANFIS, para modelar amortiguadores MR. La estructura del modelo ANFIS es similar a la de una red neuronal y es equivalente en cuanto a funcionalidad se refiere

a un sistema de inferencia difuso. Una red se puede utilizar para mapear entradas a través de funciones de membresía y parámetros asociados, y luego se mapean las salidas a través de funciones de membresía y parámetros asociados [43].

4.3. Modelo de un edificio de cinco pisos con amortiguador magneteorológico (MR)

En el presente trabajo se propone un edificio de cinco pisos que está sometido a las vibraciones provocadas por un sismo y se utiliza un amortiguador MR como actuador para compensar dichas vibraciones. La ecuación (4.5) se utiliza para el caso en el que $n = 5$. De esta manera, la matriz de masas queda expresada como:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

La matriz de amortiguamiento B_m tiene la forma:

$$B_m = \begin{bmatrix} b_{m1} + b_{m2} & -b_{m2} & 0 & 0 & 0 \\ -b_{m2} & b_{m2} + b_{m3} & -b_{m3} & 0 & 0 \\ 0 & -b_{m3} & b_{m3} + b_{m4} & -b_{m4} & 0 \\ 0 & 0 & -b_{m4} & b_{m4} + b_{m5} & -b_{m5} \\ 0 & 0 & 0 & -b_{m5} & b_{m5} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

La matriz de rigidez K tiene la forma:

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

El vector Λ , para las diferentes configuraciones propuestas, tiene la forma:

	Piso 1		Piso 3		Piso 5
$\Lambda =$	-1		0		0
	0		0		0
	0	$\Lambda =$	-1		0
	0		0		0
	0		0		-1

(4.27)

El vector Γ tiene la forma:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

y la fuerza $f(t)$ del amortiguador MR está descrita por la ecuación (4.19) del modelo Bouc-Wen modificado.

Representación en espacio de estados

En esta sección se presenta la representación en espacio de estados del edificio de cinco pisos propuesto. Se eligen las siguientes variables de estado:

$$\begin{aligned}
x_1 &= q_1 & x_6 &= \dot{q}_1 \\
x_2 &= q_2 & x_7 &= \dot{q}_2 \\
x_3 &= q_3 & x_8 &= \dot{q}_3 \\
x_4 &= q_4 & x_9 &= \dot{q}_4 \\
x_5 &= q_5 & x_{10} &= \dot{q}_5
\end{aligned}$$

A partir de lo cual es posible obtener:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= \dot{q}_1(t) = x_2 & \dot{x}_6 &= \ddot{q}_3(t) \\
\dot{x}_2 &= \ddot{q}_1(t) & \dot{x}_7 &= \dot{q}_4(t) = x_8 \\
\dot{x}_3 &= \dot{q}_2(t) = x_4 & \dot{x}_8 &= \ddot{q}_4(t) \\
\dot{x}_4 &= \ddot{q}_2(t) & \dot{x}_9 &= \dot{q}_5(t) = x_{10} \\
\dot{x}_5 &= \dot{q}_3(t) = x_6 & \dot{x}_{10} &= \ddot{q}_5(t)
\end{aligned}$$

A partir de esto es posible obtener la representación en espacio de estados como se presenta anteriormente para llegar a la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
\dot{x}(t) &= Ax(t) + B\Lambda u(t) + E\Gamma\ddot{q}_g(t) \\
y(t) &= Cx(t)
\end{aligned} \tag{4.29}$$

Por lo que se tienen las siguientes matrices:

$$A = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
a_{61} & a_{62} & 0 & 0 & 0 & a_{66} & a_{67} & 0 & 0 & 0 \\
a_{71} & a_{72} & a_{73} & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} & a_{78} & 0 & 0 \\
0 & a_{82} & a_{83} & a_{84} & 0 & 0 & a_{87} & a_{88} & a_{89} & 0 \\
0 & 0 & a_{93} & a_{94} & a_{95} & 0 & 0 & a_{98} & a_{99} & a_{910} \\
0 & 0 & 0 & a_{104} & a_{105} & 0 & 0 & 0 & a_{109} & a_{1010}
\end{bmatrix} \tag{4.30}$$

donde

$$\begin{aligned}
 a_{61} &= -\frac{(k_1+k_2)}{m_1}, a_{62} = \frac{k_2}{m_1}, a_{66} = -\frac{(b_{m1}+b_{m2})}{m_1}, a_{67} = \frac{b_{m2}}{m_1}, a_{71} = \frac{k_2}{m_2}, a_{72} = -\frac{(k_2+k_3)}{m_2}, \\
 a_{73} &= \frac{k_3}{m_2}, a_{76} = \frac{b_{m2}}{m_2}, a_{77} = -\frac{(b_{m2}+b_{m3})}{m_2}, a_{78} = \frac{b_{m3}}{m_2}, a_{82} = \frac{k_3}{m_3}, a_{83} = -\frac{(k_3+k_4)}{m_3}, a_{84} = \frac{k_4}{m_3}, \\
 a_{87} &= \frac{b_{m3}}{m_3}, a_{88} = -\frac{(b_{m3}+b_{m4})}{m_3}, a_{89} = \frac{b_{m4}}{m_3}, a_{93} = \frac{k_4}{m_4}, a_{94} = -\frac{(k_4+k_5)}{m_4}, a_{95} = \frac{k_5}{m_4}, a_{98} = \frac{b_{m4}}{m_4}, \\
 a_{99} &= -\frac{(b_{m3}+b_{m4})}{m_4}, a_{910} = \frac{b_{m5}}{m_4}, a_{104} = \frac{k_5}{m_5}, a_{105} = -\frac{k_5}{m_5}, a_{109} = \frac{b_{m5}}{m_5}, a_{1010} = -\frac{b_5}{m_5}
 \end{aligned}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_5} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

4.4. Simulación

4.4.1. Edificio de cinco pisos

En esta sección, se presenta una simulación del modelo del edificio de cinco pisos para comprobar la efectividad del mismo; considerando dos edificios con parámetros distintos. La comprobación de este modelo se realiza proponiendo dos señales de prueba. La primera señal consiste en una entrada cuadrada de amplitud 0,1 y de frecuencia de 1 *rad/s*. La segunda señal propuesta es una entrada senoidal con magnitud 2 y frecuencia de 0,5 *rad/s*. Estas señales se proponen como una perturbación a la que se somete el edificio para observar la respuesta obtenida.

Primer Edificio

Los parámetros del primer edificio se obtienen de [19] y se muestran en la Tabla 4.1:

Piso	Masa [kg]	Rigidez [$\frac{N}{m}$]	Amortiguamiento [$\frac{Ns}{m}$]
1	450,000	18,050,000	26,170
2	345,600	340,400,000	293,700
3	345,600	340,400,000	293,700
4	345,600	340,400,000	293,700
5	345,600	340,400,000	293,700

Tabla 4.1 Parámetros del primer edificio

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la simulación con ambas señales de prueba.

Primera señal de prueba En la Figura 4.11 se presenta la respuesta del sistema cuando se tiene como señal de entrada cuadrada de amplitud .0,1 y frecuencia de 1 rad/s .

Segunda señal de prueba En la Figura 4.12 se presenta la respuesta del sistema ante una entrada senoidal de amplitud 2 y frecuencia de 0,5 rad/s .

Segundo edificio

Los parámetros del segundo edificio se obtienen de [23] y se muestran en la Tabla 4.2.

Piso	Masa [kg]	Rigidez [$\frac{N}{m}$]	Amortiguamiento [$\frac{Ns}{m}$]
1	6,800	33,732,000	67,000
2	5,897	33,732,000	67,000
3	5,897	29,093,000	58,000
4	5,897	28,621,000	57,000
5	5,897	24,954,00	50,000

Tabla 4.2 Parámetros del segundo edificio

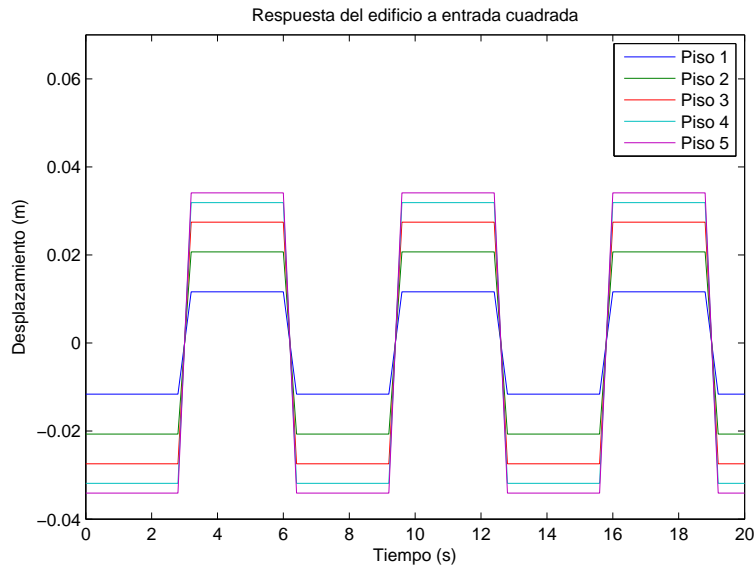


Figura 4.11: Respuesta del primer edificio a entrada cuadrada

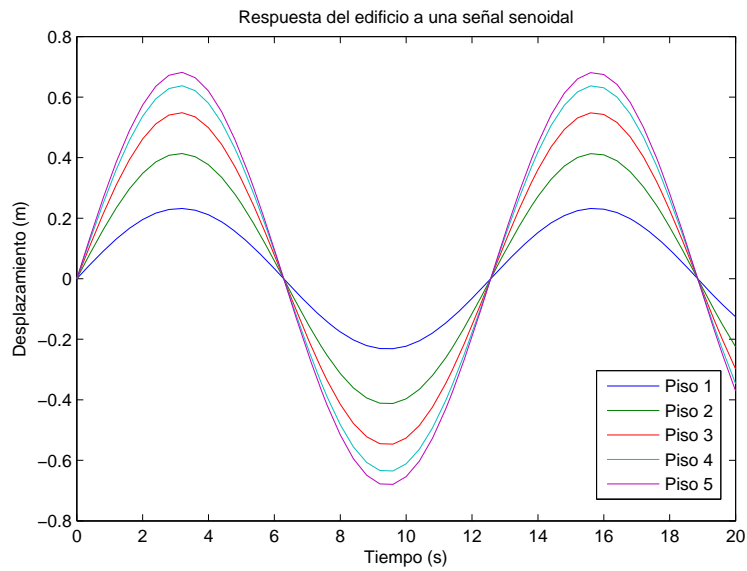


Figura 4.12: Respuesta del primer edificio a una entrada senoidal

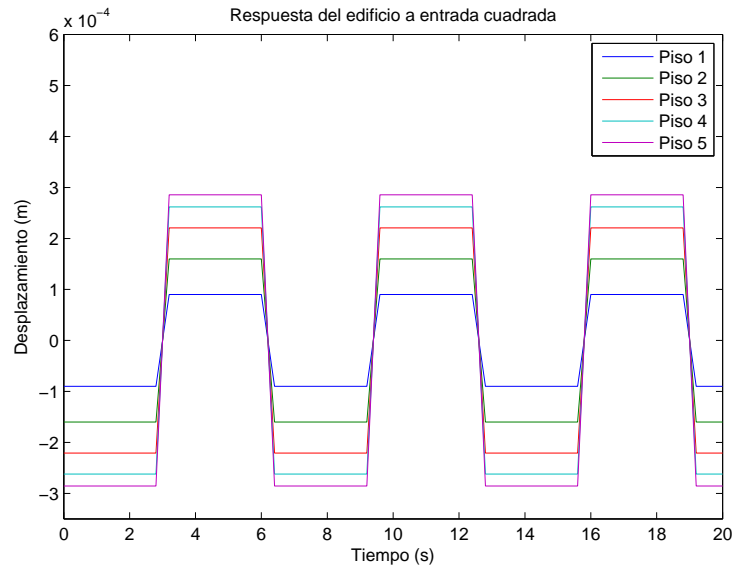


Figura 4.13: Respuesta del segundo edificio a entrada cuadrada

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la simulación con ambas señales de prueba.

Primera señal de prueba En la Figura 4.13 se presenta la respuesta del sistema cuando se tiene como señal de entrada cuadrada de amplitud 0,1 y frecuencia de 1 rad/s .

Segunda señal de prueba En la Figura 4.12 se presenta la respuesta del sistema ante una entrada senoidal de amplitud 2 y frecuencia de $0,5 \text{ rad/s}$.

Observaciones

Se puede observar de las figuras presentadas con anterioridad, que el edificio empieza a vibrar debido a la perturbación a la que se le somete. El primer piso es el que menos desplazamiento presenta, y este desplazamiento va incrementando su valor a medida que se incrementa la posición del piso. De tal forma que el quinto piso presenta el mayor despla-

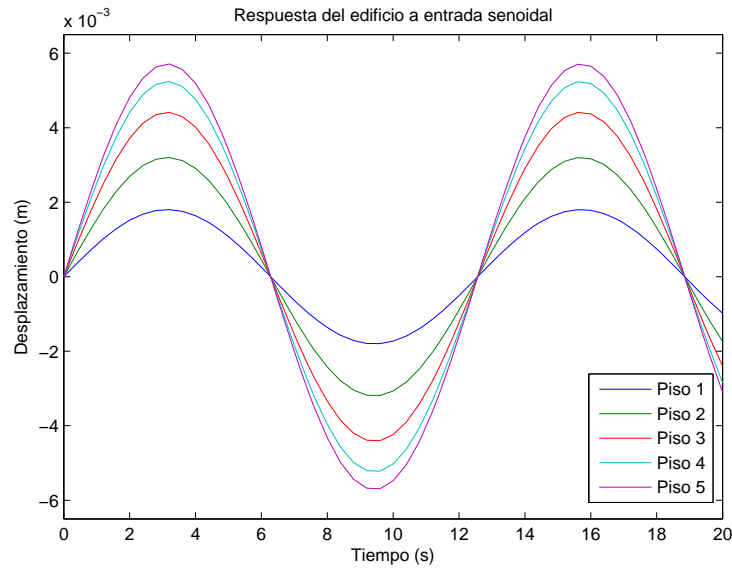


Figura 4.14: Respuesta del segundo edificio a entrada senoidal

miento de todos. Se puede apreciar también que cuando la masa del edificio es mayor, el desplazamiento es más grande.

4.4.2. Modelo del amortiguador magneteorológico (MR)

En esta sección se realizan varias simulaciones del amortiguador MR con el fin de comprobar su efectividad y comportamiento ante distintas señales de prueba. En la Tabla 4.3 se muestran los valores de los parámetros del amortiguador que se obtienen en [13] propuestos para dicha simulación.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
b_{0a}	$2,100 \frac{Ns}{m}$	γ	$3,630,000 \frac{1}{m^2}$
b_{0b}	$350 \frac{Ns}{mV}$	β	$3,630,000 \frac{1}{m^2}$
α_a	$14,000 \frac{N}{m}$	φ	301
α_b	$69,500 \frac{N}{mV}$	n	2
k_0	$4,690 \frac{N}{m}$	η	$190 \frac{1}{s}$
k_1	$500 \frac{N}{m}$	x_0	$0,143 m$

Tabla 4.3 Parámetros del amortiguador MR

Primera señal de prueba

La primera señal de prueba que se utiliza es una señal escalón de amplitud 1 para el voltaje aplicado como se observa en la Figura 4.15. De esta manera, se simula el caso en que se tiene un voltaje constante aplicado al amortiguador MR. Para el desplazamiento se utiliza una señal senoidal de amplitud de 0,02 con frecuencia de 2 rad/s como se muestra también en la Figura 4.15. Así, se simula un desplazamiento variable.

En la Figura 4.16 se observa la fuerza proporcionada por el amortiguador MR. Asimismo, la Figura 4.17 muestra la relación fuerza-desplazamiento así como también se observa la relación fuerza-velocidad.

Segunda señal de prueba La segunda señal de prueba que se utiliza es una señal senoidal de amplitud 3,5 y frecuencia de 5 rad/s para el voltaje aplicado como se observa en la Figura 4.18. En esta prueba se considera el caso en el que el voltaje aplicado al amortiguador MR es variable. Para el desplazamiento se utiliza una señal senoidal de amplitud de 0,1 con frecuencia de 10 rad/s como se muestra también en la Figura 4.18. En esta prueba también se considera que el desplazamiento es variable.

En la Figura 4.19 se observa la fuerza proporcionada por el amortiguador MR. Asimismo, la Figura 4.20 muestra la relación fuerza-desplazamiento y observa la relación fuerza-velocidad.

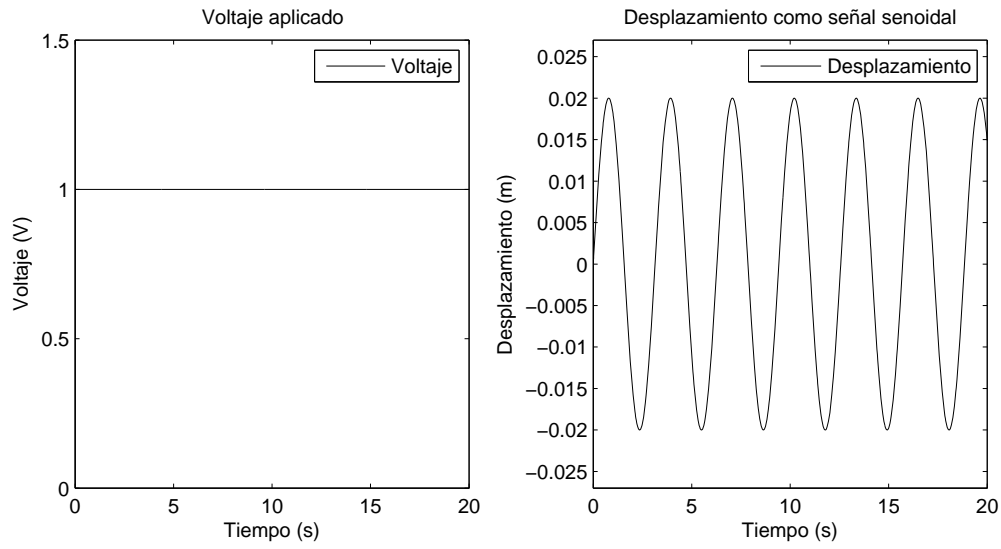


Figura 4.15: Voltaje aplicado

eba.

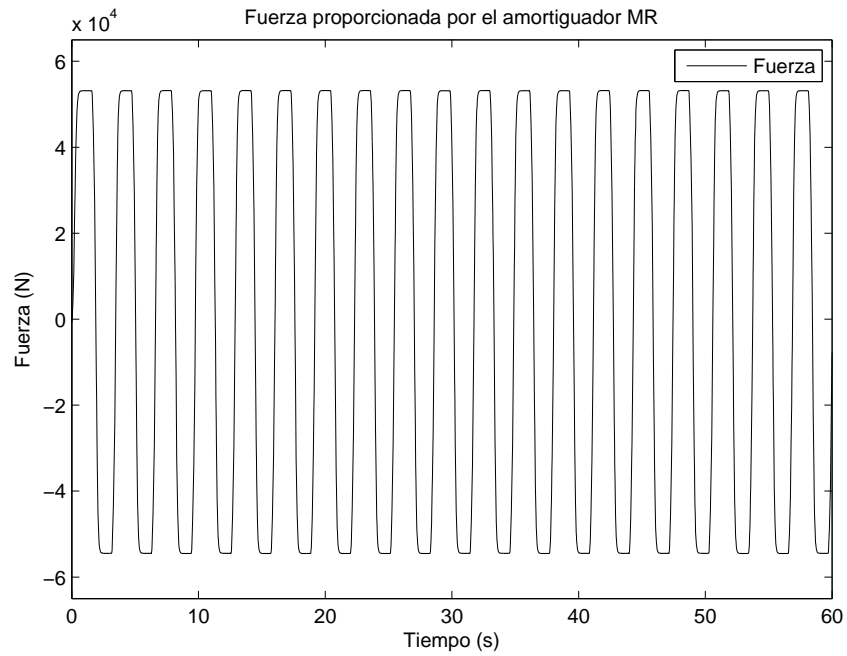


Figura 4.16: Fuerza proporcionada por el amortiguador MR en la primera prueba

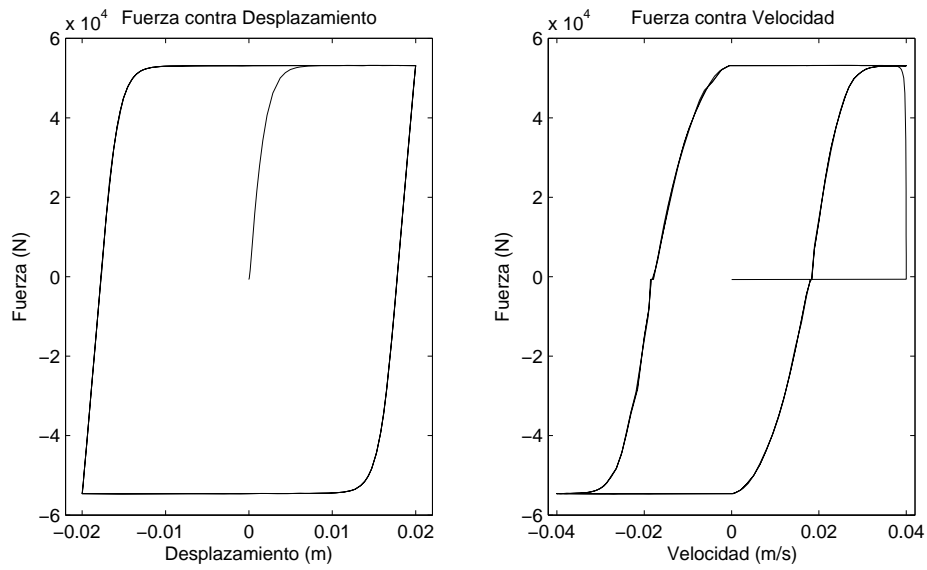


Figura 4.17: Relación Fuerza-Desplazamiento y Fuerza-Velocidad de la primera prueba.

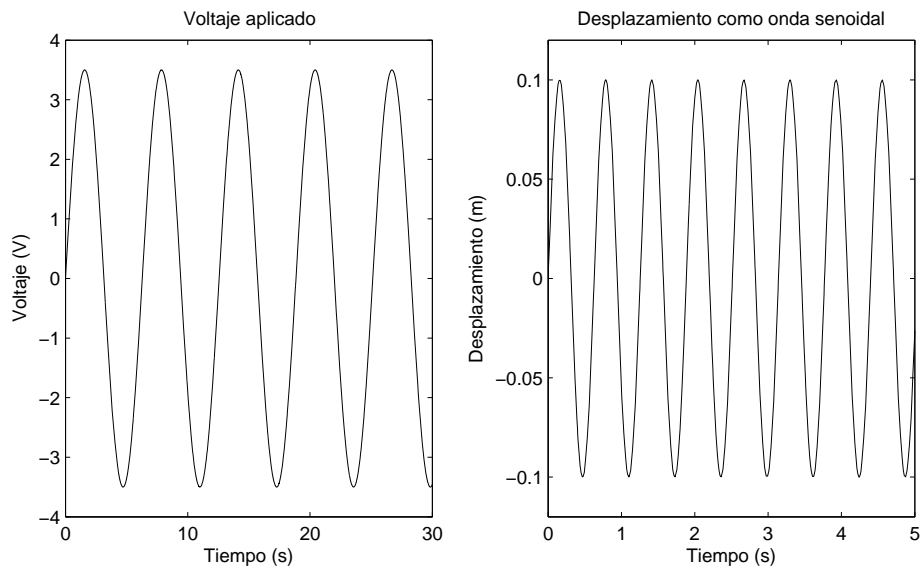


Figura 4.18: Voltaje y desplazamiento aplicados al amortiguador MR en la segunda prueba

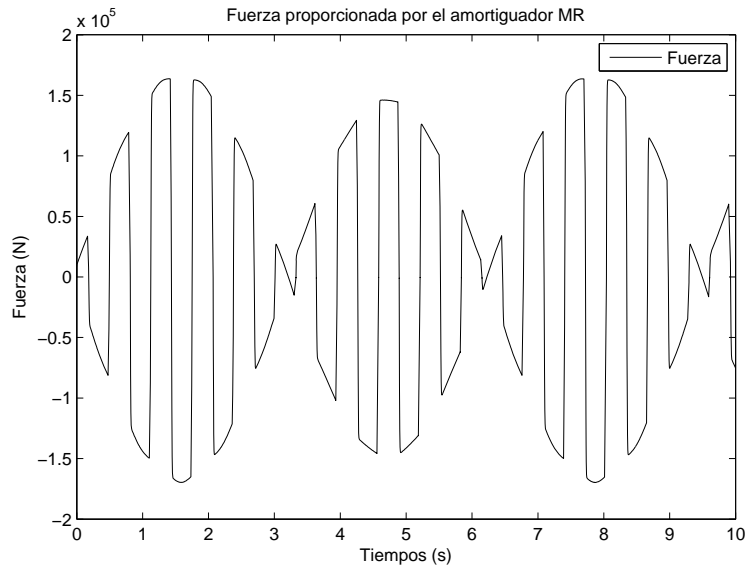


Figura 4.19: Fuerza proporcionada por el amortiguador MR en la segunda prueba

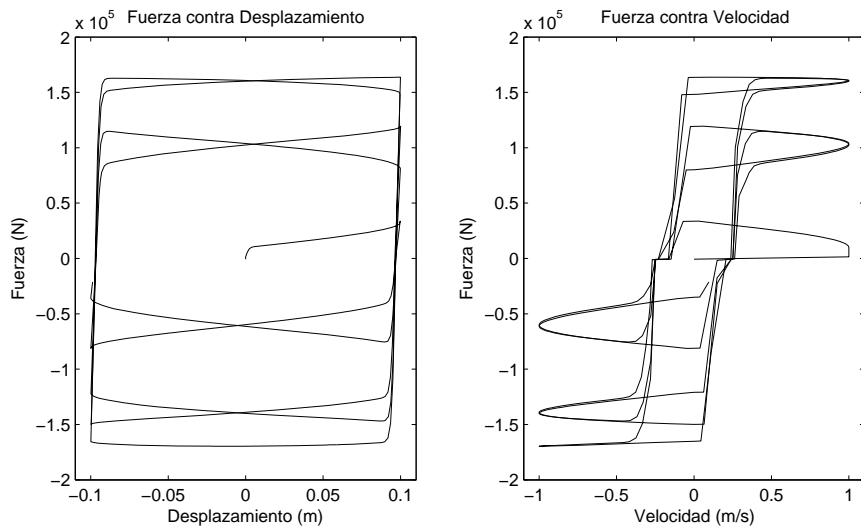


Figura 4.20: Relación Fuerza contra Desplazamiento y Fuerza contra Velocidad en la segunda prueba.

Observaciones En base a los resultados anteriores, se observa que con ambas señales de pruebas se obtiene una relación Fuerza-Desplazamiento no lineal; ésta coincide con el comportamiento esperado del amortiguador MR. En cuanto a la relación Fuerza-Velocidad se puede observar en ambas pruebas, que se obtiene un comportamiento con histéresis como es esperado. De esta forma se comprueba la validez y utilidad del modelo del amortiguador MR que se propone.

Capítulo 5

Control PID-difuso para una estructura de edificio contra vibraciones sísmicas

En este capítulo se comienza con la teoría de los conjuntos difusos presentando los conceptos básicos y las operaciones que se realizan con ellos; se introduce el concepto de variables lingüísticas; se presentan las reglas difusas “si-entonces” y los sistemas difusos basados en reglas. Finalmente, se presentan los tipos de controladores difusos, el diseño del controlador PID-difuso propuesto así como la simulación con las distintas configuraciones para el amortiguador MR. Asimismo, se compara el desempeño del controlador PID-difuso con un controlador difuso propuesto en la literatura.

5.1. Controlador PID

Un controlador PID-difuso es un controlador PID fuzzyficado, ya que actúa bajo las mismas señales de entrada, pero la estrategia de control se formula como reglas difusas. Se parte de la ecuación:

$$u = K_P e + K_D \dot{e} + K_I \int e dt \quad (5.1)$$

donde K_P es la ganancia proporcional, K_D es la ganancia derivativa, K_I es la ganancia integral; las cuales pueden ser ajustadas, e es el error.

El error está definido como:

$$e = q_{sp} - q_i, i = 1, 3, 5$$

donde q_{sp} es la referencia y q_i es el desplazamiento del piso i . Ya que el objetivo de control es compensar la perturbación causada por el terremoto, se desea que el desplazamiento sea cero; es decir, $q_{sp} = 0$, por lo que el error es:

$$e = -q_i, i = 1, 3, 5 \quad (5.2)$$

La derivada del error es:

$$\dot{e} = -\dot{q}_i, i = 1, 3, 5 \quad (5.3)$$

5.2. Controlador difuso

La lógica difusa se introduce en 1965 por Lofti Zadeh. La palabra difusa se utiliza aquí para describir términos que no se conocen bien, que no son suficientemente claros o su especificación depende de la subjetividad, la estimación e incluso de la intuición de la persona que describe estos términos. En la vida diaria, existen muchas situaciones que se caracterizan con un cierto grado de imprecisión cuya descripción incluye términos y expresiones como: “la mayoría”, “muchos”, “no exactamente”, “bajo”, “frecuentemente”, “pocos” o “muy posible”. Todos estos términos pueden ser calificados como difusos. En general, la lógica difusa provee de una estructura de inferencia que provee de la capacidad de representar expresiones lingüísticas y razonamiento humano.

En la lógica clásica, el valor de verdad de las proposiciones es 1 ó 0. La lógica difusa generaliza la lógica bivaluada permitiendo que los valores de verdad de una proposición sea cualquier número del intervalo $[0, 1]$. Esta generalización permite realizar un razonamiento aproximado; esto es, deducir conclusiones imprecisas a partir de una colección de premisas imprecisas.

La lógica difusa ha cobrado popularidad por la variedad de los problemas en los que se ha utilizado con éxito; incluyendo procesos industriales complejos, diseño de dispositivos electrónicos para el uso doméstico y de entretenimiento y sistemas de diagnóstico, entre otros.

Los sistemas difusos consisten de cuatro componentes: base de reglas difusas, método de inferencia difusa, fuzzyficador y defuzzyficador; las cuales se presentan a continuación.

Los sistemas difusos son sistemas basados en conocimiento o basados en reglas. La parte central de un sistema difuso es una base de conocimiento que consiste en una serie de reglas difusas del tipo “si-entonces”. Una regla difusa del tipo “si-entonces” es un enunciado condicional expresado como:

$$\text{Si } \langle PD1 \rangle, \text{ Entonces } \langle PD2 \rangle \quad (5.4)$$

donde $PD1$ y $PD2$ son proposiciones difusas. Se asume que $PD1$ es una relación difusa definida en $U = U_1 \times \dots \times U_n$ y $PD2$ es una relación difusa definida en $V = V_1 \times \dots \times V_m$.

La principal diferencia entre las proposiciones clásicas y las proposiciones difusas es el rango de sus valores de verdad. Una proposición clásica es una lógica bivaluada en el que solamente puede tomar dos valores: verdadera o falso. Por el contrario, la verdad o falsedad de las proposiciones difusas es cuestión de grado.

Existen dos tipos de proposiciones difusas [39]:

1. Proposiciones difusas atómicas: estas proposiciones son enunciados sencillos de la forma:

$$x \text{ es } A$$

donde x es una variable lingüística y A es un valor lingüístico de x .

2. Proposiciones difusas compuestas: estas proposiciones son composiciones de proposiciones difusas atómicas usando conectores “y”, “o” y “no” que representan la intersección difusa, la unión difusa y la negación difusa, respectivamente. Estas proposiciones difusas son de la forma:

$$\begin{aligned} &x \text{ es } A \text{ o } x \text{ es no } B \\ &x \text{ es no } A \text{ y } x \text{ es no } B \\ &(x \text{ es } A \text{ y } x \text{ es no } B) \text{ o } x \text{ es } C \end{aligned}$$

En una proposición difusa compuesta, las proposiciones difusas atómicas son independientes; es decir, las variables x en una misma proposición pueden ser distintas variables. En general, dichas variables no son la misma.

Debido a que hay una gran variedad de operadores de complemento difusos, unión difusos e intersección difusos, un gran número de distintas interpretaciones de las reglas difusas “si-entonces” se han propuesto. En esta sección se exponen algunas de ellas. Se parte de (5.4) y se considera que x y y son variables lingüísticas en U y V , respectivamente.

- Implicación Dienes-Rescher: la regla difusa “si-entonces” (5.4) se interpreta como una relación difusa Q_D en $U \times V$ con función de membresía:

$$\mu_{Q_D}(x, y) = \text{máx} [1 - \mu_{FP1}(x), \mu_{FP2}(y)] \quad (5.5)$$

- Implicación Lukasiewicz: la regla difusa “si-entonces” (5.4) se interpreta como una relación difusa Q_L en $U \times V$ con función de membresía:

$$\mu_{Q_L}(x, y) = \text{mín} [1, 1 - \mu_{FP1}(x) + \mu_{FP2}(y)] \quad (5.6)$$

- Implicación Zadeh: la regla difusa “si-entonces” (5.4) se interpreta como una relación difusa Q_Z en $U \times V$ con función de membresía:

$$\mu_{Q_Z}(x, y) = \text{máx} [\text{mín} (\mu_{FP1}(x), \mu_{FP2}(y)), 1 - \mu_{FP1}(x)] \quad (5.7)$$

- Implicación Gödel: la regla difusa “si-entonces” (5.4) se interpreta como una relación difusa Q_G en $U \times V$ con función de membresía:

$$\mu_{Q_G}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } \mu_{FP1}(x) \leq \mu_{FP2}(y) \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (5.8)$$

- Implicación Mamdani: la regla difusa “si-entonces” (5.4) se interpreta como una relación difusa Q_{MM} o Q_{MP} en $U \times V$ con función de membresía:

$$\mu_{Q_{MM}}(x, y) = \min[\mu_{FP1}(x), \mu_{FP2}(y)] \quad (5.9)$$

$$\mu_{Q_{MP}}(x, y) = \mu_{FP1}(x)\mu_{FP2}(y) \quad (5.10)$$

Las implicaciones de Mamdani son las implicaciones más utilizadas en los sistemas difusos y en el control difuso y es la implicación que se utiliza en este trabajo.

Una base de reglas difusas consiste en un conjunto de reglas difusas “si-entonces”. Todos los componentes del sistema difuso se utilizan para implementar estas reglas en una manera razonable y eficiente. La base de reglas difusas consiste de las siguientes reglas difusas:

$$Ru^{(l)}: \text{Si } x_1 \text{ es } A_1^l \text{ y } \dots \text{ y } x_n \text{ es } A_n^l, \text{ Entonces } u \text{ es } B^l \quad (5.11)$$

donde:

A_i^l y B^l son conjuntos difusos en $U_i \subset \mathbb{R}$ y $V \subset \mathbb{R}$, respectivamente

$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in U$ y $u \in V$ son las variables lingüísticas de entrada y de salida del sistema difuso, respectivamente

Sea M el número de reglas en la base de reglas difusas; esto es, $l = 1, 2, \dots, M$

A las reglas que se encuentran en la forma de (5.11) se le llama forma canónica de las reglas difusas “si-entonces” porque incluyen otras formas de reglas difusas y proposiciones difusas como casos especiales.

En un mecanismo de inferencia difusa, los principios lógicos difusos se utilizan para combinar las reglas difusas “si-entonces” de la base de reglas difusas en un mapeo de un conjunto difuso A' en U a un conjunto difuso B' en V . Existen dos clases de mecanismo de inferencia difusa:

1. Inferencia basada en composición: todas las reglas en la base de reglas difusas se combinan en una sólo relación difusa en $U \times V$, la cual se ve entonces como una sola regla difusa “si-entonces”.
2. Inferencia basada en reglas individuales: cada regla de la base de reglas difusas determina una salida difusa y la salida de todo el mecanismo de inferencia difusa es la combinación de M conjuntos difusos individuales.

El fuzzyficador está definido como el mapeo de un punto de valor real $x^* \in U \subset \mathbb{R}^n$ a un conjunto difuso A' en U . Existen distintos tipos de fuzzyficadores entre los cuales están el fuzzyficador Singleton, Gaussiano y Triangular que se presentan a continuación:

- Fuzzyficador Singleton: este fuzzyficador mapea un punto de valor real $x^* \in U$ en un singleton difuso A' en U , que tiene un valor de membresía de 1 en x^* y 0 en todos los demás puntos en U ; esto es:

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x^* \\ 0 & \text{si } x \neq x^* \end{cases} \quad (5.12)$$

- Fuzzyficador Gaussiano: este fuzzyficador mapea $x^* \in U$ en un conjunto difuso A' en U , cuya función de membresía Gaussiana es la siguiente:

$$\mu_{A'}(x) = e^{-\left(\frac{x_1-x_1^*}{a_1}\right)^2} * \dots * e^{-\left(\frac{x_n-x_n^*}{a_n}\right)^2} \quad (5.13)$$

donde a_i son parámetros positivos y la norma-T* se escoge como el producto algebraico o el min.

- Fuzzyficador Triangular: este fuzzyficador mapea $x^* \in U$ en un conjunto difuso A' en U , cuya función de membresía triangular:

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|x_1-x_1^*|}{b_1}\right) * \dots * \left(1 - \frac{|x_n-x_n^*|}{b_n}\right) & \text{si } |x_i - x_i^*| \leq b_i, i = 1, 2, \dots, n \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (5.14)$$

donde b_i son parámetros positivos y la norma-T* se escoge como el producto algebraico o el min.

El fuzzyficador que se utiliza en el desarrollo de este trabajo es el fuzzyficador Singleton.

Un defuzzyficador está definido como el mapeo de un conjunto difuso B' en $V \subset \mathbb{R}$, la cual es la salida del conjunto del mecanismo de inferencia difusa, a un punto crisp $y^* \in V$. Conceptualmente, la tarea de un defuzzyficador es especificar un punto en V que mejor represente el conjunto difuso B' . Existen distintos tipos de defuzzyficadores como el defuzzyficador centro de gravedad, centro promedio y máximo. El defuzzyficador que se utiliza en este trabajo de tesis es el de centro de gravedad. Se presentan a continuación dichos defuzzyficadores:

- Defuzzyficador centro de gravedad: este defuzzyficador especifica u^* como el centro del área cubierta por la función de membresía de B' ; esto es:

$$u^* = \frac{\int_V y \mu_{B'}(y) dy}{\int_V \mu_{B'}(y) dy} \quad (5.15)$$

donde \int_V es la integral convencional. La ventaja del centro de gravedad radica en su intuitiva factibilidad. La desventaja de este defuzzyficador es que requiere de mucho procesamiento. De hecho, la función de membresía $\mu_{B'}(y)$ es por lo general, irregular por lo que las integrales de la ecuación (5.15) son difíciles de calcular. El siguiente defuzzyficador intenta superar esta desventaja aproximando (5.15) por medio de una fórmula más sencilla.

- Defuzzyficador centro promedio: ya que el conjunto difuso B' es la unión o intersección de M conjuntos difusos (5.15) es el promedio ponderado de los centros de los M conjuntos difusos, con los pesos iguales a las alturas del conjunto difuso correspondiente. Específicamente, sea \bar{y}^l el centro del l -ésimo conjunto difuso y w_l su altura, el centro promedio es:

$$u^* = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l w_l}{\sum_{l=1}^M w_l} \quad (5.16)$$

El defuzzyficador del centro promedio es el más comúnmente utilizado en los sistemas difusos y el control difuso. Es computacionalmente sencillo e intuitivamente factible. Adicionalmente, cambios pequeños en \bar{y}^l y w_l resultan en cambios pequeños en y^* .

- Defuzzyficador máximo: este defuzzyficador elige y^* como el punto en V en el cual $\mu_{B'}(y)$ alcanza su valor máximo. Se define el conjunto:

$$hgt(B') = \left\{ u \in V \mid \mu_{B'}(u) = \sup_{y \in V} \mu_{B'}(y) \right\} \quad (5.17)$$

esto es, $hgt(B')$ es el conjunto de todos los puntos en V en los cuales $\mu_{B'}(y)$ alcanza su valor máximo. El defuzzyficador máximo define y^* como un elemento arbitrario en $hgt(B')$. Si $hgt(B')$ contiene un sólo punto, y^* está definido de forma única. Si $hgt(B')$ contiene más de un punto, entonces se puede utilizar el más pequeño del defuzzyficador máximo,

$$u^* = \inf \{ y \in hgt(B') \} \quad (5.18)$$

el más grande del defuzzyficador máximo,

$$u^* = \sup \{ y \in hgt(B') \} \quad (5.19)$$

o la media del defuzzyficador máximo:

$$u^* = \frac{\int_{hgt(B')} u dy}{\int_{hgt(B')} dy} \quad (5.20)$$

En la Figura 5.1 se muestra un esquema de la estructura de un controlador difuso.

Existen dos tipos de controladores difusos: el controlador tipo Mamdani y el controlador tipo Sugeno. Estos dos controladores utilizan el mismo esquema de inferencia, pero difieren en el método de activación y la forma en la que se obtienen las consecuencias de las funciones de membresía.

Las reglas del controlador tipo Mamdani son de la forma:

$$\text{Si } x_1 \text{ es } A_1 \text{ y } x_2 \text{ es } A_2 \text{ y } \dots \text{ y } x_n \text{ es } A_n \text{ Entonces } u \text{ es } B_1 \quad (5.21)$$

La principal diferencia entre el controlador tipo Mamdani y el controlador tipo Sugeno, es la consecuencia de las reglas difusas. En el controlador Sugeno, la salida es una función

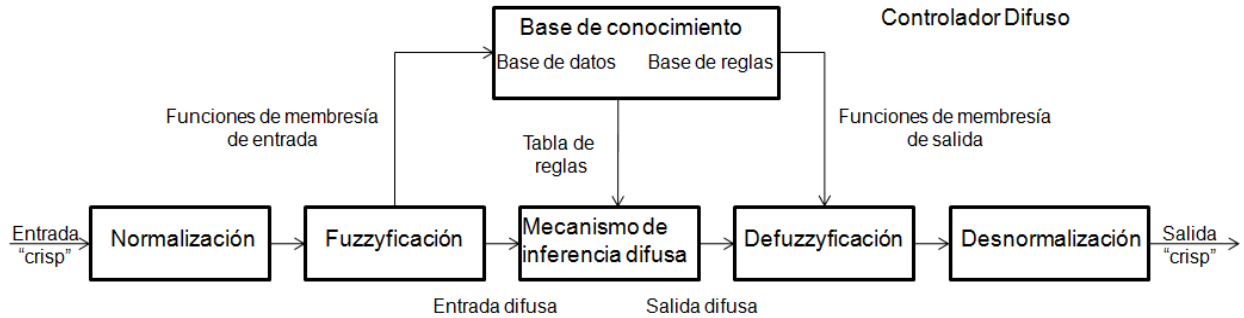


Figura 5.1: Esquema de la estructura de un controlador difuso.

lineal de las entradas y no un conjunto difuso como el caso del controlador Mamdani. Las reglas son de la forma:

$$\text{Si } A_1(x_1), A_2(x_2), \dots, A_n(x_n) \text{ Entonces } u = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5.22)$$

donde $f = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$.

5.3. Controlador PID-difuso

Debido a que el controlador PID-difuso trabaja con muchas más reglas que un controlador PD-difuso y un controlador PI-difuso, es posible separar el controlador PID-difuso en una estructura en paralelo de un controlador PD-difuso y un controlador PI-difuso como se muestra en la Figura 5.2 y por lo tanto la ecuación del PID-difuso para esta nueva estructura está dada por:

$$u = \left(\frac{K_P}{2}e + K_D\dot{e} \right) + \left(\frac{K_P}{2}e + K_I \int edt \right) \quad (5.23)$$

donde el término $\frac{K_P}{2}e + K_D\dot{e}$ corresponde al controlador PD-difuso y el término $\frac{K_P}{2}e + K_I \int edt$ corresponde al controlador PI-difuso.

- Controlador PD-difuso:

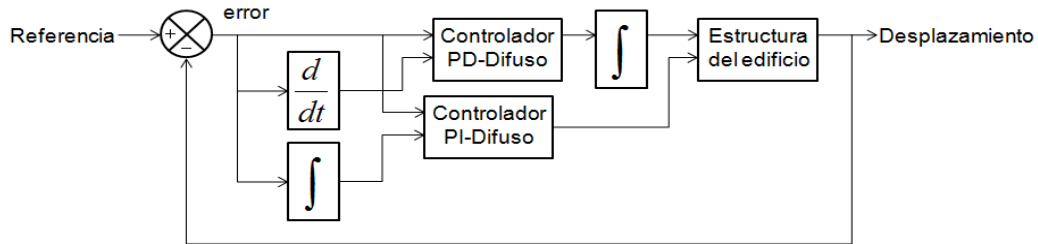


Figura 5.2: Controlador PID-difuso como controlador PD-difuso y controlador PI-difuso en paralelo

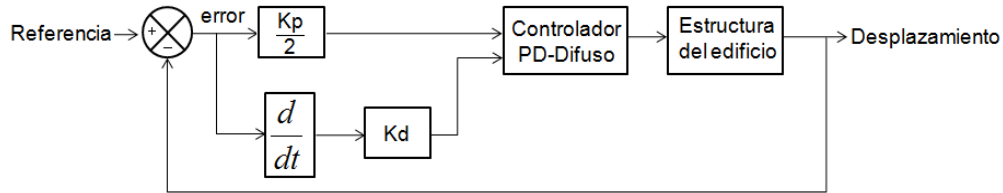


Figura 5.3: Diagrama de un controlador PD-difuso

La Figura 5.3 muestra el esquema del controlador PD-difuso. La ecuación de un controlador PD está dada por:

$$u = K_P e + K_D \dot{e} \quad (5.24)$$

■ Controlador PI-difuso:

La Figura 5.4 muestra el esquema del controlador PI-difuso. La ecuación de un controlador PI-difuso está dada por:

$$u = K_P e + K_I \int e dt \quad (5.25)$$

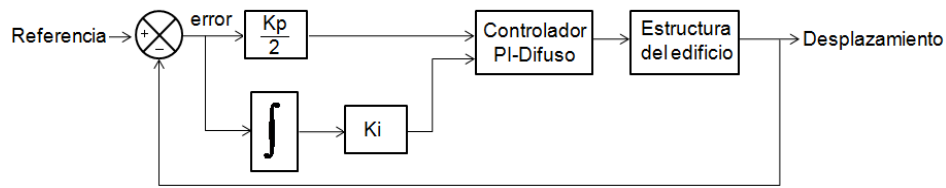


Figura 5.4: Diagrama de un controlador PI-difuso

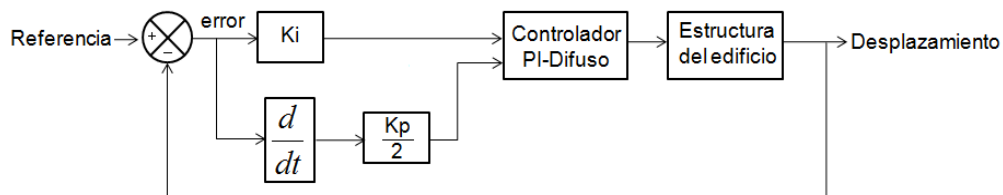


Figura 5.5: Diagrama de un controlador PI-difuso alterno

En algunas ocasiones es complicado formular las reglas difusas dependiendo de la integral del error debido a que puede tener un universo de discurso muy grande. Para solucionar este problema es posible formular de forma distinta el controlador PI como se muestra en la Figura 5.5. La ecuación del controlador PI-difuso se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_P \frac{de(t)}{dt} + K_I e \quad (5.26)$$

De acuerdo a la ecuación (5.26), se tiene nuevamente el error y el cambio del error. Para obtener la salida del controlador es necesario integrarla. Se puede ver la salida del controlador como un cambio en la señal de control.

El controlador PID-difuso que se propone en este trabajo es de tipo Mamdani. En las siguientes secciones se presenta el diseño del controlador PID-difuso como un controlador PD-difuso y un controlador PI-difuso en paralelo.

Las entradas del controlador PD-difuso de tipo Mamdani y del controlador PI-difuso es el error y la derivada del error; para las cuales se definen tres funciones de membresía para cada

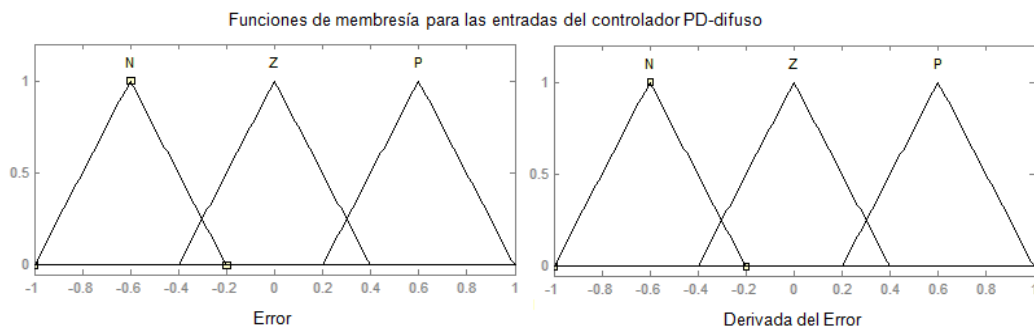


Figura 5.6: Funciones de membresía de las entradas del controlador PD-difuso

entrada: positivo “P”, cero “Z” y negativo “N”. La salida del controlador PD-difuso es el voltaje que se aplica al amortiguador MR para variar el amortiguamiento que proporciona. Para la salida se definen cinco funciones de membresía: positivo mediano “PM”, positivo pequeño “PP”, cero “Z”, negativo mediano “NM” y negativo pequeño “NP”. Las funciones de membresía en todos los casos son triangulares y se describen con la siguiente expresión:

$$\mu(x) = 1 - abs\left(\frac{(1-x)}{\sigma}\right) \quad (5.27)$$

En la Figura 5.6 se observan las funciones de membresía para las entradas del controlador PD-difuso y en la Figura 5.7 se observan las funciones de membresía para las entradas del controlador PI-difuso. En la Figura 5.8 se observa las funciones de membresía de la salida de ambos controladores.

Para ambos controladores PD-difuso y el controlador PI-difuso se establecen 9 reglas difusas como sigue:

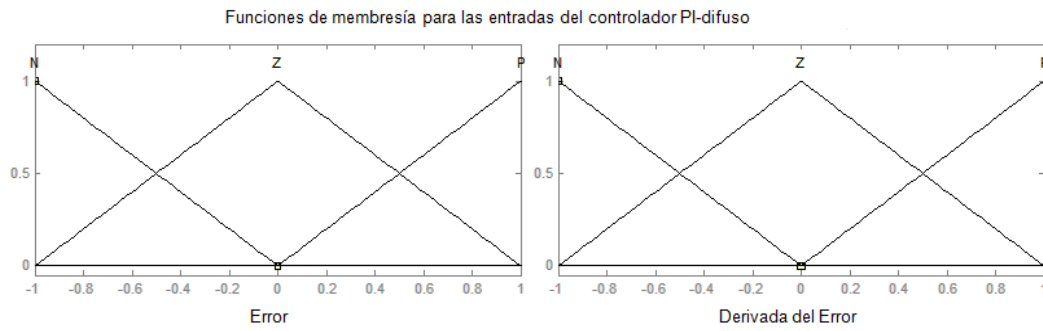


Figura 5.7: Funciones de membresía de las entradas del controlador PI-difuso

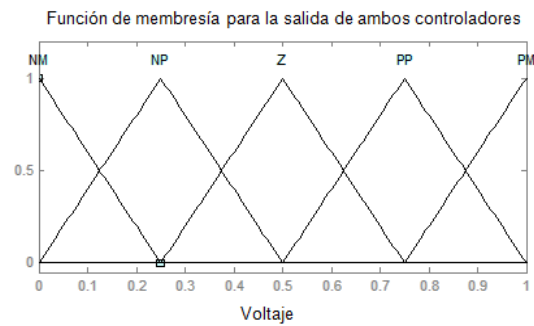


Figura 5.8: Funciones de membresía de la salida de ambos controladores

Si e es N y \dot{e} es N Entonces y es PM
 Si e es N y \dot{e} es Z Entonces y es PP
 Si e es N y \dot{e} es P Entonces y es Z
 Si e es Z y \dot{e} es N Entonces y es PP
 Si e es Z y \dot{e} es Z Entonces y es Z
 Si e es Z y \dot{e} es P Entonces y es NP
 Si e es P y \dot{e} es N Entonces y es Z
 Si e es P y \dot{e} es Z Entonces y es NP
 Si e es P y \dot{e} es P Entonces y es NM

Para la implementación de la base de reglas difusas se utiliza para la intersección difusa la expresión (??) y para la implicación difusa se utiliza la implicación de Mamdani descrita en la ecuación (5.9).

El fuzzyficador que se utiliza es el fuzzyficador Singleton descrito por la ecuación:

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x^* \\ 0 & \text{si } x \neq x^* \end{cases} \quad (5.28)$$

El defuzzyficador que se utiliza es el defuzzyficador centro de gravedad descrito por la ecuación:

$$y^* = \frac{\int_V y \mu_{B'}(y) dy}{\int_V \mu_{B'}(y) dy} \quad (5.29)$$

En la Figura 5.9 y en la Figura 5.10 se observa la activación de reglas para el controlador PD-difuso y para el controlador PI-difuso respectivamente. Por ejemplo, si el error tiene un valor $-0,5$ y su derivada es de $0,3$, se obtiene un voltaje de $0,652$ en la salida del controlador PD-difuso y un voltaje en la salida de $0,535$ en el controlador PI-difuso. Por lo que el controlador PID-difuso tendría a la salida un voltaje total de $1,187$.

En la Figura 5.11 se presenta la superficie de control del controlador PD-difuso y del controlador PI-difuso.

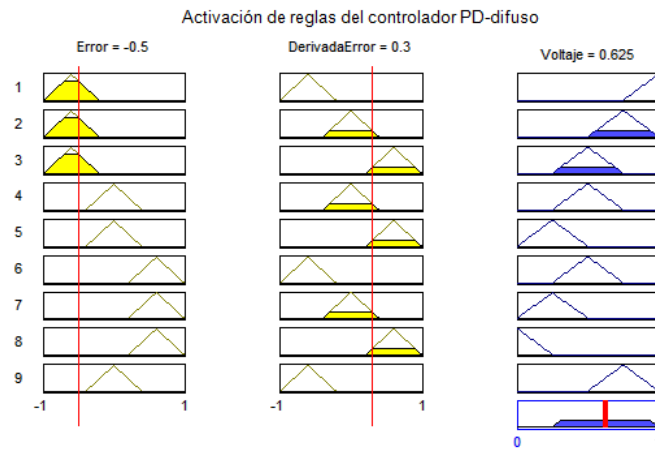


Figura 5.9: Activación de reglas para el controlador PD-difuso

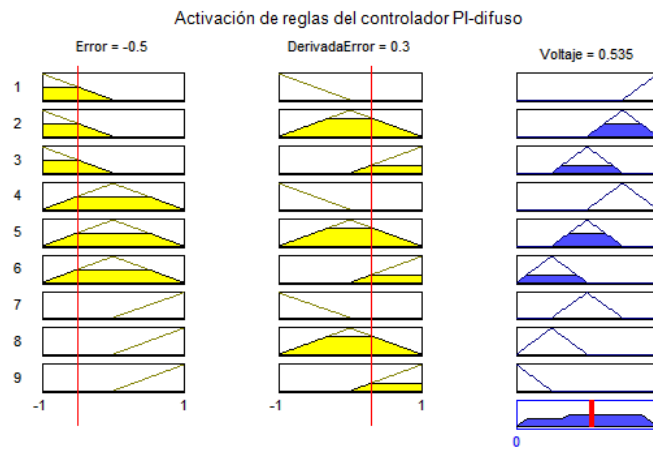


Figura 5.10: Activación de reglas para el controlador PI-difuso

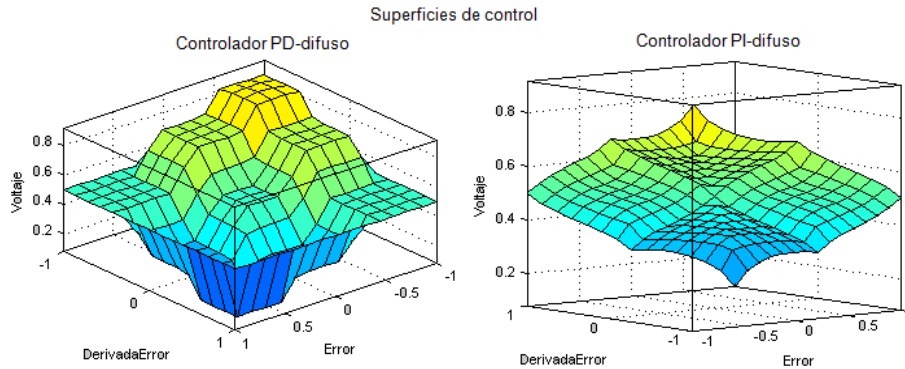


Figura 5.11: Superficies de control del PID-difuso

5.4. Simulaciones

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la simulación de la implementación del controlador PID-Difuso. Se considera que se tienen disponibles los desplazamientos de los cinco pisos con respecto al piso. Se implementan la expresión de la ecuación (4.29) para el edificio de cinco pisos y las ecuaciones (4.19) para el amortiguador MR. Se toman los parámetros de la Tabla 4,1 para el edificio y los parámetros de la Tabla 4,3 para el amortiguador MR. Como se menciona anteriormente, se prueban diferentes configuraciones del controlador semi-activo eligiendo apropiadamente el vector Λ de acuerdo a (4.27).

En las secciones siguientes se presentan los resultados obtenidos en la simulación de cada configuración. En la Figura 5.12 se observa el acelerograma del terremoto El Centro que se utiliza en esta simulación.

Amortiguador MR colocado en el primer piso

En la Figura 5.13 se presenta el desplazamiento de los cinco pisos cuando el amortiguador MR se coloca en el piso 1. En la Figura 5.14 se observa el error en el desplazamiento del piso 1, el voltaje aplicado al amortiguador MR y la fuerza proporcionada por el amortiguador MR.

Amortiguador MR colocado en el tercer piso

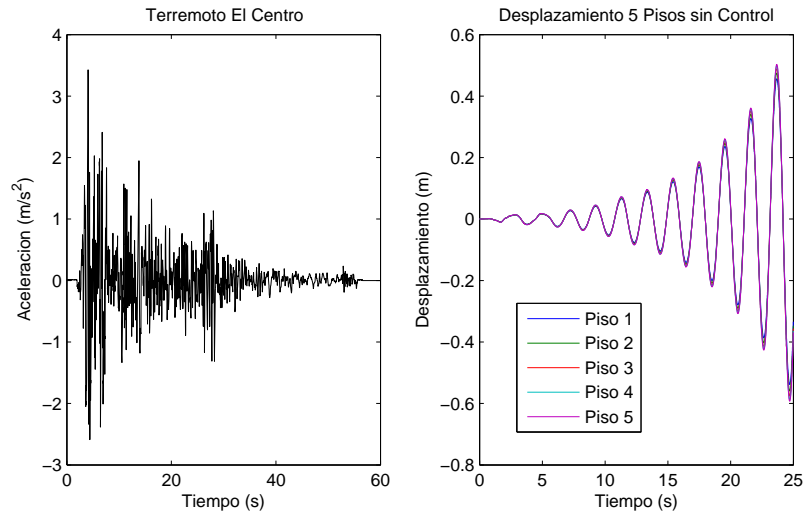


Figura 5.12: Terremoto El Centro y Desplazamiento de los 5 pisos sin control

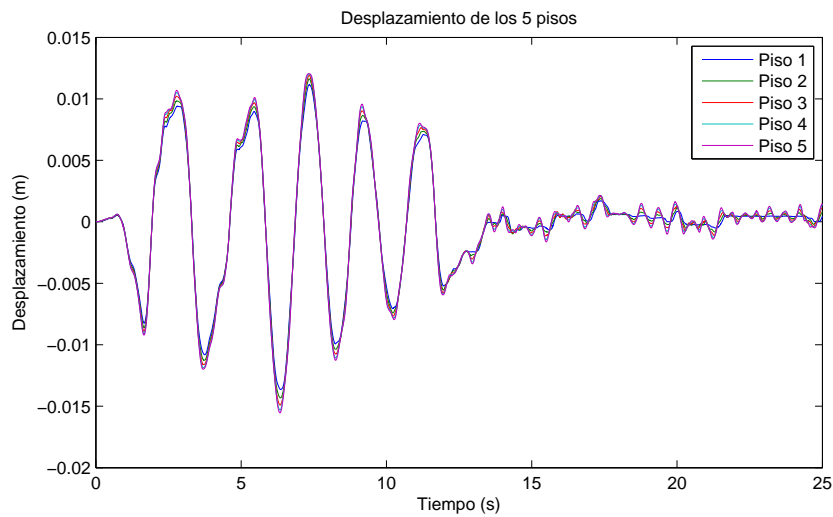


Figura 5.13: Desplazamiento de los 5 pisos con amortiguador MR en el piso 1

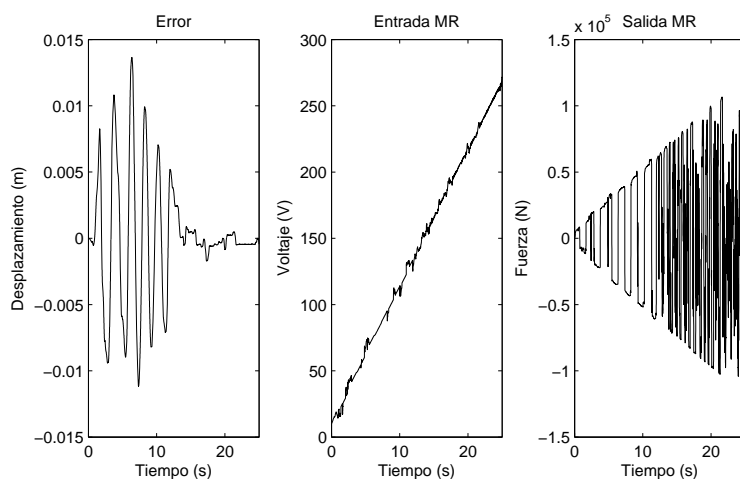


Figura 5.14: Error en el desplazamiento, voltaje aplicado al amortiguador MR y fuerza proporcionada por el amortiguador MR con amortiguador MR en el piso 1

En la Figura 5.15 se presenta el desplazamiento de los cinco pisos cuando el amortiguador MR se coloca en el piso 3. En la Figura 5.16 se observa el error en el desplazamiento del piso 3, el voltaje aplicado al amortiguador MR y la fuerza proporcionada por el amortiguador MR.

Amortiguador MR colocado en el quinto piso

En la Figura 5.17 se presenta el desplazamiento de los cinco pisos cuando el amortiguador MR se coloca en el piso 5. En la Figura 5.18 se observa el error en el desplazamiento del piso 5, el voltaje aplicado al amortiguador MR y la fuerza proporcionada por el amortiguador MR.

Comparaciones

En esta sección se compara el desempeño de las tres configuraciones de control semi-activo propuesto. En la Figura 5.19 se muestra el desplazamiento del piso 1 cuando se coloca el amortiguador MR en distintos pisos; en la Figura 5.20 se muestra el desplazamiento del piso 3 cuando se coloca el amortiguador MR en distintos pisos y en la Figura 5.21 se muestra el desplazamiento del piso 5 cuando se coloca el amortiguador MR en distintos pisos.

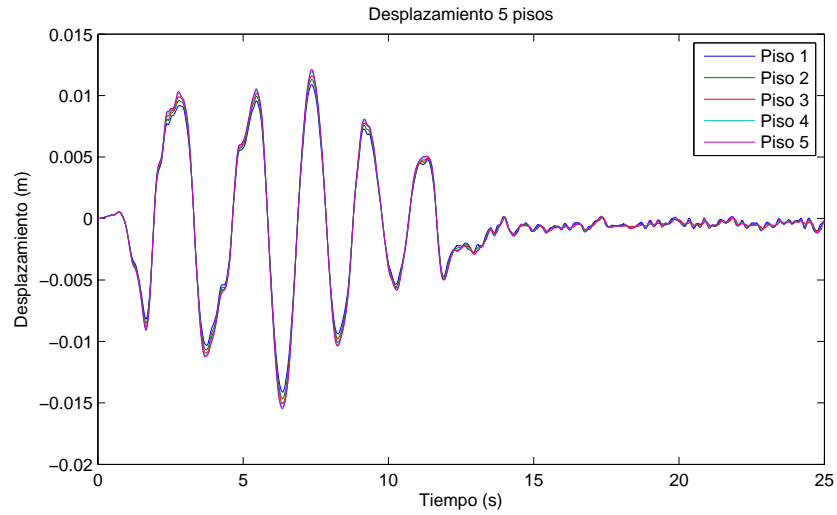


Figura 5.15: Desplazamiento de los 5 pisos con amortiguador MR en el piso 3

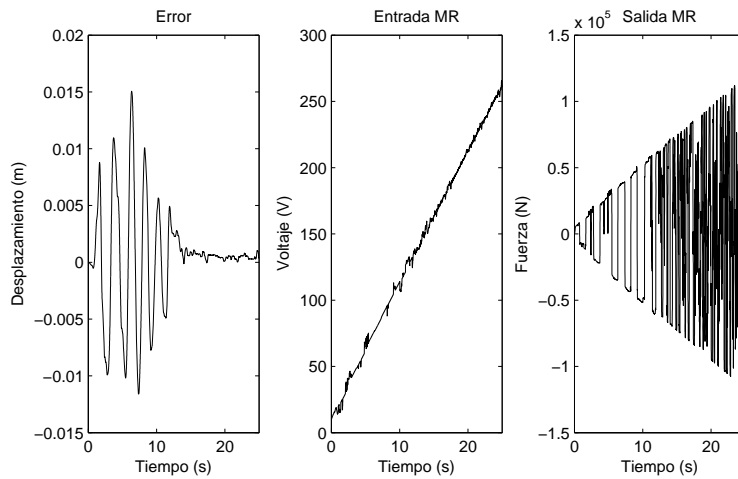


Figura 5.16: Error en el desplazamiento, voltaje aplicado al amortiguador MR y fuerza proporcionada por el amortiguador MR con amortiguador MR en el piso 3

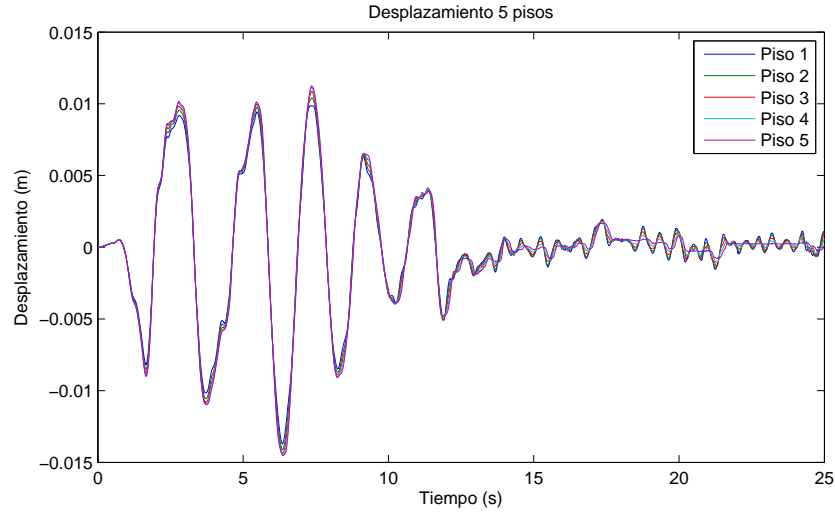


Figura 5.17: Desplazamiento de los 5 pisos con amortiguador MR en el piso 5

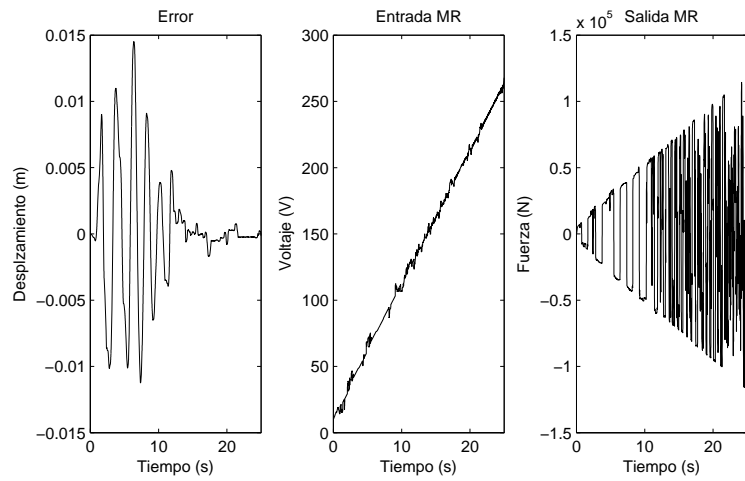


Figura 5.18: Error en el desplazamiento, voltaje aplicado al amortiguador MR y fuerza proporcionada por el amortiguador MR con amortiguador MR en el piso 5

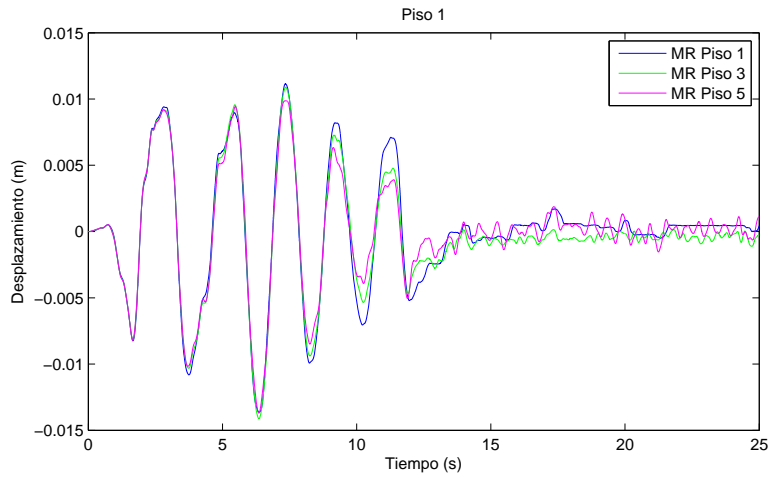


Figura 5.19: Desplazamiento del piso 1 cuando se coloca el amortiguador MR en el primer, tercer y quinto pisos

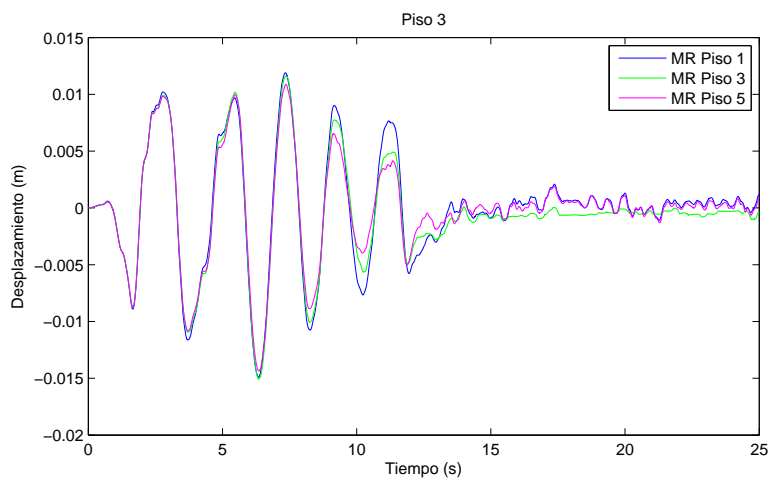


Figura 5.20: Desplazamiento del piso 3 cuando se coloca el amortiguador MR en el primer, tercer y quinto pisos

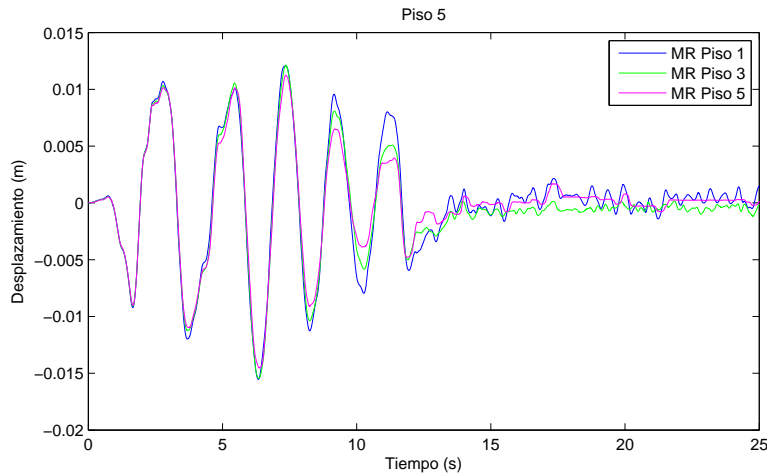


Figura 5.21: Desplazamiento del piso 5 cuando se coloca el amortiguador MR en el primer, tercer y quinto pisos

A partir de estas tres figuras, es posible observar que el amortiguador MR compensa mejor las vibraciones del piso en el que se encuentra colocado, por lo que al ponerlo en el primer piso, éste es el que mejor desempeño tiene. El mismo comportamiento se observa en el caso del piso 3 y del piso 5. Por lo tanto, para determinar cuál configuración es la que conviene utilizar se examina el voltaje aplicado al amortiguador MR y la fuerza proporcionada por el amortiguador MR. En la Tabla 6.1 se observa el voltaje aplicado al amortiguador MR en cada uno de los casos; así como la fuerza proporcionada por el amortiguador MR. Se puede observar que la configuración que tiene el menor voltaje máximo aplicado es al colocar el amortiguador MR en el piso 3; por lo tanto, también es la configuración en la que el amortiguador MR proporciona menor fuerza. Tomando en cuenta estas consideraciones, se elige la configuración de colocar el amortiguador MR en el piso 3.

	Voltaje (V)		Fuerza ($\times 10^5$ N)	
	mín	máx	mín	máx
MR colocado en el piso 1	10	271,6735	-1,1822	1,2209
MR colocado en el piso 3	10	265,8976	-1,1545	1,1957
MR colocado en el piso 5	10	267,6881	-1,1611	1,2025

Tabla 5.1 Voltaje y Fuerza aplicada

En esta sección se hace una comparación del desempeño del controlador PID-difuso con el amortiguador MR colocado en el tercer piso con un controlador difuso propuesto en [3]. Las entradas de control son la velocidad y el desplazamiento con 5 funciones de membresía cada una: positivo grande “PG”, positivo pequeño “PP”, cero “Z”, negativo grande “NG” y negativo pequeño “NP”. La salida es el voltaje con siete funciones de membresía: positivo grande “PG”, positivo mediano “PM”, positivo pequeño “PP”, cero “Z”, negativo grande “NG”, negativo mediano “NM” y negativo pequeño “NP”. Este controlador tiene 25 reglas y se utilizan funciones de membresía triangulares. En la Figura 5.22 se observa el resultado de la simulación de dicho controlador difuso; de cual es posible observar que el controlador PID-difuso presenta un mejor desempeño que el controlador difuso; ya que el controlador PID-difuso compensa de forma efectiva las vibraciones de la estructura del edificio provocadas por el terremoto El Centro.

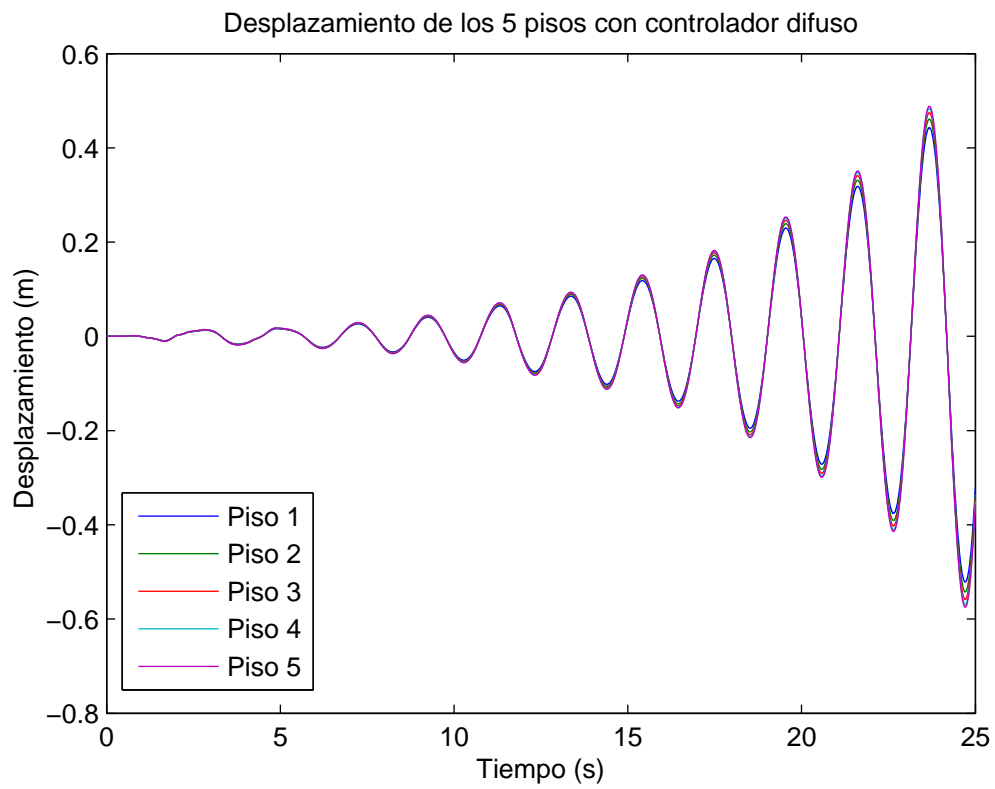


Figura 5.22: Desplazamiento de los cinco pisos con controlador difuso

Capítulo 6

Conclusiones

1. Se modela una estructura de edificio con “n” pisos utilizando el Principio de D’Alembert y se presenta su representación en espacio de estados. Asimismo, se presenta el modelo para el caso específico de una estructura de edificio de cinco pisos y su representación en espacio de estados.
2. Se simulan distintos modelos de amortiguadores MR para comprobar su capacidad de reproducir la dinámica no lineal y con histéresis de un amortiguador MR. En base a estos resultados se elige el modelo Bouc-Wen modificado por [13] para realizar la simulación de esta tesis.
3. Se realiza la comprobación del modelo del edificio de cinco pisos sometiéndolo a dos señales de pruebas y considerando distintos parámetros. Se observa que el desplazamiento de los pisos inferiores es menor a los desplazamientos de los pisos superiores. Asimismo, se observa que al ser mayor la masa de los pisos del edificio, se observan mayores desplazamientos. Se comprueba también el modelo del amortiguador MR con dos señales de prueba distintas en las que se simula el caso en que el voltaje que se aplica al amortiguador MR es constante y el caso en el que el voltaje aplicado es variable; caso que se tiene al realizar la simulación del edificio con el controlador PID-difuso.
4. Se diseña un controlador PID-difuso compuesto de un controlador PD-difuso y un con-

trolador PI-difuso en paralelo. Esto es principalmente para disminuir el número de reglas del controlador PID-difuso; ya que se observa que al aumentar el número de reglas, aumenta de forma considerable el tiempo de simulación, restando eficiencia. Por la misma razón se eligen funciones de membresía triangulares. El controlador PID-difuso tiene como entrada el error y la derivada del error y se asignan 3 funciones de membresía para cada una. La salida es el voltaje que se aplica al amortiguador MR y con lo cual se varía el amortiguamiento que proporciona. De esta manera, se tienen 9 reglas difusas. Se probaron otros controladores PID-difusos con más reglas difusas y el desempeño del controlador no mejoraba significativamente y sí aumentaba considerablemente el tiempo de la simulación. Por otro lado, las funciones de membresía de las entradas del controlador PD-difuso tienen un valor de traslape menor que las funciones de membresía de entrada del controlador PI-difuso, ya que al disminuir el traslape de las funciones de membresía se aumenta la acción derivativa del controlador y se observó una mejoraría en las oscilaciones del sistema durante la simulación.

5. En la literatura se propone colocar el amortiguador MR en el primer piso o en el último piso. En este trabajo se propone colocarlo en el primer, tercer y quinto pisos y comparar el desempeño del controlador PID-difuso bajo estas distintas configuraciones. En todos los casos se observa una reducción importante en el desplazamiento de los cinco pisos, ya que como se puede observar anteriormente, el edificio propuesto se caería en la presencia del terremoto El Centro. Para elegir cuál configuración es la más eficiente se compararon los desplazamientos del piso 1, 3 y 5 cuando se coloca el amortiguador MR en el primer, tercer y quinto pisos. Se observa que el amortiguador MR compensa mejor las vibraciones del piso en el que se encuentra colocado, por lo que al ponerlo en el primer piso, éste es el que mejor desempeño tiene. El mismo comportamiento se observa en el caso del piso 3 y del piso 5. Sin embargo, se elige como mejor opción el colocar el amortiguador MR en el piso 3 ya que se necesita menor voltaje para lograr compensar las vibraciones del terremoto; y por lo tanto, la fuerza proporcionada por el amortiguador MR es menor.

6. Finalmente, se compara el desempeño del controlador PID-difuso propuesto con un controlador difuso propuesto en la literatura cuyas entradas son la velocidad y la aceleración del piso donde se coloca el amortiguador MR y la salida es el voltaje que se aplica al amortiguador MR. Como se observa, el controlador propuesto en la literatura no muestra un desempeño favorable para el edificio propuesto en este trabajo. Además de que el tiempo de simulación fue mucho mayor.

6.1. Trabajo Futuro

1. Elaboración de un prototipo a escala con el propósito de probar el control PID-difuso propuesto.
2. Adaptación del modelo de la estructura de un edificio para considerar las características geológicas de la Ciudad de México.
3. Incluir el modelo para representar la dinámica de los sensores.
4. Probar otros modelos de amortiguador MR.
5. Encontrar la ubicación óptima de los actuadores y sensores en el prototipo a escala.

Bibliografía

- [1] Agarwala, S. Ozcelik, M. Faruqi, “Active Vibration Control of a Multi-Degree-of-Freedom Structure by the Use of Direct Model Reference Adaptive Control”, Proceedings of the American Control Conference (2000) 3580-3584.
- [2] Z. Akbay, H.M. Aktan, “Actively regulated friction slip braces”, Proceedings of Sixth Canadian Conference on Earthquake Engineering, Toronto, Canada (1991) 367-374.
- [3] Sk.F. Ali, A. Ramaswamy, “Optimal fuzzy logic control for MDOF structural systems using evolutionary algorithms”, Engineering Applications of Artificial Intelligence 22 (2009) 407-419.
- [4] Sk.F. Ali, A. Ramaswamy, “Testing and modeling of MR damper and its application to SDOF systems using integral backstepping technique”, Journal of Dynamical Systems Measurements and Control, ASME 131 (2009).
- [5] Sk.F. Ali, A. Ramaswamy, “Developments in structural optimization and applications to intelligent structural vibration control.” (2007) In: N. Lagaros, Y. Tsompanakis (Eds.), Intelligent Computational Paradigms in Earthquake Engineering. Idea Group Publishing, New York, pp. 125-247.
- [6] E. Bazán, R. Meli, “Diseño sísmico de edificios”. Limusa, México (1999).
- [7] Architects Site <http://www.arqhys.com/construccion/magnitud-sismos.html>

- [8] L.M. Bozzo, A.H. Barbat, “Diseño sismorresistente de edificios: Técnicas convencionales y avanzadas”, Barcelona, Reverté, (2000)
- [9] F. Casciati, G. Magonette, F. Marazzi, “Technology of Semiactive Devices and Applications in Vibration Mitigation”, England, Wiley (2006).
- [10] K. Choi, S. Cho, D. Kim, I. Lee, “Active control for seismic response reduction using modal-fuzzy approach”, International Journal of Solids and Structures 42 (2005) 4779-4794.
- [11] T.K. Datta, “A state-of-the-art review on active control of structures” ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 430, Vol. 40, No. 1 (2003) 1-17
- [12] H. Du, N. Zhang, “ H_∞ control for buildings with time delay in control via linear matrix inequalities and genetic algorithms”, Engineering Structures 30 (2008) 81-92.
- [13] S.J. Dyke, “Acceleration feedback control strategies for active and semi-active control systems: modeling, algorithm development and experimental verification”, PHD. Thesis. Department of Civil Engineering and Geological Sciences, Notre Dame, Indiana, (1996).
- [14] S.J. Dyke, B.F. Spencer, M.K. Sain, J.D. Carlson, “Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction”, Smart Materials and Structures 5 (1996) 565–575.
- [15] M.Q. Feng, “Application of hybrid sliding isolation system to buildings”, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 119, No. 10, (1993), 90-108.
- [16] Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas <http://www.funvisis.gob.ve>
- [17] Z.Q. Gu, S. O. Oyadiji, “Application of MR damper in structural control using ANFIS method”, Computers and Structures 86 (2008) 427-436.
- [18] R. Guclu “Sliding mode and PID control of a structural system against earthquake”, Mathematical and Computer Modelling 44 (2006) 210-217.

- [19] R. Glucu, H. Yazici “Vibration control of a structure with ATMD against earthquake using fuzzy logic controllers”, *Journal of Sound and Vibration* 318 (2008) 36-49.
- [20] W.L. He, A.K. Agarwal, K. Mahmood, “Control of seismically excited cable stayed bridges using resetting semiactive stiffness dampers”, *Jour Bridge Engineering, ASCE*, Vol. 6, (2001) 376-384.
- [21] C. Ho, C. Ma, “Active vibration control of structural systems by a combination of the linear quadratic Gaussian and input estimation approaches”, *Journal of Sound and Vibration* 301 (2007) 429-449.
- [22] J. Jantzen, “Foundations of Fuzzy Control”, England, Wiley, (2007).
- [23] S.G. Kelly, “System Dynamics and Response”, Toronto, Thomson, (2007).
- [24] D. H. Kim, D. Kim, S. Chang, H. Jung, “Active control strategy of structures based on lattice type probabilistic neural network”, *Probabilistic Engineering Mechanics* 23 (2008) 45-50.
- [25] Klir, G.J., Yuan Bo, “Fuzzy sets and fuzzy logic. Theory and Applications”, New Jersey, Prentice Hall, (1995).
- [26] K.H. Lam, Z.H. Chen, Y.Q. Ni, H.L.W. Chan, “A magnetorheological damper capable of force and displacement sensing”, *Sensors and Actuators A* 158 (2010) 51-59.
- [27] X. Li, Z. Ying, “Feedback control optimization for seismically excited buildings”, *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 20, No. 4, December, 2007.
- [28] N. Luo, J. Rodellar, J. Vehí, M. De la Sen, “Composite semiactive control of a class of seismically excited structures”, *Journal of The Franklin Institute* 338 (2001) 225–240.
- [29] Y. Liu , H. Matsuhisa, H. Utsuno, “Semi-active vibration isolation system with variable stiffness and damping control”, *Journal of Sound and Vibration* 313 (2008) 16-28.

- [30] S. Nagarajaiah, "Semi-active control of structures", Proceedings of Structures Congress XV, ASCE, Portland, USA, (1997), 1574-1578.
- [31] N.M. Newmark, E. Rosenblueth "Fundamentos de Ingeniería Sísmica", México, Diana (1978).
- [32] M.T. Nguyen, H. Dalvand, Ying-Hao Yu, Q.P. Ha, "Seismic responses of civil structures under magnetorheological-device direct control", The 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, (2008)
- [33] K. Park, H. Koh, C. Seo, "Independent modal space fuzzy control of earthquake-excited structures", Engineering Structures 26 (2004) 279-289.
- [34] N.G. Pnevmatikos, C.J. Gantes "Control strategy for mitigating the response of structures subjected to earthquake actions", Engineering Structures 32 (2010) 3616-3628.
- [35] <http://www.ssn.unam.mx/>
- [36] Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica <http://www.smis.org.mx/>
- [37] T.T. Soong, B.F. Spencer, "Supplemental energy dissipation: state of the art and state of the practice", Engineering Structures 24 (2002) 243-259.
- [38] A. Wang, Y. Lin, "Vibration control of a tall building subjected to earthquake excitation", Journal of Sound and Vibration 299 (2007) 757-773.
- [39] L.Wang, "A course in fuzzy systems and control", New Jersey, Prentice Hall, (1997).
- [40] Q. Wenzhong, S. Jincai, Q. Yang, "Active control of vibration using a fuzzy control method", Journal of Sound and Vibration 275 (2004) 917-930.
- [41] J.N. Yang, J.C. Wu, Z. Li, "Control of seismic excited buildings using active variable stiffness systems", Engineering Structures, Vol. 18, No. 8 (1996) 589-596.
- [42] V. Zakian (Editor), "Control Systems Design. A new framework", Springer, (2005).

- [43] M.F. Zapateiro, “Semiactive control strategies for vibration mitigation in adaptronic structures equipped with magnetorheological dampers”, PHD. Thesis, Universitat de Girona, Departament D’Enginyeria Eléctric, Electrónica I Automática, (2009).
- [44] W. Zhang, Y. Chen, H. Gao, “Energy-to-peak control for seismic-excited buildings with actuator faults and parameter uncertainties”, *Journal of Sound and Vibration* 330 (2011) 581-602.