



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**USO DE DISIPADORES MAGNETOREOLÓGICOS EN UN EDIFICIO CON  
AISLACIÓN**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**MARIO ANDRÉS LAFONTAINE ROTH**

**PROFESOR GUÍA:  
MAURICIO JUAN SARRAZIN ARELLANO.**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MARÍA OFELIA MORONI YADLIN.  
RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES.**

**SANTIAGO DE CHILE  
JUNIO 2008**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: MARIO LAFONTAINE R.  
FECHA: JUNIO 2008  
PROF. GUÍA: MAURICIO SARRAZIN

## **“USO DE DISIPADORES MAGNETOREOLÓGICOS EN UN EDIFICIO CON AISLACIÓN”**

El uso de aislación sísmica ha sido efectivo en el control de la respuesta de edificios; la experiencia con un edificio de la Comunidad Andalucía así lo ratifica. Este edificio, de vivienda social, es de 4 pisos, tiene una planta de  $10 \times 6 \text{ m}^2$ , muros de hormigón armado en el primer piso y de albañilería confinada en los otros tres. Está soportado por ocho aisladores de goma. En este trabajo se presenta un estudio para mejorar la efectividad del sistema aislante mediante la adición de amortiguadores magneto-reológicos (MR). Se modela el edificio mediante elementos uniaxiales, agregando elementos de propiedades no-lineales que simulan los amortiguadores MR, cuyas propiedades son función de la velocidad y se obtienen de ensayos de laboratorio realizados por otros investigadores. Para optimizar la operación de los amortiguadores MR se emplean algoritmos genéticos que modifican los parámetros representativos de los sistemas de control de lógica difusa. Las variables a optimizar son la aceleración absoluta máxima y el desplazamiento relativo máximo en el edificio. Como “input” se emplean registros del terremoto de marzo 1985. Se comparan las respuestas del edificio: a) sólo con aislación, b) con aislación y con amortiguadores pasivos y c) con aislación y amortiguadores activos. Finalmente se logra diseñar sistemas de control en lógica difusa que reducen la aceleración absoluta máxima hasta en un 27.6% y otros que reducen los desplazamientos relativos máximos hasta en un 64,9% en promedio con respecto al caso sin disipadores.

*A mi familia, amigos, amigas, por su incondicional apoyo a lo largo de mi vida.*

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1:</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
1.1	Introducción	10
1.2	Control estructural	11
1.2.1	<i>Control estructural pasivo</i>	11
1.2.2	<i>Control estructural activo</i>	15
1.2.3	<i>Control estructural semiactivo</i>	17
1.2.4	<i>Control estructural híbrido</i>	21
1.3	Objetivos	22
1.4	Metodología	23
<b>CAPÍTULO 2:</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>26</b>
<b>CAPÍTULO 3:</b>	<b>OBTENCIÓN DEL MODELO SIMPLIFICADO</b>	<b>30</b>
3.1	Modelo empotrado	30
3.2	Incorporación aisladores	32
3.3	Obtención de la matriz de amortiguamiento C	34
<b>CAPÍTULO 4:</b>	<b>DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL</b>	<b>38</b>
4.1	Introducción	38
4.2	Sistemas de control en lógica difusa (FLC)	39
4.2.1	<i>Introducción a la lógica difusa</i>	39
4.2.2	<i>Funciones de pertenencia y conjuntos difusos</i>	39
4.2.3	<i>Operadores lógicos</i>	41
4.2.4	<i>Reglas Si-Entonces</i>	43
4.3	Algoritmo genético	47
4.3.1	<i>Introducción a los algoritmos genéticos</i>	47
4.3.2	<i>Algoritmo genético con mejoramiento local de cromosomas</i>	55
4.3.3	<i>Algoritmo genético con clasificación no dominada</i>	58
4.4	Modelo del disipador magnetoreológico	59
4.5	Modelación en Simulink	63

4.6	Optimización del sistema de control	72
<b>CAPÍTULO 5:</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>85</b>
<b>CAPÍTULO 6:</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>113</b>
<b>ANEXO A:</b>	<b>COMPROBACIÓN DE PERÍODOS DE LA ESTRUCTURA SIMPLIFICADA</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO B:</b>	<b>OBTENCIÓN DE LA MATRIZ DE MASA, RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO</b>	<b>122</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>126</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Aisladores elastoméricos	12
Figura 1.2	Espectros de aceleraciones (Llolleo N10E y SCT)	13
Figura 1.3	Espectro de desplazamientos Llolleo N10E	14
Figura 1.4	AMD en edificio Kyobashi Seiwa	17
Figura 1.5	Funcionamiento de un líquido magnetoreológico	18
Figura 1.6	Amortiguamiento variable	19
Figura 1.7	Disipador magnetoreológico	20
Figura 1.8	Inducido del disipador	20
Figura 1.9	Modelo de elementos finitos	23
Figura 2.1	Problema del péndulo invertido “Cart Pole System”	28
Figura 3.1	Ensayo de rigidez horizontal de los aisladores	33
Figura 3.2	Principales modos de vibrar	36
Figura 3.3	Ensayo de amortiguamiento de aisladores	36
Figura 4.1	Grados de pertenencia al conjunto difuso “días del fin de semana”	40
Figura 4.2	Grados de pertenencia a los conjuntos “Bajo” y “Alto”	40
Figura 4.3	Grados de pertenencia de una persona de 190 cms de estatura	41
Figura 4.4	Grados de pertenencia de una persona de 170 cms de estatura	41
Figura 4.5	Tabla de verdad para lógica tradicional	42
Figura 4.6	Tabla de verdad para lógica difusa	43
Figura 4.7	Ejemplo de aplicación de lógica difusa a la decisión de propina	46
Figura 4.8	Diversidad alta y baja de una población	50
Figura 4.9	Diagrama de flujo de un algoritmo genético tradicional	53
Figura 4.10	Crossover de un punto	54
Figura 4.11	Crossover de dos puntos	54
Figura 4.12	Flujo del GALIC	57
Figura 4.13	Fuerza v/s desplazamiento y velocidad	62
Figura 4.14	Fuerza v/s desplazamiento y voltaje	62
Figura 4.15	Fuerza v/s velocidad y voltaje	63
Figura 4.16	Modelo en Simulink	64
Figura 4.17	Adición de ruido a la señal	68

Figura 4.18	Bloque FLC	69
Figura 4.19	Sistema de control	69
Figura 4.20	Bloque Disipador MR	71
Figura 4.21	Acelerograma Llay-Llay S10W	74
Figura 4.22	Espectro de aceleraciones Llay-Llay S10W	74
Figura 4.23	Acelerograma Ventanas WE	75
Figura 4.24	Espectro de aceleraciones Ventanas WE	75
Figura 4.25	Acelerograma Viña del Mar S20W	76
Figura 4.26	Espectro de aceleraciones Viña del Mar S20W	76
Figura 4.27	Acelerograma Llolleo N10E	77
Figura 4.28	Espectro de aceleraciones Llolleo N10E	77
Figura 4.29	Ejemplo de sistema de control para 3 reglas con funciones de pertenencia gaussianas	80
Figura 4.30	Cromosoma para 3 reglas	81
Figura 5.1	Llolleo N10E, amortiguamiento 5%, aceleraciones	89
Figura 5.2	Llolleo N10E, amortiguamiento 5%, desplazamientos	90
Figura 5.3	Llolleo N10E, amortiguamiento 5%, voltaje	91
Figura 5.4	Llay Llay S10W, amortiguamiento 5%, aceleraciones	92
Figura 5.5	Llay Llay S10W, amortiguamiento 5%, desplazamientos	93
Figura 5.6	Llay Llay S10W, amortiguamiento 5%, voltaje	94
Figura 5.7	Viña del Mar S20W, amortiguamiento 5%, aceleraciones	95
Figura 5.8	Viña del Mar S20W, amortiguamiento 5%, desplazamientos	96
Figura 5.9	Viña del Mar S20W, amortiguamiento 5%, voltaje	97
Figura 5.10	Ventana WE, amortiguamiento 5%, aceleraciones	98
Figura 5.11	Ventana WE, amortiguamiento 5%, desplazamientos	99
Figura 5.12	Ventana WE, amortiguamiento 5%, voltaje	100
Figura 5.13	Llolleo N10E, amortiguamiento 12%, aceleraciones	101
Figura 5.14	Llolleo N10E, amortiguamiento 12%, desplazamiento	102
Figura 5.15	Llolleo N10E, amortiguamiento 12%, voltaje	103
Figura 5.16	Llay Llay S10W, amortiguamiento 12%, aceleraciones	104
Figura 5.17	Llay Llay S10W, amortiguamiento 12%, desplazamientos	105

Figura 5.18	Llay Llay S10W, amortiguamiento 12%, voltaje	106
Figura 5.19	Viña del Mar S20W, amortiguamiento 12%, aceleraciones	107
Figura 5.20	Viña del Mar S20W, amortiguamiento 12%, desplazamientos	108
Figura 5.21	Viña del Mar S20W, amortiguamiento 12%, voltaje	109
Figura 5.22	Ventana WE, amortiguamiento 12%, aceleraciones	110
Figura 5.23	Ventana WE, amortiguamiento 12%, desplazamientos	111
Figura 5.24	Ventana WE, amortiguamiento 12%, voltaje	112
Figura 6.1	Curva de Pareto para 5% de amortiguamiento	115
Figura 6.2	Curva de Pareto para 12% de amortiguamiento	117

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Masas de cada piso	31
Tabla 3.2	Períodos del edificio empotrado	32
Tabla 3.3	Períodos del edificio aislado	34
Tabla 4.1	Comparación entre algoritmos tradicionales y algoritmos genéticos	48
Tabla 4.2	Parámetros del sistema de inferencia difuso	61
Tabla 4.3	Parámetros utilizados para los algoritmos genéticos	83
Tabla 5.1	Resultados caso 5% de amortiguamiento del aislador	87
Tabla 5.2	Resultados caso 12% de amortiguamiento del aislador	87

## **Capítulo 1: Introducción**

### **1.1 Introducción**

Los eventos sísmicos han sido a lo largo de la historia uno de los fenómenos naturales más frecuentes en nuestro medio. La forma repentina e inesperada en la que ocurren y la capacidad de destrucción que tienen han hecho que estos eventos sean calificados por la población como uno de los fenómenos naturales más terribles.

Un sismo o terremoto se define como las sacudidas o movimientos bruscos del terreno producido en la corteza terrestre como consecuencia de la liberación repentina de energía en el interior de la Tierra. Esta energía se transmite a la superficie en forma de ondas sísmicas que se propagan en todas direcciones.

La consecuencia directa del sismo sobre una estructura es un traspaso de energía mecánica del suelo a la estructura. Esto produce en ésta un estado de fuerzas y deformaciones que podría llevar a la estructura al colapso total en caso de ésta no estar diseñada para tal situación.

La ingeniería sísmica mundial ha abordado este problema a través de los años. Los principales códigos caracterizan el movimiento sísmico como fuerzas inerciales actuando en las masas de la estructura. Muchas veces estas fuerzas se reducen apelando a la capacidad de deformación no lineal que tiene el material y sistema estructural, obteniéndose así fuerzas de diseño menores y por lo mismo diseños más económicos.

El éxito de esta filosofía de diseño es discutible. Si bien al considerar la capacidad de deformación no lineal se obtienen diseños mucho más económicos, esto significa la aceptación de daño estructural asociado al nivel de deformación demandado, debido a que esta es la única forma que la estructura tiene para disipar la energía entregada por el sismo.

La inevitabilidad de grandes daños en elementos estructurales y no estructurales para ciertos sismos, además de las muertes que las catástrofes sísmicas siguen ocasionando da pie a nuevas formas de abordar el problema sísmico. Como alternativa al diseño tradicional surge el control estructural.

## **1.2 Control Estructural**

El control estructural se puede definir como cualquier sistema que disipa energía potencialmente dañina para la estructura, ya sea impartida por perturbaciones internas o externas (Shook, 2008).

Estos sistemas permiten disipar energía sin provocar daños en la estructura. También producen normalmente un aumento del amortiguamiento y rigidez de la estructura original. Un sistema de disipación cuyas propiedades son independientes de la respuesta de la estructura se denomina sistema pasivo de disipación o control estructural pasivo, mientras que aquellos que lo hacen de forma variable pueden ser activos o semi-activos (Barra, 2007).

### **1.2.1 Control Estructural Pasivo**

La forma más sencilla de control estructural es la pasiva. La principal característica del control pasivo es que no requiere de energía para su funcionamiento. Por lo

mismo su funcionamiento óptimo no está condicionado a una fuente de energía que podría cortarse en un sismo de gran magnitud.

El control pasivo se dispone de manera tal que su accionar es independiente de la respuesta de la estructura. Esto se logra utilizando sistemas mecánicos que de forma inercial absorben la energía de una estructura y, por lo tanto, mitigan su movimiento (Barra, 2007).

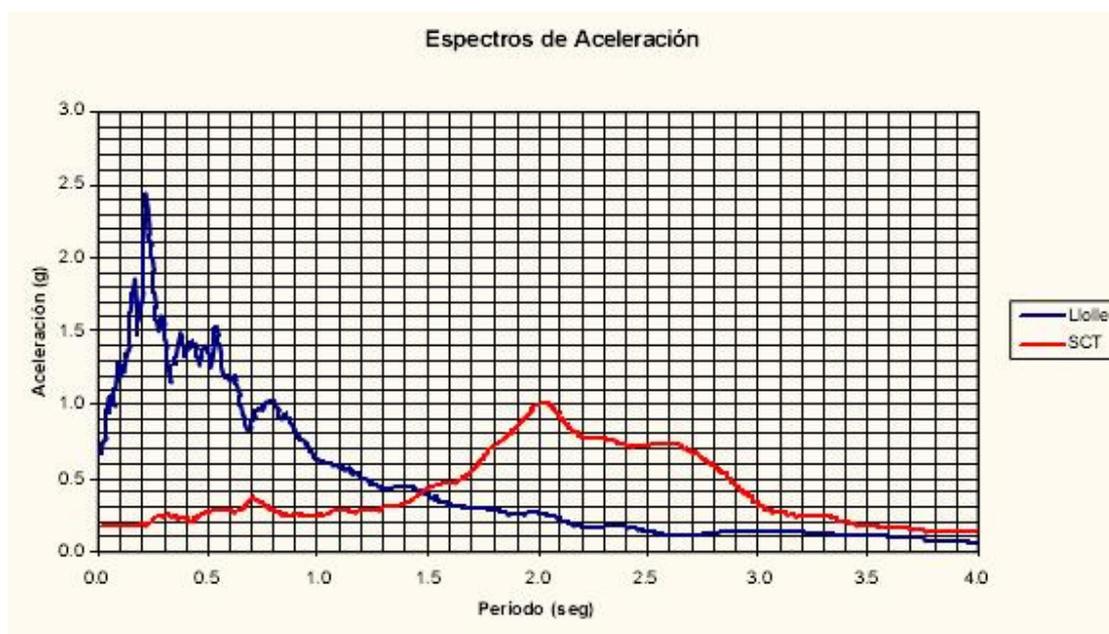
Un ejemplo de control pasivo es la aislación sísmica. La aislación sísmica es una forma de control basado en la premisa de que es posible desacoplar parcialmente una estructura de los movimientos horizontales del suelo mediante la introducción de elementos flexibles entre la estructura y su fundación. Los aisladores reducen notablemente la rigidez horizontal del sistema estructural, haciendo que el período fundamental de la estructura aislada sea mucho mayor que el de la estructura con base fija.



**Figura 1.1:** Aisladores elastoméricos

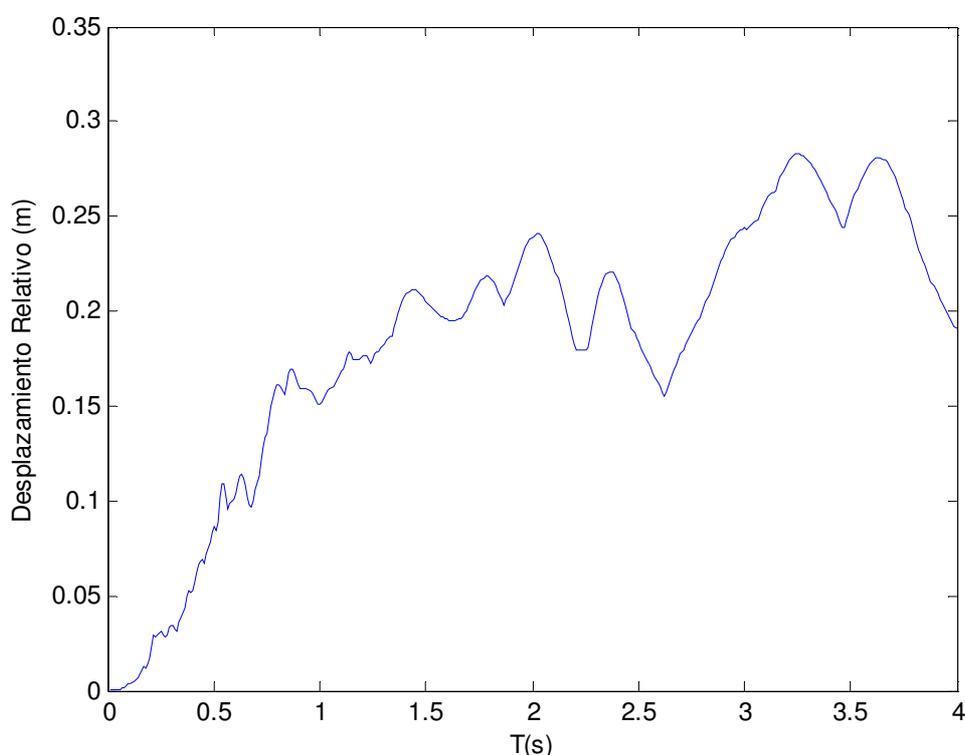
Existen básicamente dos tipos de sistemas de aislación: los apoyos elastoméricos y los apoyos deslizantes. Los apoyos elastoméricos (figura 1.1) emplean un elastómero de goma natural reforzado con finas láminas de acero. La notable flexibilidad lateral en el elastómero permite el desplazamiento lateral de los extremos del aislador, mientras que las láminas de refuerzo le proporcionan una gran rigidez vertical. Existen tres tipos de aisladores elastoméricos ampliamente usados: apoyos de goma natural (NRB), apoyos de caucho con núcleo de plomo (LRB), y apoyos de caucho de alta disipación de energía (HDRB).

Los apoyos deslizantes poseen una superficie de deslizamiento que permite la disipación de energía por medio de las fuerzas de roce. Uno de los dispositivos más innovadores es el sistema pendular friccionante que combina la acción del deslizamiento con la generación de una fuerza restitutiva debido a la geometría del deslizador.



**Figura 1.2:** Espectros de aceleraciones (Lolloe N10E y SCT)

En la figura 1.2 se puede ver la disminución de aceleraciones (y por lo tanto de fuerzas inerciales de diseño) al aumentar el período fundamental de una estructura para el registro del terremoto chileno de 1985 (Llolleo N10E). Sin embargo se puede apreciar que para sismos de diferentes características, como por ejemplo el terremoto mexicano de 1985 (componente transversal SCT), el uso del aislador sería perjudicial al aumentar las aceleraciones.



**Figura 1.3:** Espectro de desplazamientos Llolleo N10E

Estudios realizados con sismos de falla cercana (Jangid y Kelly, 2001) muestran la existencia de pulsos de desplazamientos con velocidades peak del orden de 0.5 m/s y duraciones entre 1 y 3 s, lo cual causa que la demanda de desplazamiento aumente para edificios en ese rango de períodos como lo son los edificios aislados (figura 1.3). Esto es perjudicial ya que la demanda podría llegar a ser de magnitud tal que exista problemas con elementos no estructurales como tuberías. Además,

podría existir la posibilidad de choque de la estructura aislada con estructuras vecinas. Finalmente, un desplazamiento horizontal excesivamente grande es perjudicial para el diseño de los aisladores debido a efectos de segundo orden, como el efecto P-Delta.

Esta gran demanda de desplazamientos generalmente puede ser bien controlada con disipación pasiva de energía (Kelly, 1998). Dicha disipación usualmente proviene del amortiguamiento intrínseco de la goma del aislador. En caso de ser necesario se puede agregar disipación adicional incorporando un núcleo de plomo al centro del aislador. De esta manera se pueden tener amortiguamientos del 3% al 15% del amortiguamiento crítico, rango bastante amplio que permite tener un adecuado control del desplazamiento horizontal del aislador.

La consecuencia directa de disipación de energía pasiva es un aumento del amortiguamiento de la estructura. El inconveniente radica en que un amortiguamiento excesivo hace participar a otros modos de vibrar que no corresponden al modo fundamental, donde el aislador concentra toda la deformación, resultando de esto una menor eficacia del sistema de aislación y un aumento de las aceleraciones (Kelly, 1998). Esto lleva a la necesidad de un amortiguamiento controlado, inteligente, que pueda disminuir la demanda de desplazamiento sin aumentar las aceleraciones o incluso disminuyéndolas.

### **1.2.2 Control Estructural Activo**

El control estructural activo utiliza sistemas mecánicos para imponer fuerzas sobre una estructura con el propósito de mitigar el movimiento. Estos sistemas emplean

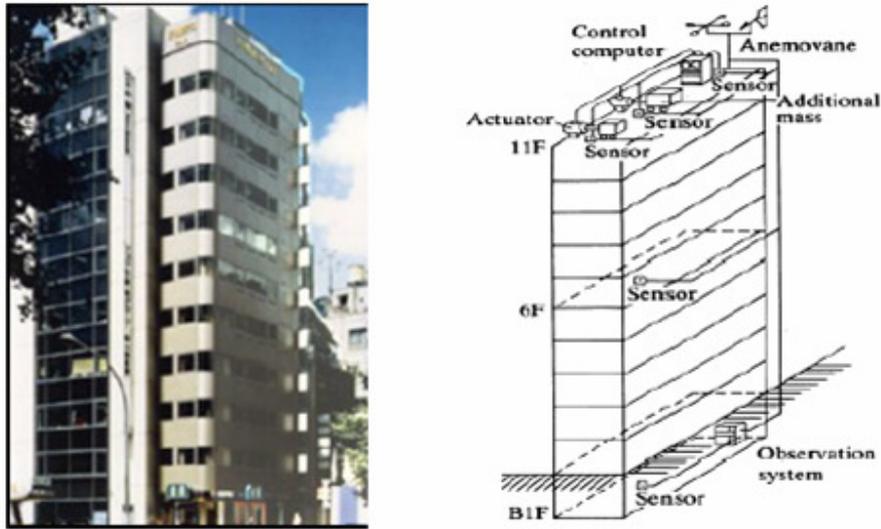
diversos tipos de tecnología, pero generalmente incluyen dispositivos hidráulicos. Una característica importante de los sistemas de control activos es que requieren de un algoritmo o sistema de control para un funcionamiento óptimo. Este sistema de control es el encargado de decidir en tiempo real cuál es la fuerza (u otra variable) de control óptima en base a mediciones obtenidas con sensores que entreguen información sobre el estado dinámico de la estructura. Generalmente las variables de entrada a los sistemas de control son los desplazamientos, velocidades o aceleraciones de distintos pisos.

Sin embargo, cuando las fuerzas internas actuando en una estructura son mayores, la fuerza de control óptima también lo es, por lo que se requiere gran cantidad de energía para desarrollar esa fuerza de control. Incluso la fuente de energía podría verse interrumpida durante sismos de gran magnitud perdiéndose así el beneficio del sistema activo (Shook, 2008).

El principal sistema de control activo es el disipador de masa activo (AMD). Este consiste en una masa pequeña (usualmente inferior al 1% de la masa total de la estructura), móvil, con un actuador conectado a ella, que es instalada en uno de los últimos pisos del edificio. Si el sistema de control del AMD es adecuado, la fuerza inercial que presenta la masa oscilante debe contrarrestar los efectos de la acción sísmica y reducir la respuesta estructural a valores aceptables (Ahlawat, 2002)

El edificio Kyobashi Seiwa es la primera aplicación a escala natural de la tecnología del control activo. Este edificio ubicado en Tokio, Japón, se terminó de construir en 1989. El sistema activo está conformado por dos osciladores AMD, uno principal para controlar el movimiento transversal, y otro secundario para reducir los movimientos torsionales. El objetivo del sistema instalado en el edificio

es reducir las vibraciones producidas por vientos fuertes y sollicitaciones sísmicas moderadas, con el fin de incrementar el confort de sus ocupantes (figura 1.4).



**Figura 1.4:** AMD en edificio Kyobashi Seiwa

### 1.2.3 Control Estructural Semiactivo

El control estructural semiactivo tiene como principal característica la adaptabilidad del control activo y la confiabilidad del pasivo, utilizando sólo una pequeña cantidad de energía.

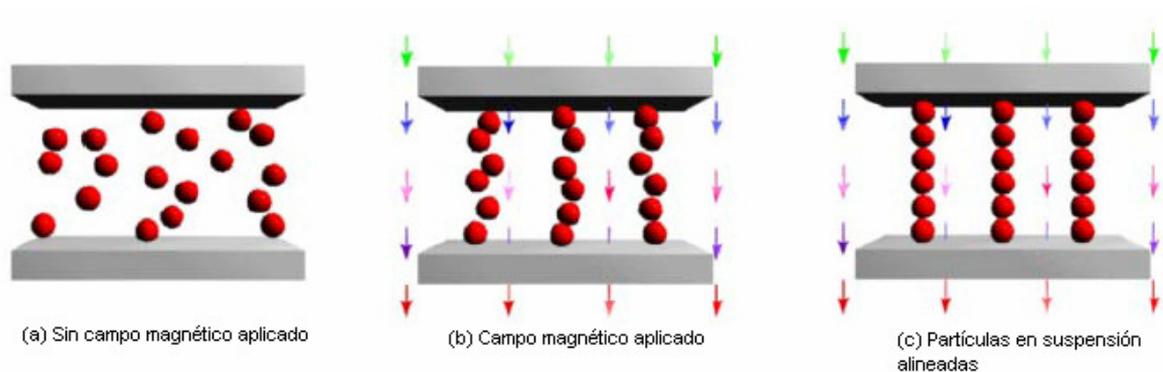
El control estructural semiactivo actúa cambiando las propiedades mecánicas de elementos internos de la estructura. Estos elementos absorben energía, y de esta forma mitigan movimientos no deseados. Los cambios sobre ellos dependen de la retroalimentación del sistema mediante una respuesta medida sobre la estructura.

La implementación más común de los sistemas semiactivos son los fluidos de viscosidad variable. Esa viscosidad variable, mediante un sistema de control, pasa a ser una viscosidad controlada, lo cual es lo que los diferencia de un sistema pasivo.

La gran ventaja del control semiactivo es que puede tener un desempeño mejor que los sistemas pasivos y su requerimiento de energía es bastante menor en comparación con los sistemas activos.

Uno de los sistemas de control semiactivos más comunes por su simplicidad son los disipadores magnetoreológicos.

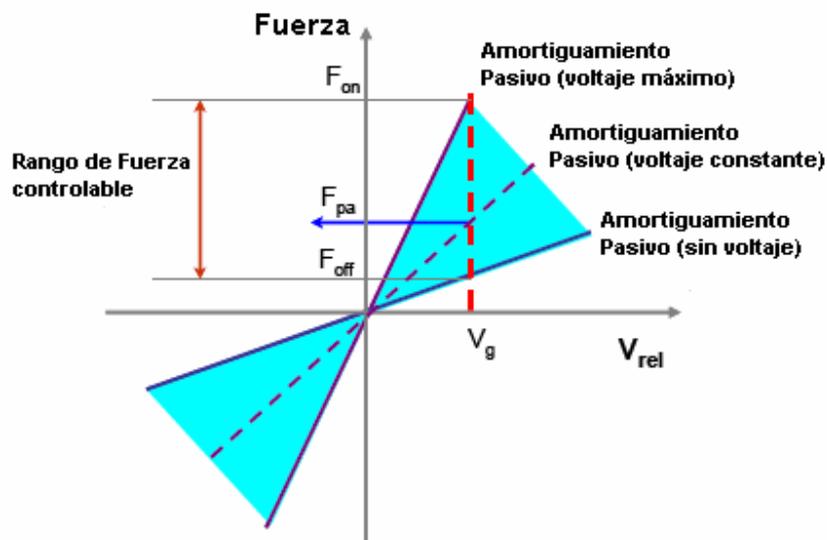
Estos disipadores tienen en su interior un fluido magnetoreológico, el que está compuesto por un líquido, partículas en suspensión magnetizables y aditivos. El líquido consiste típicamente en aceite, agua o líquido en base a silicona. Las partículas en suspensión generalmente son de hierro, y frente a la acción de un campo magnético externo se rigidizan de forma paralela al campo magnético aplicado (figura N° 1.5), cambiando las propiedades del disipador y con ello la respuesta de la estructura (Reyes, 2006).



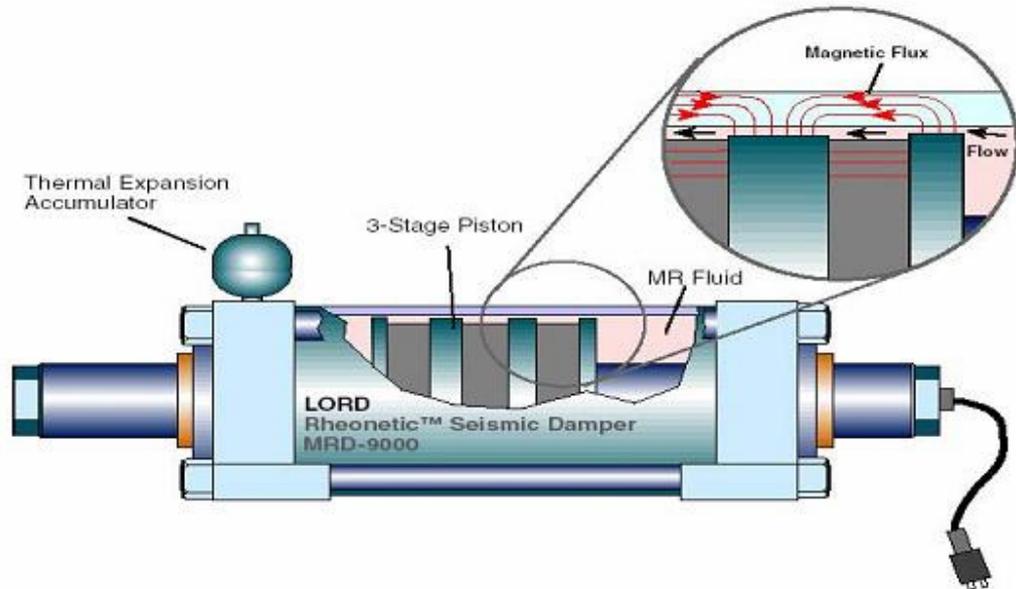
**Figura 1.5:** Funcionamiento de un líquido magnetoreológico

El campo magnético es producido por un inducido. Si una corriente circula por éste, producirá un campo magnético que actúa sobre la viscosidad del fluido (figura 1.7 y 1.8).

En la figura N° 1.6 se puede apreciar la principal característica de un disipador magnetoreológico, su amortiguamiento variable. La pendiente más fuerte corresponde al caso en que el voltaje aplicado es máximo (caso conocido como Passive-On), mientras que la pendiente más suave corresponde al caso en que no se aplica voltaje al disipador (Passive Off). Para una misma velocidad la fuerza producida por el amortiguador MR cambia dependiendo del voltaje aplicado a éste. Así dependiendo del valor del voltaje, se puede variar la energía disipada por el amortiguador.



**Figura 1.6:** Amortiguamiento variable



**Figura 1.7:** Disipador magnetoreológico



**Figura 1.8:** Inducido del disipador

Una característica de los sistemas activos o semiactivos es el requerimiento de un sistema de control. Como se mencionó, dicha forma de control estructural se basa en la variación de alguna variable de control (fuerza de control, viscosidad del fluido, voltaje aplicado, etc.) en tiempo real, por lo que es necesario un sistema o algoritmo de control capaz de decidir de qué manera cambiar esas variables de control.

#### **1.2.4 Control Estructural Híbrido**

Los sistemas híbridos emplean una combinación de dispositivos pasivos y activos (o semiactivos) con el fin de incrementar la confiabilidad y eficiencia del control estructural. Algunas de las restricciones que presenta un sistema activo pueden ser superadas por los sistemas de control híbridos debido a que éstos operan múltiples dispositivos de control, logrando mayores niveles de rendimiento (Barra, 2007).

En el presente trabajo se diseña un sistema de control híbrido para el edificio aislado de la comunidad Andalucía. El control estructural consiste en un sistema híbrido de aisladores de goma con disipadores magnetoreológicos aplicados en la interfaz de aislación. Mediante este sistema de control estructural se busca minimizar la respuesta de la estructura para registros sísmicos chilenos del terremoto de 1985, diseñando para ello un sistema de control óptimo de los disipadores magnetoreológicos.

## 1.3 Objetivos

### Objetivos generales

- Estudiar la respuesta al incorporar disipadores magneto reológicos en la base de un edificio con aisladores sísmicos.
- Diseñar un sistema de control óptimo de los disipadores.

### Objetivos específicos

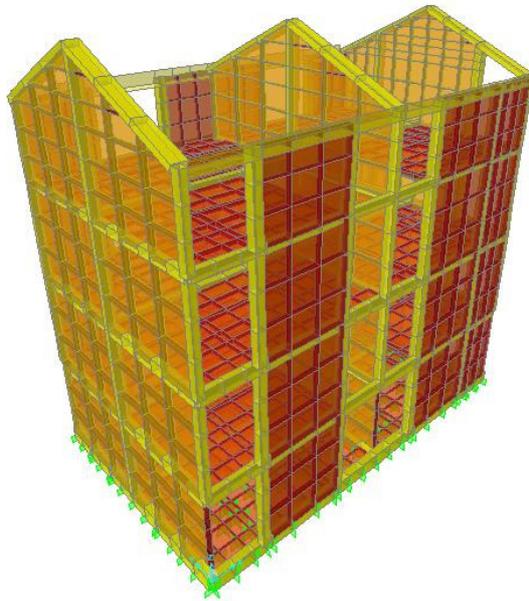
- Optimizar el sistema de control utilizando algoritmos genéticos.
- Desarrollo de un modelo de análisis en el tiempo que incorpore la fuerza del disipador y su sistema de control.

## 1.4 Metodología

Se usó como base la estructura del edificio aislado de la comunidad Andalucía. A partir de un modelo de elementos finitos del edificio Andalucía (Aguilera, 2002) se desarrolló un modelo simplificado de 4 masas concentradas cuya rigidez horizontal es equivalente al modelo original.

Debido a que se priorizó un modelo más liviano sin alterar los objetivos propuestos, se analizó el edificio sólo en su eje más flexible.

El modelo de elementos finitos utilizado se puede apreciar en la figura 1.9.



**Figura 1.9:** Modelo de elementos finitos

En un comienzo se obtuvo un modelo considerando la base empotrada, para poder calibrarlo con respecto a mediciones que ya existen sobre el edificio Andalucía convencional (no aislado), y tener así la certeza de que cualquier futuro error correspondería a una modelación equivocada de los aisladores y no del edificio. Por lo tanto, en una primera parte el modelo corresponde a un modelo de 3 masas y 3 grados de libertad.

Los aisladores se modelaron como resortes de rigidez constante, considerando la rigidez a un 50% de deformación de corte, que representa la deformación para un sismo de diseño.

Para la consideración del amortiguamiento de los aisladores, se analizó 2 casos, uno en el cual el amortiguamiento corresponde al real de los aisladores presentes en el edificio Andalucía y otro ficticio en el cual los aisladores son de bajo amortiguamiento. En ambos casos se usó el método de Rayleigh para la determinación de la matriz de amortiguamiento de la estructura.

La incorporación de la fuerza del disipador requiere de un modelo adecuado del disipador magnetoreológico. La naturaleza de los disipadores es altamente no lineal, por lo que la relación entre sus variables de entrada (desplazamiento, velocidad, voltaje) y la variable de salida (fuerza) se obtiene de un modelo (Roschke, 2005) hecho en base a redes neuronales adaptables mediante lógica difusa (ANFIS por sus siglas en inglés, adaptive network fuzzy inference system) (Jang, 1993).

El sistema de control de los disipadores magnetoreológicos utiliza lógica difusa para la toma de decisiones, lo cual se suele denominar controladores en lógica difusa (FLC por sus siglas en inglés, Fuzzy Logic Controller). Se diseñaron

sistemas de control distintos para cada edificio prototipo, un sistema de control para el edificio cuyos aisladores tienen un 5% de amortiguamiento y otro sistema de control para el edificio cuyos aisladores tienen un 12% de amortiguamiento.

Los sistemas de control fueron obtenidos y optimizados mediante algoritmos genéticos. Específicamente, se ocuparon dos algoritmos genéticos distintos. Uno de objetivo único con mejora local de cromosomas (Furuhashi, 1995), y otro de naturaleza multiobjetiva, el NSGAI (Deb, 2000).

Posteriormente, para cada caso se evalúan los distintos sistemas de control obtenidos para determinar cuáles son los que obtienen un mejor rendimiento para una serie de registros sísmicos chilenos del terremoto de 1985.

El modelo general que calcula la respuesta en el tiempo del edificio y que incluye los distintos factores incidentes como sismo, sistema de control, voltaje aplicado y fuerza del disipador magnetoreológico se realizó mediante el software MATLAB, específicamente mediante su módulo de sistemas dinámicos SIMULINK.

## **Capítulo 2: Antecedentes**

En este capítulo se presentan los antecedentes de trabajos similares o precursores al tema en estudio.

El padre de los algoritmos genéticos es John Holland. En los años 50 entró en contacto con los primeros computadores, donde pudo llevar a cabo algunas de sus ideas, aunque no se encontró con un ambiente intelectual fértil para propagarlas. Fue a principios de los 60, en la Universidad de Michigan en Ann Arbor, donde, dentro del grupo Logic of Computers, sus ideas comenzaron a desarrollarse y a dar frutos. Y fue, además, leyendo un libro escrito por un biólogo evolucionista, R. A. Fisher, titulado “La teoría genética de la selección natural” como comenzó a descubrir los medios para llevar a cabo sus propósitos de comprensión de la naturaleza. De ese libro aprendió que la evolución es una forma de adaptación más potente que el simple aprendizaje, y tomó la decisión de aplicar estas ideas para desarrollar programas bien adaptados para un fin determinado.

En esa universidad, Holland impartía un curso titulado “Teoría de Sistemas Adaptativos”. Dentro de este curso, y con una participación activa por parte de sus estudiantes, fue donde se crearon las ideas que más tarde se convertirían en los algoritmos genéticos.

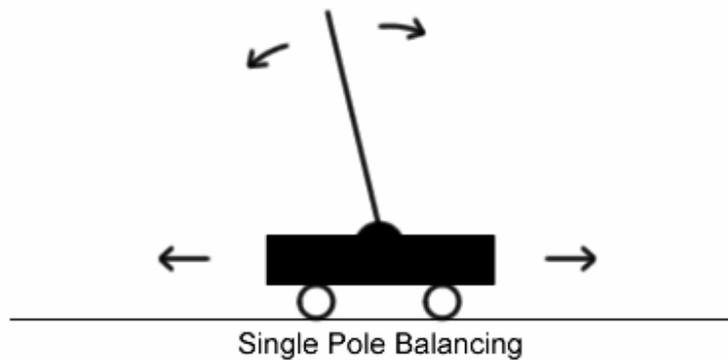
Por tanto, cuando Holland se enfrentó a los algoritmos genéticos, los objetivos de su investigación fueron dos:

- imitar los procesos adaptativos de los sistemas naturales, y
- diseñar sistemas artificiales (normalmente programas) que retengan los mecanismos importantes de los sistemas naturales.

Unos 15 años más adelante, David Goldberg conoció a Holland, y se convirtió en su estudiante. Golberg era un ingeniero industrial trabajando en diseño de tuberías y fue uno de los primeros que trató de aplicar los algoritmos genéticos a problemas industriales. Aunque Holland trató de disuadirle, porque pensaba que el problema era excesivamente complejo como para aplicarle algoritmos genéticos, Goldberg consiguió lo que quería, escribiendo un algoritmo genético en un ordenador personal Apple II. Estas y otras aplicaciones creadas por estudiantes de Holland convirtieron a los algoritmos genéticos en un campo con base suficiente como para celebrar la primera conferencia en 1985, ICGA'85. Tal conferencia se sigue celebrando bianualmente.

Sin embargo, el primero en usar algoritmos genéticos para el desarrollo de sistemas de control en lógica difusa fue Charles L. Karr.

Karr (1992) diseñó un sistema de control en lógica difusa para controlar un caso típico de sistema dinámico inestable, específicamente el problema del péndulo invertido “Cart Pole System”. En este problema se tiene un carro que puede moverse unidimensionalmente por un camino. Sobre el carro, se tiene un elemento lineal que puede girar solamente en el plano vertical del carro y el camino como se indica en la figura 2.1. El problema radica en encontrar la fuerza horizontal a aplicar en el carro de manera de conseguir un equilibrio en el que el carro esté estacionado en el centro del camino y el elemento lineal balanceado en la posición vertical.



**Figura 2.1:** Problema del péndulo invertido “Cart Pole System”

Desde entonces muchos autores se animaron a usar algoritmos genéticos para diseñar sistemas de control en lógica difusa en problemas orientados a la ingeniería civil.

Lu et al. (2003) utilizaron algoritmos genéticos para diseñar un sistema de control para resolver un problema de vibraciones verticales en una viga en voladizo.

Las primeras aplicaciones de disipadores magnetoreológicos con sistemas de control en lógica difusa a edificios aislados no utilizaban algoritmos genéticos, sino que los sistemas de control eran programados manualmente. Tal es el caso de Lin et al. (2006), que utilizaron disipadores magnetoreológicos de 300 kN para el control de un edificio con aisladores de goma de alto amortiguamiento.

Roschke y Kim (2005) utilizaron algoritmos genéticos para obtener el sistema de control en lógica difusa de un edificio aislado con disipadores magnetoreológicos de 300 kN sometido a distintos registros sísmicos. En dicho trabajo utilizó una variación del algoritmo genético llamada algoritmo genético con mejora local de cromosomas.

Todos estos algoritmos genéticos están orientados a un sólo objetivo. Desde entonces, muchos autores han buscado las modificaciones óptimas al algoritmo genético tradicional para transformarlo en una herramienta poderosa en la optimización de problemas multiobjetivo, destacando por sobre todos el NSGAI.

Barra<sup>[3]</sup> utilizó el NSGAI para diseñar el sistema de control de una pasarela peatonal con amortiguadores de masa sintonizada y disipadores magnetoreológicos sometida a cargas peatonales.

Shook<sup>[21]</sup> utilizó el NSGAI para el control de múltiples disipadores magnetoreológicos de 20 kN colocados en una estructura de 3 pisos sometidas a distintos registros sísmicos.

### **Capítulo 3: Obtención del modelo simplificado**

Se dispone de un modelo en elementos finitos (Aguilera, 2002), el cual se encuentra calibrado para representar adecuadamente la respuesta del edificio para el sismo del 24 de Marzo de 1997.

Dado que en el presente estudio sólo interesa la respuesta global del edificio (desplazamiento, velocidad, aceleración de los pisos) por sobre los esfuerzos en los elementos de la estructura resistente, es que se usa un modelo simplificado de masas concentradas por piso.

Este procedimiento se efectuó sólo para una dirección de la estructura.

#### **3.1 Modelo empotrado**

Como se mencionó anteriormente, en una primera etapa se obtiene un modelo simplificado considerando el edificio empotrado en su base.

El primer paso es la determinación de los centros de gravedad de cada piso y la masa que tributa sobre el piso. Se eligió considerar como grado de libertad por piso el desplazamiento absoluto del centro de gravedad, ya que así la matriz de masas es una matriz diagonal, donde cada término corresponde a la masa traslacional del piso en cuestión.

Las masas obtenidas se muestran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1:** Masas de cada piso

	Piso 1	Piso 2	Piso 3	Piso 4
Masa traslacional (ton*s <sup>2</sup> /m)	4.009	4.512	4.553	5.765

Cabe notar que la masa del primer piso en este caso es irrelevante pues ese piso se encuentra empotrado. La matriz de masas para este caso se muestra a continuación.

$$M := \begin{pmatrix} 4.512 & 0 & 0 \\ 0 & 4.554 & 0 \\ 0 & 0 & 5.765 \end{pmatrix} \frac{\text{tonf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

Posteriormente, se restringió el desplazamiento de los centros de gravedad de todos los pisos, menos uno, en el cual se aplicó una fuerza. Midiendo las deformaciones, las fuerzas de reacción sobre los demás centros de gravedad, amplificando todo para obtener una deformación unitaria y repitiendo el proceso para todos los grados de libertad, se obtuvo la matriz de rigidez del edificio simplificado. La matriz de rigidez se muestra a continuación.

$$k = \begin{pmatrix} 165536 & -14348 & -2715 \\ -14348 & 75019 & -31520 \\ -2715 & -31520 & 29568 \end{pmatrix} \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Con la matriz de rigidez y matriz de masas, se obtuvieron los períodos no amortiguados de la estructura mediante la resolución del problema de valores

propios, obteniéndose el siguiente período principal y error con respecto al modelo de elementos finitos (tabla 3.2).

**Tabla 3.2:** Períodos del edificio empotrado

	Modelo E. Finitos	Modelo Simplificado
T(s)	0.1367	0.1298

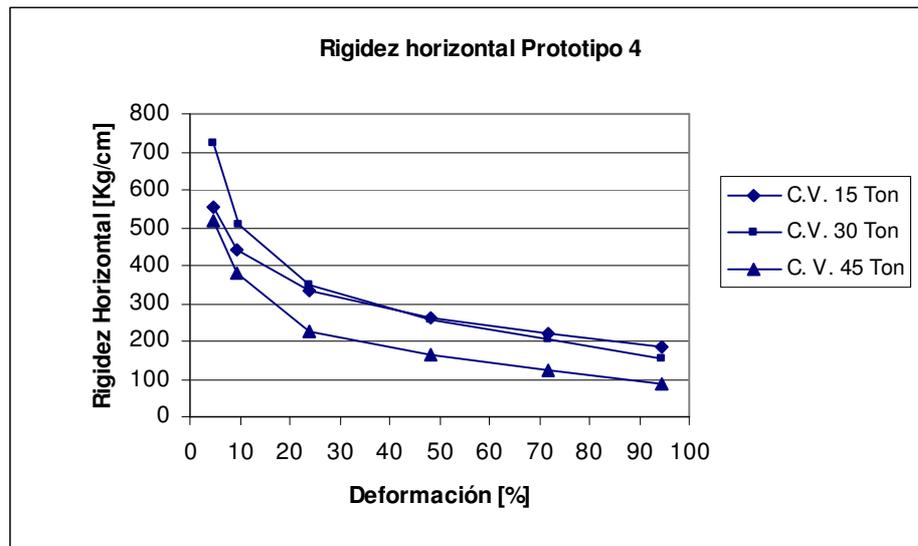
El error porcentual del período del principal modo de vibrar es de 5.03%, lo que se considera aceptable dadas las simplificaciones usadas.

### **3.2 Incorporación aisladores**

Una vez obtenido un modelo simplificado del edificio Andalucía empotrado se agregó un nuevo piso al modelo, correspondiente al nivel donde se encuentran los aisladores (1er nivel).

El valor de la rigidez horizontal de los aisladores se muestra en la figura 3.1 (Aguilera, 2002). Debido a que la rigidez del aislador varía con la deformación y a que se desea evitar caer en análisis no lineales, es que se elige una deformación de corte del 50%.

El peso sísmico del edificio es de aprox. 184,6 ton y hay en total 8 aisladores colocados de tal forma de recibir aproximadamente la misma carga axial. De esta manera la carga vertical que tributa sobre cada aislador es de 23 ton.



**Figura 3.1:** Ensayo de rigidez horizontal de los aisladores

Como se observa en la figura 3.1, la rigidez horizontal para una deformación del 50% no varía en el rango de cargas verticales de 15 a 30 ton, por lo que se determinó que para las 23 ton que tributa sobre cada aislador se tiene una rigidez de 280 kg/cm. De esta forma, las matrices de masa y rigidez para este caso son las siguientes:

$$M := \begin{pmatrix} 4.009 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.512 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.554 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.765 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{tonf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

$$k = \begin{pmatrix} 123962 & -107250 & -20071 & 3470 \\ -107250 & 129400 & -20428 & -1587 \\ -20071 & -20428 & 73746 & -32868 \\ 3470 & -1587 & -32868 & 30637 \end{pmatrix} \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

Los períodos se comparan con los obtenidos al modelar los aisladores como resortes lineales de rigidez constante de 280 kg/cm.

Los períodos obtenidos del edificio aislado se indican en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3:** Períodos del edificio aislado

	Modelo E. Finitos	Modelo Simplificado
T(s)	1.82	1.65

En este caso el error es de un 9.3 %, lo que se considera aceptable dadas las simplificaciones usadas.

### 3.3 Obtención de la matriz de amortiguamiento C

Una vez obtenidas las matrices de rigidez y de masa, sólo resta conocer la matriz de amortiguamiento para tener un modelo completo del edificio.

Dicha matriz se obtuvo con el método de Rayleigh (Chopra, 2001).

En él se postula que la matriz de amortiguamiento está dada por:

$$C = a_0M + a_1K$$

donde las constantes  $\alpha_0$  y  $\alpha_1$  se obtienen del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{pmatrix}$$

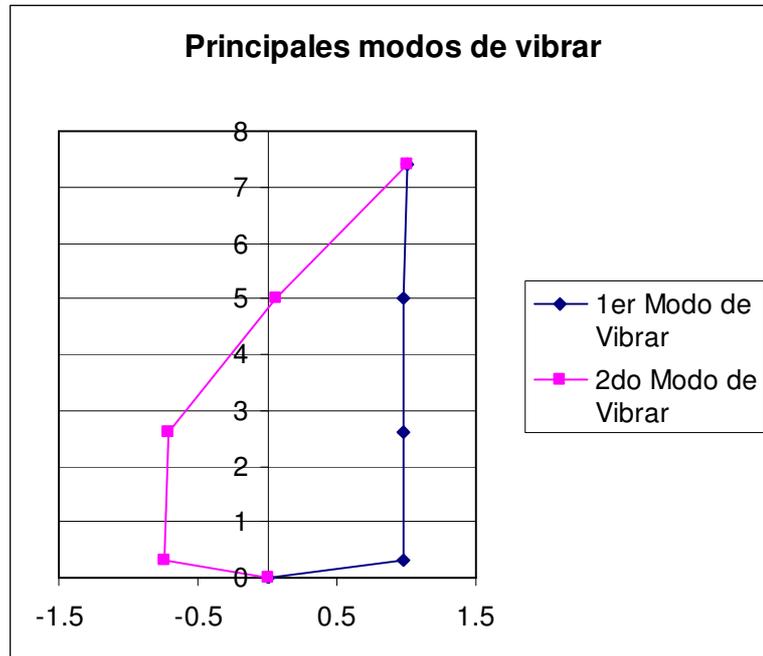
donde  $\omega_i$  y  $\omega_j$  son las frecuencias angulares de los dos modos más representativos y  $\zeta_i$  y  $\zeta_j$  son los porcentajes del amortiguamiento crítico asociados a dichos modos.

Como se mencionó anteriormente, el análisis se efectuó para los aisladores reales presentes en el edificio Andalucía y también para otros ficticios de bajo amortiguamiento (5%).

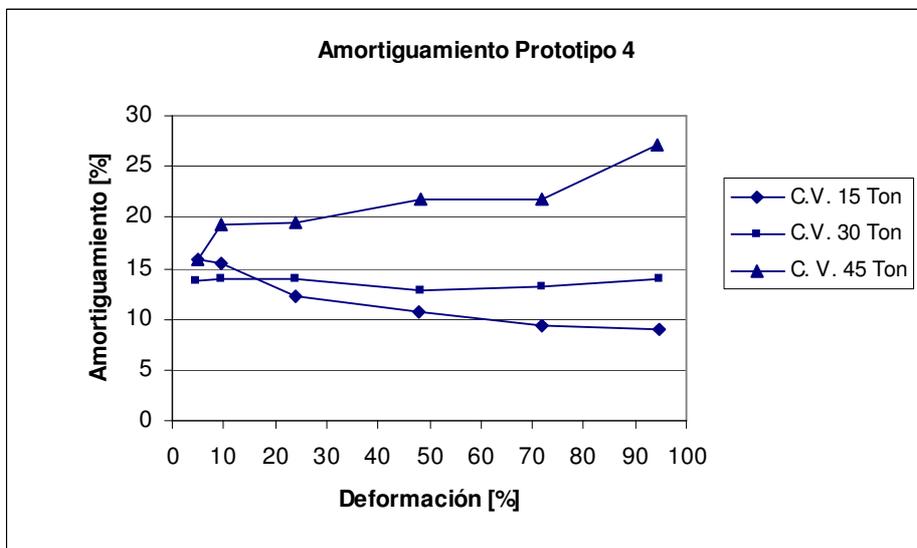
### Aisladores reales

Por tratarse de una estructura aislada, el primer modo corresponderá a deformaciones principalmente del aislador, tal como se observa en la figura 3.2. Debido a esto a ese modo se le asignará el amortiguamiento propio del aislador. Dicho valor se obtiene de Aguilera (Aguilera, 2002). Como la carga vertical sobre cada aislador es de aproximadamente 23 ton, el amortiguamiento del aislador para una deformación del 50% es de 12% (figura 3.3).

El segundo modo involucra deformaciones tanto del edificio propiamente tal como de los aisladores (figura 3.2), por lo que se le asignó a dicho modo un amortiguamiento del 5% correspondiente a un valor entre el amortiguamiento de la albañilería confinada (2%) y los aisladores (12%).



**Figura 3.2:** Principales modos de vibrar



**Figura 3.3:** Ensayo de amortiguamiento de aisladores

De esta manera las constantes  $\alpha_0$  y  $\alpha_1$  obtenidas son 0.8941 y 0.0013, respectivamente. La matriz de amortiguamiento para este caso se muestra a continuación:

$$C = \begin{pmatrix} 161.057 & -136.242 & -25.496 & 4.407 \\ -136.242 & 168.415 & -25.950 & -2.016 \\ -25.496 & -25.950 & 97.753 & -41.752 \\ 4.407 & -2.016 & -41.752 & 44.074 \end{pmatrix} \frac{\text{tonf} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

### Aisladores ficticios

Se repite el mismo proceso anterior pero esta vez se le asigna al primer modo un amortiguamiento de 5%, que corresponde a un aislador de bajo amortiguamiento. Al segundo modo de vibrar se le asigna un amortiguamiento del 3%, valor intermedio entre el amortiguamiento del aislador y de la estructura.

De esta manera las constantes  $\alpha_0$  y  $\alpha_1$  son 0.3687 y 0.0008, respectivamente. La matriz de amortiguamiento para este caso se muestra a continuación:

$$C = \begin{pmatrix} 100.403 & -85.588 & -16.017 & 2.769 \\ -85.588 & 104.928 & -16.302 & -1.266 \\ -16.017 & -16.302 & 60.530 & -26.229 \\ 2.769 & -1.266 & -26.229 & 26.574 \end{pmatrix} \frac{\text{tonf} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

## **Capítulo 4: Diseño del sistema de control**

### **4.1 Introducción**

Como el disipador magnetoreológico es un dispositivo de control semiactivo, requiere de un sistema de control para su funcionamiento óptimo. Esto es porque la aplicación de un voltaje cambia las propiedades físicas del disipador, de modo que teniendo un control sobre este voltaje, se puede lograr un cierto control sobre la fuerza que el disipador ejerce en la interfaz de aislación.

Un sistema de control se define como un algoritmo que ajusta las características de un dispositivo de control (Barra, 2007). En este caso en particular, el algoritmo de control debe decidir el voltaje a aplicar al disipador magnetoreológico. Dicha decisión debe ser en base a datos de entrada medibles en tiempo real (Dyke, 1996).

Numerosos algoritmos han sido desarrollados desde el surgimiento del concepto de control estructural activo o semiactivo.

Ejemplos de sistemas de control son el LQG (Linear Quadratic Gaussian), COC (Clipped Optimal Control), Skyhook, Groundhook, etc.

Los algoritmos de control tradicionales pueden proveer un control adecuado para cierta clase de problemas, pero esto está expuesto a una naturaleza fuertemente robusta del algoritmo. Esto se debe a la sensibilidad de los métodos tradicionales a los cambios en parámetros de una estructura como masa, amortiguamiento o rigidez. Si alguna de las propiedades usadas para desarrollar el algoritmo de control varía, su efectividad disminuye de forma significativa (Shook, 2008).

## **4.2 Sistemas de control en lógica difusa (FLC)**

### **4.2.1 Introducción a la lógica difusa**

La lógica difusa es una forma particular de relacionar variables de entrada con variables de salida. Provee un enfoque más parecido al razonamiento humano que a ecuaciones matemáticas para relacionar las variables de entrada con las de salida (Kelly, 1997).

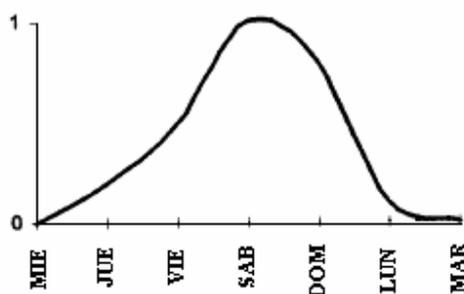
En el último tiempo, los sistemas de control que hacen uso de lógica difusa (FLC por sus siglas en inglés, Fuzzy Logic Controller) han sido aceptados de forma paulatina, debido a su naturaleza robusta y su habilidad de abordar la incerteza. Un sistema de inferencia difuso evita ecuaciones complejas y un tiempo de proceso extenso, características que típicamente son sinónimo de los algoritmos de control tradicionales. La lógica difusa permite ahorrar tiempo de proceso y abordar procesos no lineales con relativa facilidad (Shook, 2008).

### **4.2.2 Funciones de pertenencia y conjuntos difusos**

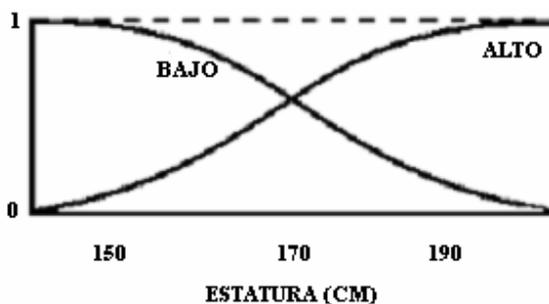
La teoría de conjuntos difusos fue desarrollada por Lofti Zadeh (1965). Zadeh explica que la motivación para crear la lógica difusa era poder representar matemáticamente incertidumbre y vaguedad y proporcionar herramientas formalizadas para trabajar con la imprecisión intrínseca en muchos problemas.

El concepto de grado de pertenencia es el que más diferencia a la lógica difusa de la lógica tradicional. La idea de Zadeh es hacer que el rango de valores de pertenencia de un elemento a un conjunto pueda variar en el intervalo  $[0,1]$  en lugar de limitarse a uno de los valores del par  $\{0,1\}$  (Falso/Verdadero).

Así por ejemplo, si se tiene el conjunto difuso “Días del fin de semana”, según la lógica tradicional sólo 2 días pertenecerían a ese conjunto, que corresponde a los elementos “Sábado” y “Domingo”. Sin embargo el raciocinio humano indica que “Viernes” tiene un grado de pertenencia parcial a este conjunto. De esa manera se le pueden asignar grados de pertenencia total o parcial al conjunto “Días del fin de semana” a todos los días de la semana (Figura 4.1).



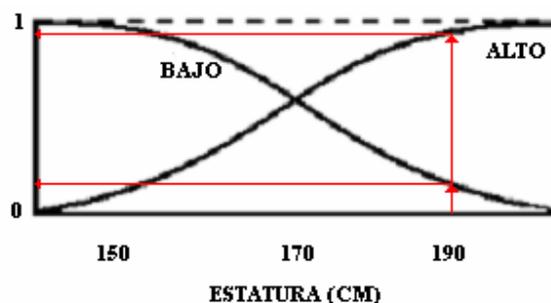
**Figura 4.1:** Grados de pertenencia al conjunto difuso “días del fin de semana”



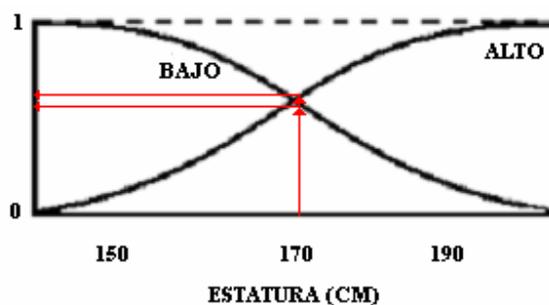
**Figura 4.2:** Grados de pertenencia a los conjuntos “Bajo” y “Alto”

Otro ejemplo se ve en la figura 4.2. Si para una variable “Estatura” se tienen los conjuntos difusos “Bajo” y “Alto”, una persona de 190 cm de estatura tendría una pertenencia casi completa (0.9 aprox.) al conjunto “Alto” y casi nula (0.2 aprox.) al conjunto “Bajo” (Figura 4.3). Sin embargo una persona de 170 cms pertenece por

igual al conjunto “Alto” y “Bajo”, tiene una pertenencia parcial del mismo orden (0.6 y 0.65 aprox) a ambos conjuntos (Figura 4.4).



**Figura 4.3:** Grados de pertenencia de una persona de 190 cms de estatura



**Figura 4.4:** Grados de pertenencia de una persona de 170 cms de estatura

### 4.2.3 Operadores lógicos

Lo más importante que debe saberse acerca de la lógica difusa es que es un super conjunto de la tradicional lógica booleana. En otras palabras, si los grados de pertenencia a un conjunto difuso son llevados a sus extremos de 1 (pertenencia total) y 0 (pertenencia nula), las operaciones de la lógica tradicional entregarán los mismos resultados. En la figura 4.5 se ve un ejemplo de los operadores en la lógica tradicional.

A	B	A and B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

**AND**

A	B	A or B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

**OR**

A	not A
0	1
1	0

**NOT**

**Figura 4.5:** Tabla de verdad para lógica tradicional

Sin embargo, como se explicó anteriormente, en la lógica difusa la verdad de cualquier afirmación puede ser parcial y no completamente falsa o verdadera, es decir las variables de entrada toman valores entre 0 y 1. Bajo ese escenario, es necesario definir funciones que preserven los resultados de la figura 4.5 para los valores extremos de pertenencia 0 y 1 y cuya aplicación se pueda extender para el rango completo de valores que adoptan las variables de entrada.

Para el operador lógico AND (“Y”), la función buscada puede ser el mínimo, para el operador OR (“O”) puede ser el máximo y para el operador NOT (“NO”) puede ser el complemento de la suma. Con dichas funciones, la tabla de verdad para los casos extremos (1 y 0) se observa en la figura 4.6.

A	B	min(A,B)
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

**AND**

A	B	max(A,B)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

**OR**

A	1 - A
0	1
1	0

**NOT**

**Figura 4.6:** Tabla de verdad para lógica difusa

Se observa que la tabla de verdad de estos operadores lógicos coincide con la lógica tradicional para los valores extremos de pertenencia (0 y 1).

Dado que ahora existen funciones para los operadores lógicos, el valor de salida de dichos operadores se puede extender para todo el rango de las variables de entrada (0 a 1).

#### **4.2.4 Reglas Si – Entonces**

Las reglas si-entonces son la forma de representar una sentencia en lógica difusa. Éstas definen el conjunto difuso correspondiente a una variable de salida dependiendo de los valores dados por las variables de entrada.

Una regla si-entonces tiene la siguiente forma:

*Si  $x$  es  $A$ , entonces  $y$  es  $B$*

En la expresión anterior “ $x$ ” es una variable de entrada, y es una variable de salida, “ $A$ ” y “ $B$ ” son los conjuntos difusos de las variables de entrada y salida respectivamente. La parte “Si” de la regla es llamada “antecedente” y la parte “Entonces” es llamada “consecuente”. El mecanismo de las reglas si-entonces es el siguiente: a la variable de entrada “ $x$ ” se le asigna un grado de pertenencia parcial al conjunto “ $A$ ” (entre 0 y 1). Este proceso se llama difusificación. Este valor de pertenencia (o salida del antecedente), es el valor de entrada al consecuente, modificando el conjunto difuso “ $B$ ” mediante la “implicación”. Dicha implicación usualmente es la truncación del conjunto mediante la función mínimo o producto escalar. Posteriormente, mediante la dedifusificación del conjunto  $B$  modificado, se

obtiene el valor de salida “y”. La función de defusificación usualmente es el centroide del conjunto modificado B.

También es posible tener reglas con más de una variable de entrada, por ejemplo:

*Si y es A o x es B, entonces z es C*

En este caso, a la variable “y” le pertenece un grado de pertenencia a “A” (llámese  $\mu_1$ ) y a la variable “x” le pertenece un grado de pertenencia a “B” (llámese  $\mu_2$ ). Como se definió anteriormente, el operador lógico “o” queda definido por la función máximo, por lo que el valor que cambiará el conjunto “C” es el máximo entre  $\mu_1$  y  $\mu_2$ .

Generalmente en lógica difusa se tiene más de una regla. Como cada regla entregará por separado un conjunto modificado del consecuente es necesario definir cómo se determinará el valor de salida final considerando todas las reglas. Este proceso se llama “Agregación” y tiene lugar antes de la defusificación. El método de agregación más común es el denominado “Mandami” y consiste básicamente en considerar el máximo de todos los conjuntos para cada valor de la variable de salida.

Un ejemplo ilustrativo se puede apreciar en la figura 4.7, en donde la lógica difusa se aplica para decidir la propina de un restaurante. Este problema consiste de 2 variables de entrada (servicio y comida), una variable de salida (% de propina) y 3 reglas. Para la variable de entrada “servicio” hay 3 conjuntos difusos definidos (pobre, bueno y excelente), para la variable de entrada “comida” hay 2 conjuntos difusos definidos (rancia y deliciosa) y para la variable de salida hay 3 conjuntos difusos definidos (poco, promedio y generoso). Se observa como en cada regla, el

conjunto de salida es truncado con la función mínimo. Posteriormente, todos los conjuntos truncados son agregados con la función máximo y finalmente se defusifica con la función centroide.

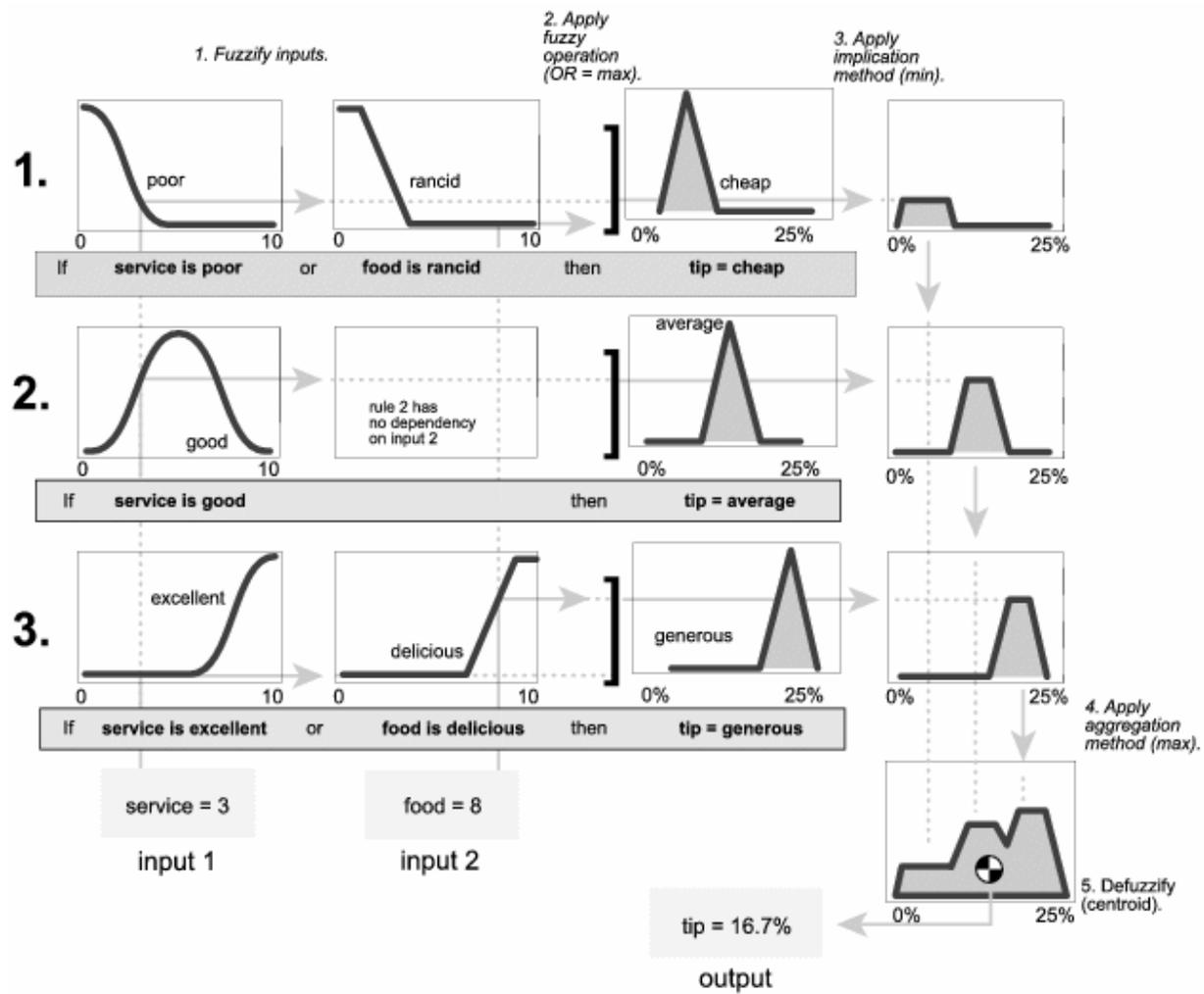


Figura 4.7: Ejemplo de aplicación de lógica difusa a la decisión de propina

### **4.3 Algoritmo genético**

El sistema de control para decidir la propina de un restaurante recién expuesto muestra una de las cualidades de los sistemas de control en lógica difusa: pueden ser diseñados mediante la intuición, sin requerir ecuaciones complejas que caractericen su funcionamiento. En el caso anterior, uno de acuerdo a sus gustos podría ajustar la forma de las funciones de pertenencia para saber hasta que punto un servicio es considerado “pobre” o una comida “deliciosa”.

Sin embargo, para diseñar un sistema de control que minimice la respuesta de un edificio con un sistema de aislación ante varios sismos de distintas características, los factores que inciden en la respuesta son tantos y tan variados que basarse exclusivamente de la intuición puede resultar muy difícil, o simplemente el sistema de control obtenido puede ser deficiente.

Debido a ello es conveniente tener un algoritmo de optimización, que ajuste todos los parámetros que definen un sistema de control de manera de optimizar su funcionamiento.

#### **4.3.1 Introducción a los algoritmos genéticos**

El algoritmo genético es un método para resolver problemas de optimización con o sin restricciones, el cual está basado en la selección natural, proceso que controla la evolución biológica. El algoritmo genético repetidamente modifica una población de posibles soluciones al problema de optimización. En cada paso, el algoritmo genético selecciona soluciones individuales de la población total de soluciones para ser padres y los usa para producir soluciones hijos para la siguientes generaciones. A medida que pasan las generaciones, la población evoluciona a una solución

óptima del problema de optimización. El algoritmo genético se puede usar para resolver una gran variedad de problemas de optimización, incluyendo problemas en los cuales la función objetivo es discontinua, no diferenciable, estocástica o altamente no lineal (MATLAB, 2007).

El algoritmo genético se diferencia de un algoritmo de optimización tradicional básicamente en dos grandes aspectos (tabla 4.1)

**Tabla 4.1:** Comparación entre algoritmos tradicionales y algoritmos genéticos

Algoritmo Tradicional	Algoritmo Genético
En cada iteración genera un sólo punto el cual va convergiendo al óptimo	En cada iteración genera una población de puntos. El mejor punto de cada iteración va convergiendo al óptimo
El siguiente punto es seleccionado mediante criterios determinísticos	Los siguientes puntos son seleccionados mediante criterios que incluyen azar.

A continuación se definen una serie de términos relevantes al algoritmo genético:

### Individuos

En el algoritmo genético se le llama individuo a una posible solución del problema de optimización. Cada individuo está caracterizado por un cromosoma a través del proceso de codificación.

En el cromosoma se guarda toda la información de la potencial solución para poder ser evaluada. Cada cromosoma está hecho de una secuencia de “genes” de cierto alfabeto. Un alfabeto podría consistir de dígitos binarios, números reales, números enteros, símbolos, matrices, etc.

En el diseño original de Holland, el alfabeto estaba limitado a dígitos binarios. Desde entonces, el problema de la codificación ha sido estudiado por muchos investigadores. Se ha demostrado que una codificación natural es más eficiente en términos de tiempo computacional.

### Función de Puntuación

Se conoce en la literatura en inglés del algoritmo genético como “Fitness Function”. Básicamente la función de puntuación es una función que le asigna a un individuo en particular una puntuación, es decir, califica cuantitativamente a una solución en particular para poder diferenciarlas de otras soluciones.

En un algoritmo genético tradicional, la función de puntuación es la función que se desea minimizar, es decir, sería el análogo a la función objetivo de un problema de optimización tradicional.

### Población y Generaciones

Como se mencionó anteriormente, el algoritmo genético, a diferencia de otros algoritmos de optimización, trabaja con un conjunto de potenciales soluciones o individuos. Dicho conjunto se llama población.

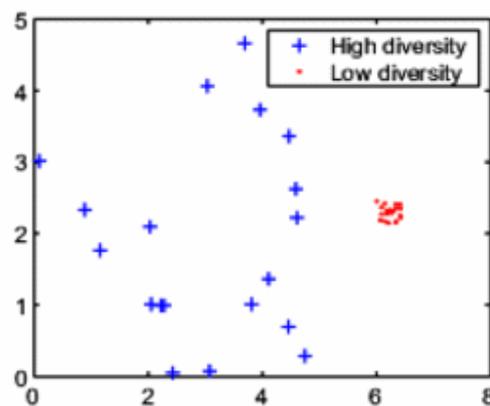
En cada iteración la población va variando a través de los operadores del algoritmo genético. Se denomina una nueva generación a una población nueva de individuos.

### Diversidad

La diversidad se refiere a la distancia promedio que hay entre los individuos de una población. Una población tiene una alta diversidad si la distancia promedio entre los individuos es alta. A su vez tiene una baja diversidad si la distancia promedio entre los individuos es baja.

En la figura 4.8 se puede apreciar ejemplos de diversidad alta y baja. En ese caso se muestran individuos representados por un par de números positivos (2 variables). La población azul muestra una alta diversidad comparado con la roja.

Una alta diversidad es esencial para el algoritmo genético pues le permite buscar soluciones en un rango más amplio.



**Figura 4.8:** Diversidad alta y baja de una población

### Padres e Hijos

En cada iteración el algoritmo genético selecciona padres de la población para formar los niños o hijos que pasarán a formar los individuos de la siguiente generación.

Usualmente el algoritmo genético selecciona los individuos con mejor puntuación para ser padres.

### Funcionamiento del algoritmo genético

En la figura 4.9 se puede apreciar un diagrama de flujo de un algoritmo genético, consistente básicamente en los siguientes pasos:

1) El algoritmo comienza creando una población inicial de individuos al azar dentro de cierto rango.

2) El algoritmo crea secuencia de nuevas poblaciones. En cada iteración, el algoritmo usa individuos de la población actual para crear la próxima generación. Para crear la siguiente generación, el algoritmo genético realiza las siguientes operaciones:

2.1) El algoritmo genético evalúa cada individuo mediante la función de puntuación.

2.2) Escala las puntuaciones de los individuos en un rango más adecuado para la función de selección. Este proceso es netamente para mejorar la eficiencia de la selección, no es un proceso imprescindible.

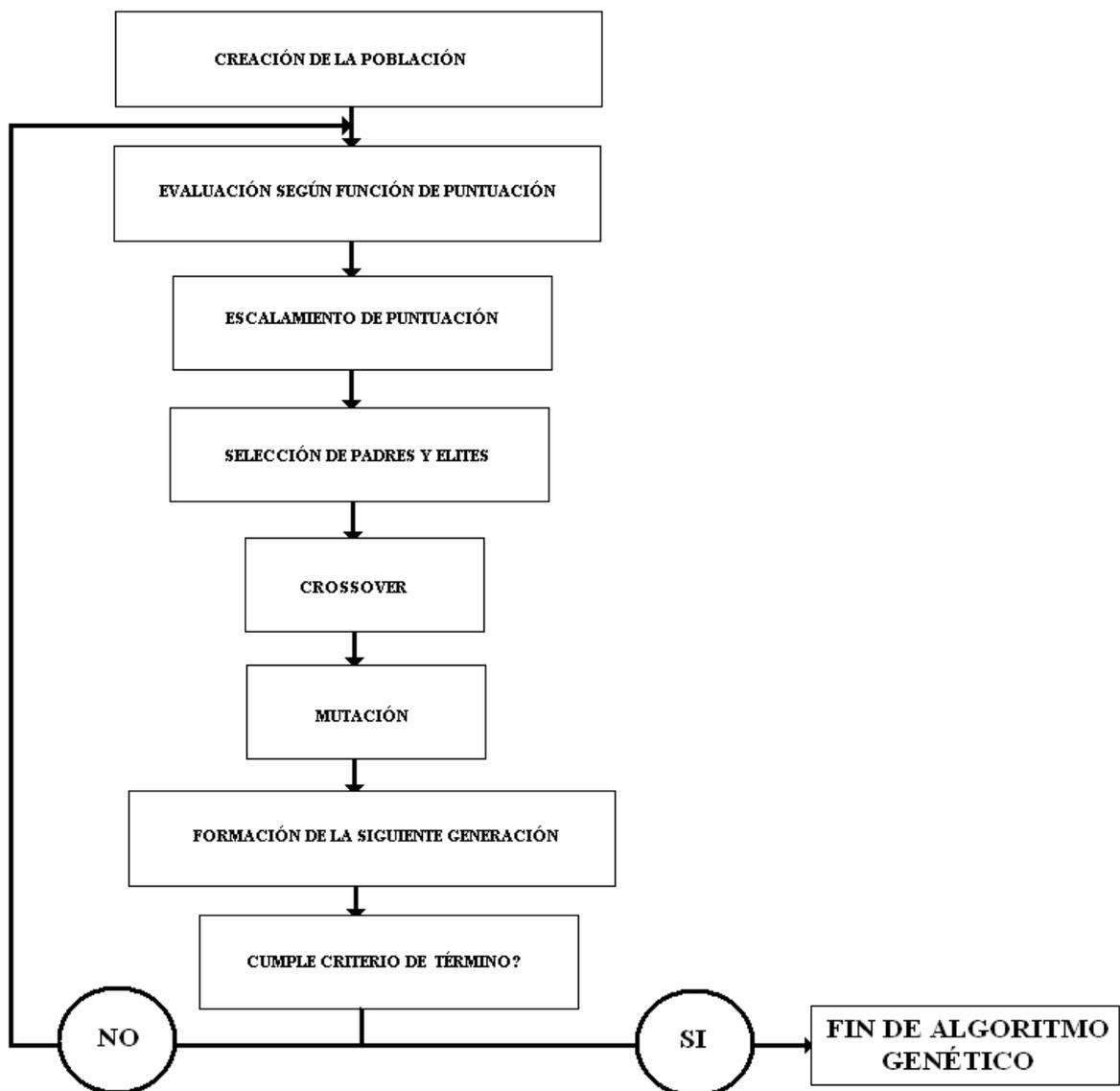
2.3) Selecciona individuos llamados padres en base a su puntuación escalada.

2.4) Algunos individuos, usualmente los con mejor puntuación, son elegidos como individuos elites. Dichos individuos pasan automáticamente a formar parte de la siguiente generación. Un individuo puede ser elite y padre a la vez.

2.5) Se crean los individuos de la siguiente generación. Estos individuos pueden estar formados a partir de un padre (mutación) o de dos padres (entrecruce o crossover)

2.6) Reemplaza los individuos actuales por los niños para formar la siguiente generación.

3) El algoritmo genético para cuando se satisface alguna condición de término. Dicha condición puede ser haber alcanzado una puntuación específica, alcanzar un cierto número de generaciones, pasar cierto número de generaciones sin mejorar la puntuación del mejor individuo de la población, etc.



**Figura 4.9:** Diagrama de flujo de un algoritmo genético tradicional

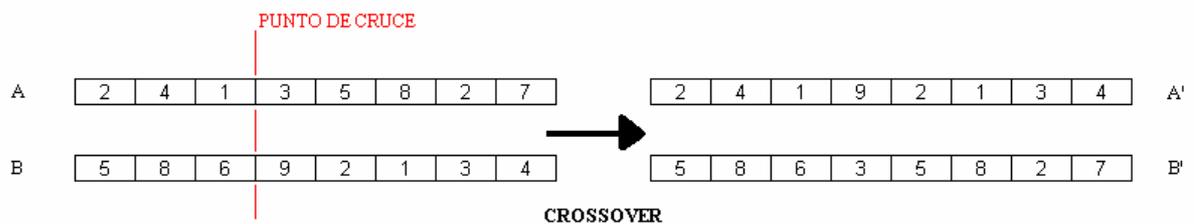
### Crossover o entrecruce

El entrecruce o crossover es un operador del algoritmo genético. Básicamente lo que hace es combinar dos padres para obtener dos hijos. Hay muchas variaciones de este operador, siendo los más comunes el crossover de un punto y el crossover de dos puntos.

En el crossover de un punto, se combinan las variables de los cromosomas a partir de cierto índice.

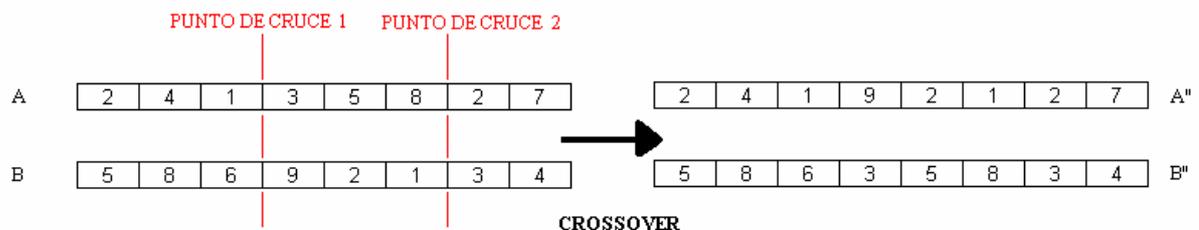
En la figura 4.10 se puede apreciar este operador para 2 individuos A y B, representados por cromosomas de 8 variables cada uno. En este caso, el operador crossover coloca en el cromosoma A todos los valores de los genes del cromosoma B a partir del punto de cruce que en este caso resulta ser el cuarto gen. La operación es similar para el cromosoma B, siendo reemplazados todos sus genes a partir del cuarto por los del cromosoma A.

De esta manera se obtienen los hijos A' y B' a partir de los padres A y B.



**Figura 4.10:** Crossover de un punto

El crossover de dos puntos tiene un funcionamiento muy similar. La única diferencia es que ocupa dos puntos de cruce en vez de uno, por lo que sólo combina los genes entre los puntos de cruce. Esto se puede apreciar en la figura 4.11.



**Figura 4.11:** crossover de dos puntos

## Mutación

La mutación es otro operador del algoritmo genético. A diferencia del crossover, sólo requiere de un padre y produce un hijo.

Básicamente lo que este operador hace es cambiar el valor de uno o varios genes del padre de acuerdo a una distribución de probabilidades.

Los operadores de mutación más comunes ocupan una función de probabilidad uniforme o una gaussiana. En la primera de ellas, el valor que tome un gen dado tendrá la misma probabilidad que cualquier otro valor dentro del rango admisible para ese gen. En el segundo caso, el valor de la mutación tendrá una forma gaussiana centrada en el valor que el gen tenía antes de la mutación.

### **4.3.2 Algoritmo genético con mejoramiento local de cromosomas**

Un inconveniente del algoritmo genético tradicional es que generalmente requiere de una gran población. Por ejemplo, el tamaño de la población se recomienda que sea por lo menos igual al número de variables en un cromosoma (MATLAB, 2007). Adicionalmente, el algoritmo genético tradicional necesita un gran número de generaciones para obtener resultados satisfactorios.

Con estos inconvenientes en mente, se desarrolló una variación del algoritmo genético que permite una búsqueda del óptimo más eficientemente (Furuhashi, 1995).

El algoritmo genético con mejoramiento local de cromosomas (GALIC por su significado en inglés, Genetic Algorithm with Local Improvement of

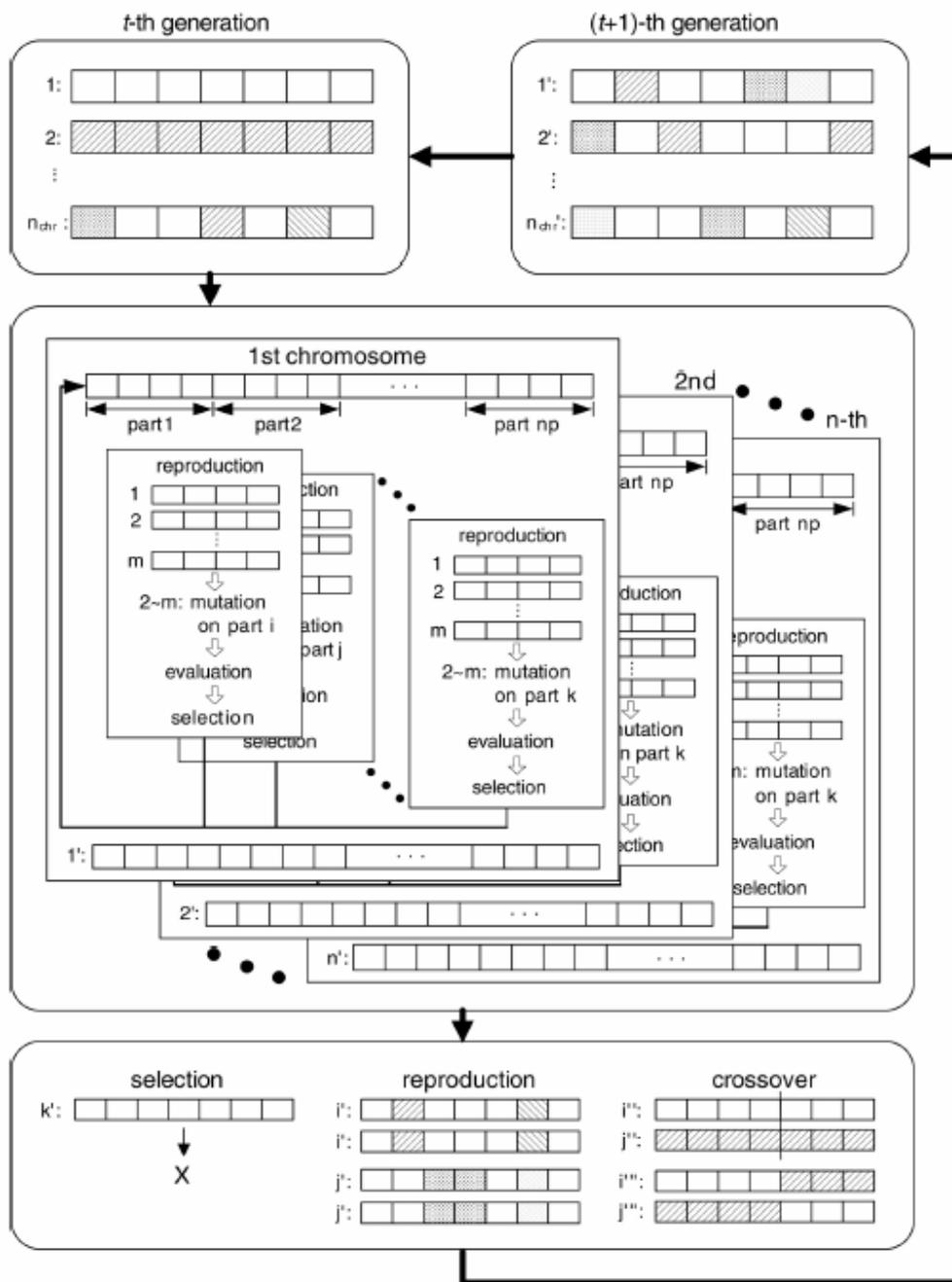
Chromosomes) es una variación del algoritmo genético tradicional. Sigue siendo un algoritmo que busca la minimización de una función objetivo (es decir, de objetivo único), sólo que presenta unas variaciones en el operador de mutación.

La idea básica del GALIC es evaluar mutaciones del cromosoma en intervalos más cortos, permitiendo así una mejora en la eficiencia de este operador.

En la figura 4.12 se observa el flujo del GALIC.

Para la aplicación del algoritmo, un individuo debe ser dividido en  $n$  partes. El primer cromosoma 1 de la población actual se copia  $m$  veces. De esos  $m$  clones,  $m-1$  son mutados y 1 permanece intacto. Luego, el operador mutación se aplica sólo a la parte  $i$ , siendo  $i$  un número escogido al azar entre 1 y  $n$ . Posteriormente, los  $m$  clones son evaluados con la función de puntuación y el clon mejor evaluado es el que sobrevive. Esta operación se repite para todas las partes del cromosoma, obteniéndose finalmente el cromosoma final 1'.

Luego, el proceso se repite para todos los individuos de la población actual para luego dar paso a los operadores tradicionales de selección y crossover, obteniéndose así la generación siguiente de individuos.



**Figura 4.12:** Flujo del GALIC

### **4.3.3 Algoritmo genético con clasificación no dominada**

La diferencia principal entre el algoritmo multi-objetivo y el de objetivo único es el método con el cual se asigna la puntuación mediante la función de puntuación (fitness function) a las soluciones potenciales. En un comienzo, cada solución tiene un vector que contiene la puntuación de la solución con respecto a cada objetivo o variable a ser minimizada. Este vector debe transformarse en un único valor escalar para que la función de selección pueda seleccionar adecuadamente a los padres. La transformación se consigue realizando un ordenamiento relativo entre las soluciones, y luego asignando la puntuación de acuerdo al rango obtenido. Las soluciones individuales se comparan en término de su dominancia Pareto (Deb et al., 2000). Esto significa que si una solución 'a' es mejor que la solución 'b' para ambos objetivos, entonces se dice que la solución 'a' domina sobre la solución 'b' o, en otras palabras, la solución 'b' es dominada por la solución 'a'. Si una solución no es dominada por ninguna otra, dicha solución pertenece al rango 1. Después de completar el primer rango, todas las soluciones que pertenecen a ese rango se sacan de la población y el mismo proceso se repite para formar los rangos 2, 3 etc. Este proceso continúa hasta que todas las soluciones han sido asignadas a un rango. En efecto, este proceso crea una serie de frentes de soluciones no-dominadas y le asigna a cada solución un valor de puntuación (en este caso el rango) a fin de que la función de selección pueda seleccionar adecuadamente a los padres.

Deb et al. (2000) adoptaron este procedimiento para NSGAI. El ranking multi-objetivo, que impacta principalmente en la asignación de puntuación, es la principal diferencia entre ambos métodos.

#### **4.4 Modelo del disipador magnetoreológico**

La incorporación de la fuerza del disipador magnetoreológico en un análisis en el tiempo del edificio en estudio requiere de un modelo del disipador. Dicho modelo debe relacionar adecuadamente las variables de entrada (desplazamiento, velocidad y voltaje) con la variable de salida (fuerza).

Dada su naturaleza altamente no lineal, es necesario realizar distintos experimentos para evaluar su comportamiento dinámico (Roschke, 2005).

Uno de los primeros modelos de un disipador magnetoreológico de buena precisión corresponde al modelo modificado Bouc-Wen (Dyke, 1996). Este modelo predice la respuesta en un amplio rango de condiciones de operación. Consta de siete ecuaciones diferenciales, las que contienen 14 parámetros, sin embargo el tiempo computacional requerido para resolver dichas ecuaciones diferenciales es demasiado alto.

Como alternativa de modelación surgen las redes neuronales adaptables mediante lógica difusa (Jang, 1993).

En un primer momento, se usó como alternativa el modelo de un disipador de 30 ton de capacidad (Roschke, 2004), pero dada las dimensiones del edificio en estudio, ese disipador ejercía fuerzas demasiado grandes, de manera tal que en vez de obtener un control de las aceleraciones mitigándolas, se producía un aumento de éstas.

Se descartó un escalamiento del disipador, pues ahí se pasaría a tratar de un disipador ficticio, cuyas propiedades dinámicas no estarían avaladas por ningún ensayo.

El otro inconveniente presente con el disipador de 30 ton, era que por defectos de fabricación el control que había sobre él era escaso comparado con otros disipadores, es decir, la pendiente de la curva Fuerza – Velocidad para el caso de máximo voltaje no era muy distinta que la del caso de voltaje nulo. Todo esto atentaba contra el objetivo de encontrar un sistema de control eficiente.

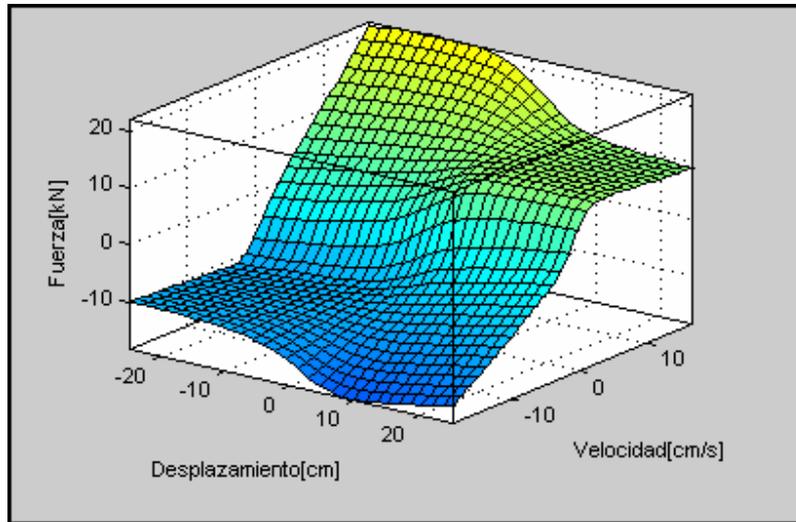
Por esto se decidió usar varios disipadores de 2 ton de capacidad (Roschke, 2005)

Los parámetros del sistema de inferencia difuso obtenidos son los siguientes:

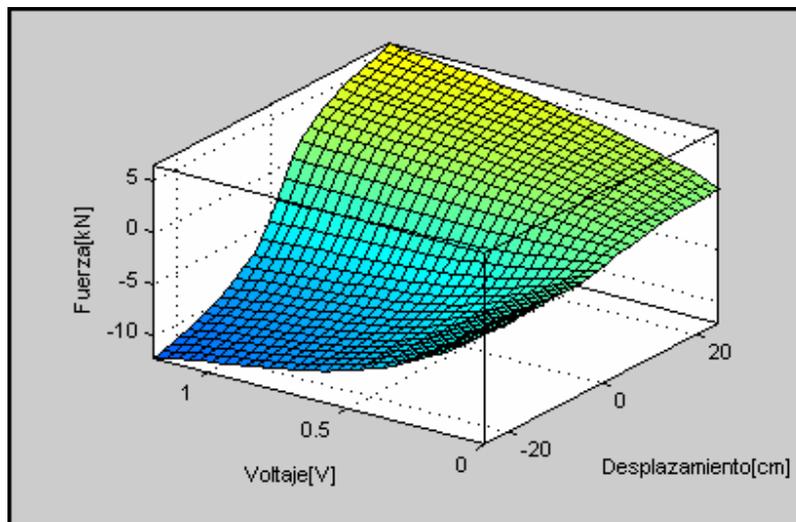
**Tabla 4.2:** Parámetros del sistema de inferencia difuso

<b>Modelo</b>	B1_Seat_222
<b>Tipo sistema de inferencia</b>	Sugeno
<b>Variables de entrada</b>	Desplazamiento[cm]
	Velocidad [cm/s]
	Voltaje [V]
<b>Variables de salida</b>	Fuerza [kN]
<b>Rango de variables de entrada</b>	
Desplazamiento [cm]	[-24.98 24.99]
Velocidad [cm/s]	[-18.29 16.67 ]
Voltaje [V]	[0 1.2]
<b>Rango de variables de salida</b>	
Fuerza [kN]	[-15.02 15.68]
<b>Tipo FP variables de entrada</b>	Gbellmf
<b>Nº FP variables de entrada</b>	[3 3 3]
<b>Tipo FP variables de salida</b>	Lineal
<b>Nº FP variables de salida</b>	9
<b>Nº Reglas difusas</b>	8
<b>Método "Y"</b>	Producto
<b>Método "O"</b>	Máximo
<b>Método de Implicancia</b>	Mínimo
<b>Método de agregación de reglas</b>	Máximo
<b>Método Dedifusificación</b>	Promedio Ponderado

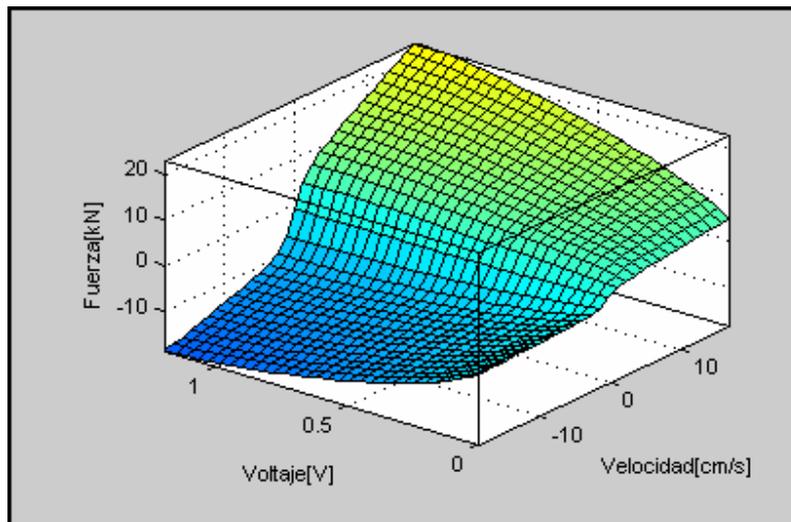
Las curvas que relacionan las variables de entrada con las de salida se ven en las figuras 4.13, 4.14 y 4.15.



**Figura 4.13:** Fuerza v/s desplazamiento y velocidad



**Figura 4.14:** Fuerza v/s desplazamiento y voltaje



**Figura 4.15:** Fuerza v/s velocidad y voltaje

#### 4.5 Modelación en Simulink

Simulink es un software para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Soporta sistemas tanto lineales como no lineales, por lo que es la herramienta ideal para incorporar todos los componentes que intervienen en el problema en estudio, como son la excitación o sismo externo, el edificio con sus aisladores, el disipador magnetoreológico y su sistema de control.

El modelo realizado en Simulink calcula la respuesta en el tiempo del edificio para todos sus grados de libertad, considerando todos los componentes del sistema descritos anteriormente.

En la figura 4.16 se ve el esquema general del modelo en Simulink con sus distintas componentes, las cuales son explicadas a continuación.

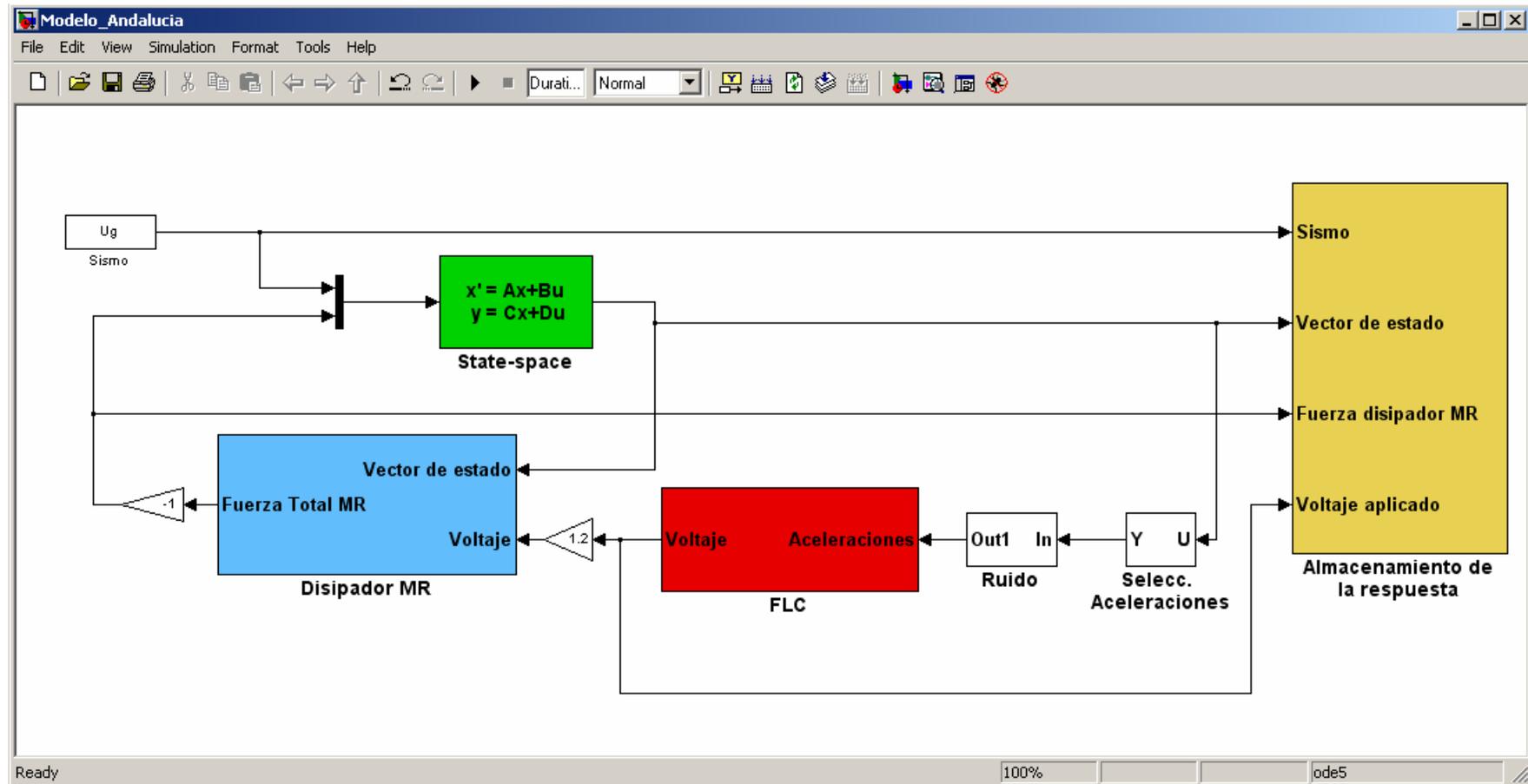


Figura 4.16: Modelo en Simulink

## Sismo

Este bloque representa el sismo de entrada al sistema. Básicamente consiste en un vector en  $\mathbb{R}^2$ , con una fila indicando los tiempos y en la otra la aceleración del suelo en dicho tiempo.

## State-Space

La ecuación de movimiento del edificio con los disipadores MR es la siguiente:

$$m \ddot{u} + c \dot{u} + ku = P(t) - \Gamma f$$

donde  $m$  es la matriz de masas,  $c$  la matriz de amortiguamiento,  $k$  la matriz de rigidez,  $\Gamma$  corresponde a un vector de 0 y 1, donde 1 indicará el grado de libertad en el cual la fuerza del disipador MR,  $f$ , está aplicada. Finalmente,  $P(t)$  son las fuerzas solicitantes que en este caso corresponden a fuerzas inerciales producidas por un sismo, es decir,  $P(t) = -m\iota \cdot \ddot{u}_g$  con  $\iota$  vector de influencia (vector de solo 1 en este caso) y  $\ddot{u}_g$  el registro de aceleraciones del suelo.

La ecuación (1) puede ser reescrita en su forma Space-State con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX + DU\end{aligned}$$

donde  $X$  es el vector de estado,  $U$  el vector de entrada e  $Y$  el vector de salida.

En este caso, los vectores se descomponen como sigue:

$X = \{u_1, u_2, u_3, u_4, \dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{u}_3, \dot{u}_4\}$  donde  $u_i$  corresponde al desplazamiento relativo del grado de libertad o piso  $i$ .

$U = \{\ddot{u}_g, f\}$  donde  $\ddot{u}_g$  es la aceleración del suelo y  $f$  la fuerza del disipador MR.

$Y = \{u_1, u_2, u_3, u_4, \dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{u}_3, \dot{u}_4, \ddot{u}_{a1}, \ddot{u}_{a2}, \ddot{u}_{a3}, \ddot{u}_{a4}, \ddot{u}_g\}$  donde  $\ddot{u}_{ai}$  es la aceleración absoluta del grado de libertad o piso  $i$ .

Para que el sistema de ecuaciones escrito en la forma State-Space sea equivalente a la ecuación (1), se deben definir las matrices A, B, C y D como sigue:

$$A = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} \\ -m^{-1}k & -m^{-1}c \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 1} & I_{4 \times 1} \\ -1_{4 \times 1} & m^{-1}\Gamma \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} I_{4 \times 4} & 0_{4 \times 4} \\ 0_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} \\ -m^{-1}k & -m^{-1}c \\ 0_{1,4} & 0_{1,4} \end{bmatrix}$$

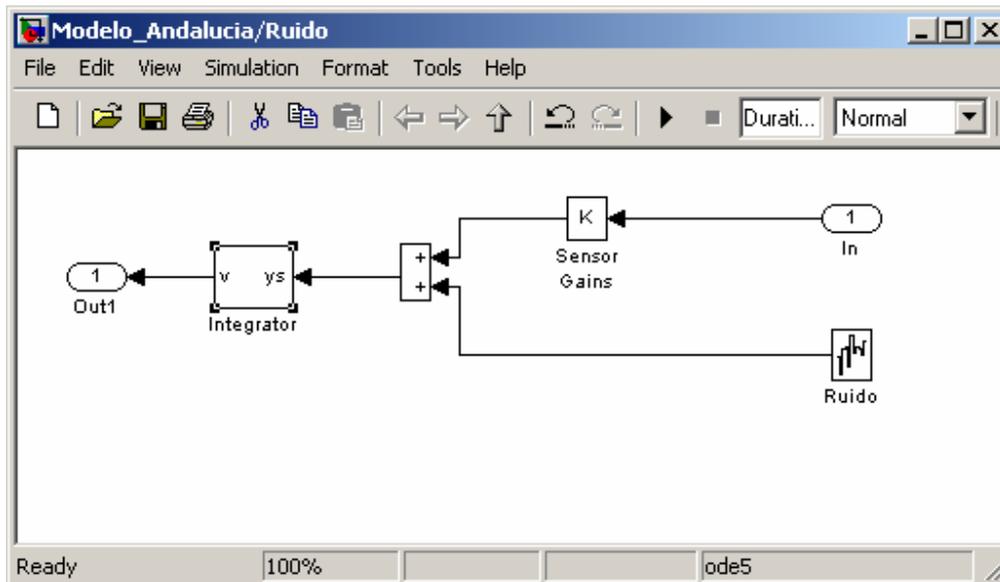
$$D = \begin{bmatrix} 0_{4,1} & 0_{4,1} \\ 0_{4,1} & 0_{4,1} \\ 0_{4,1} & m^{-1}\Gamma \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

La ventaja de escribir el sistema de ecuaciones diferenciales en su forma State-Space es que Simulink tiene incorporado un módulo que resuelve automáticamente la ecuación diferencial si ésta está expresada en su forma State-Space. Dicha solución es más eficiente en término de tiempo computacional que una programación propia de un algoritmo de análisis en el tiempo (Chopra, 2001), lo cual es sumamente importante como se verá en el capítulo 4.6.

#### Selecc. Aceleraciones y Ruido

Estos bloques sólo preparan los datos de entrada al sistema de control en lógica difusa. Como se verá en la siguiente sección, las variables de entrada elegidas son la aceleración absoluta en el 4to piso y esa misma aceleración pero retrasada cierta cantidad de tiempo. Para eso, es necesario filtrar de todo el vector de salida Y sólo la parte correspondiente a la aceleración absoluta del cuarto piso. Esa es la única función del bloque Selecc. Aceleraciones.

El bloque ruido es el encargado de hacer un poco más realista la situación. En un sismo real, las mediciones de los sensores no serán exactas y estarán afectadas a variaciones de la señal, llamadas ruido.



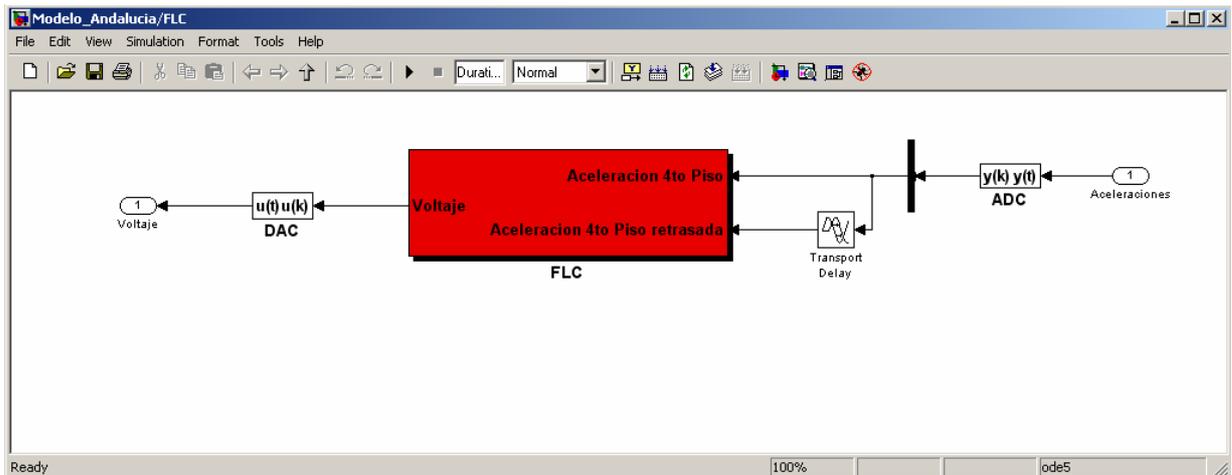
**Figura 4.17:** Adición de ruido a la señal

El subsistema Ruido se observa en la figura 4.17, donde se puede apreciar que a la entrada In correspondiente a la aceleración ya filtrada del vector de salida, se le suma otra señal llamada Ruido.

Un sistema de inferencia difuso tiene la habilidad de obtener señales de salida aceptables a pesar de un significativo nivel de ruido en la señal de entrada. Para muchos algoritmos de control tradicionales la presencia de este ruido es algo inapropiado, pues no permite desarrollar un control óptimo (Shook, 2008).

## FLC

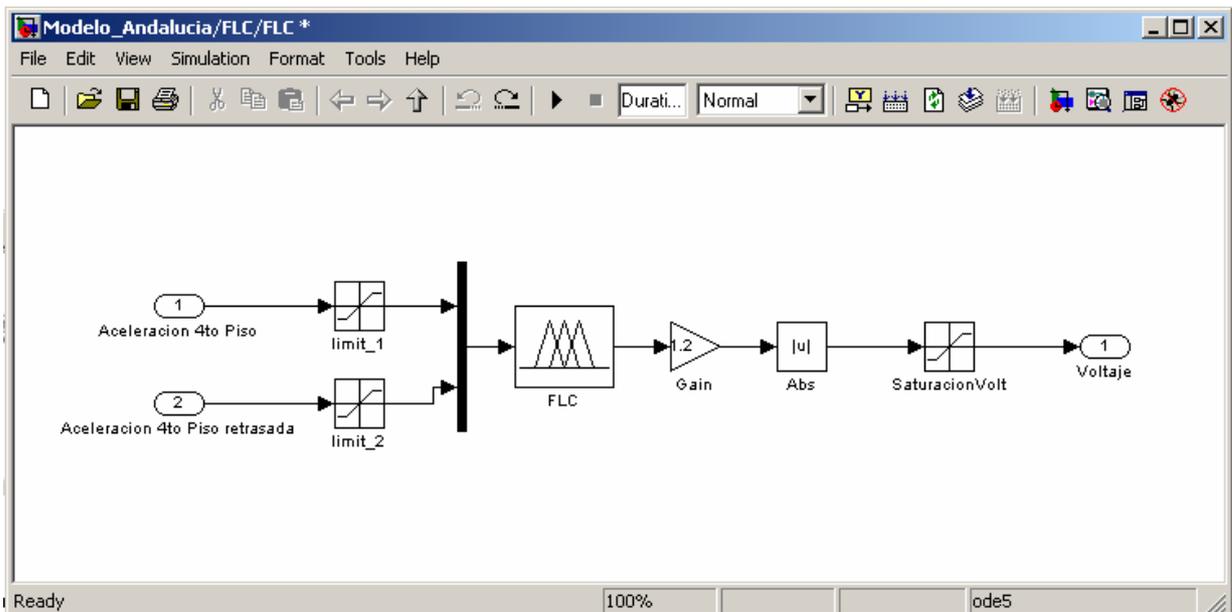
Este bloque corresponde al sistema de control. El subsistema se puede ver en la figura 4.18.



**Figura 4.18:** Bloque FLC

En este bloque básicamente divide la aceleración en 2 señales, la actual y una retrasada, las cuales representan las dos variables que el sistema de control toma como entradas para decidir el voltaje aplicado.

Una mirada más profunda al sistema de control se observa en el subsistema FLC (figura 4.19).



**Figura 4.19:** Sistema de control

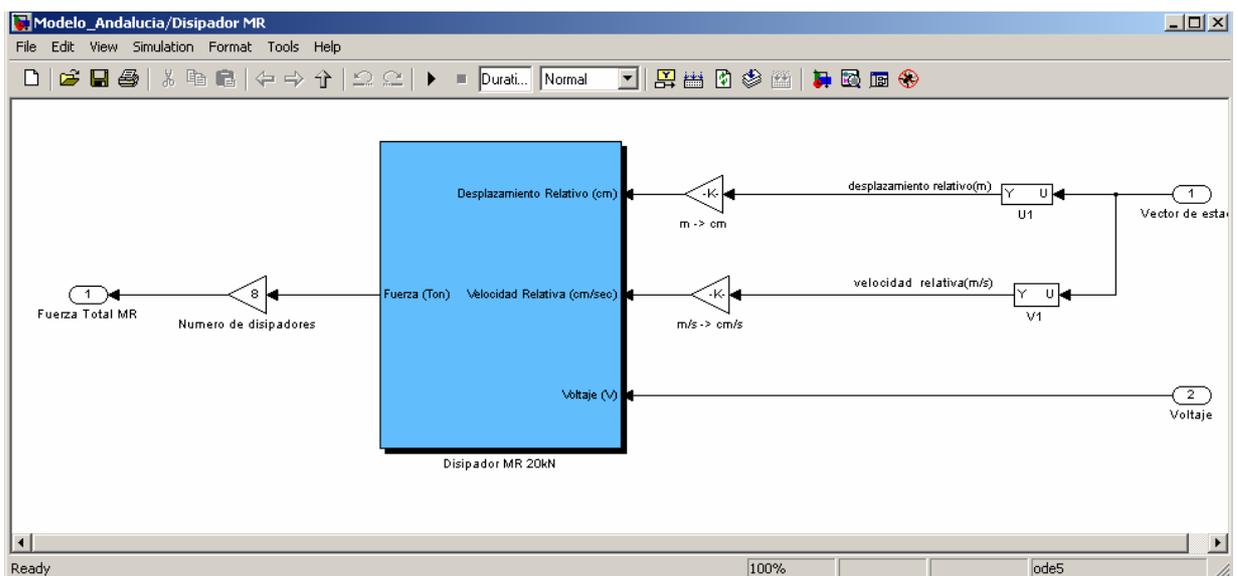
En él se observa que ambas aceleraciones pasan por bloques de saturación (limit\_1 y limit\_2). Dichos bloques aplican límites superior e inferior a las señales, de esta manera, el sistema de control queda acotado a un rango de operación, que debe ser definido con simulaciones que permitan saber en qué rango de aceleraciones se va a mover la estructura para los sismos de diseño utilizados. En este caso, dichas variables fueron establecidos en  $-3 \text{ m/s}^2$  y  $3 \text{ m/s}^2$ , ya que para los sismos de diseños utilizados (ver sección 4.6), en ningún momento las aceleraciones absolutas pasan ese valor al haber disipadores magnetoreológicos presentes.

Posteriormente, ambas señales entran al sistema de control propiamente tal. Este bloque FLC es el bloque que Simulink utiliza para representar sistemas de lógica difusa.

Un problema que frecuentemente se presenta en los sistemas de control en lógica difusa es que es muy difícil alcanzar los valores extremos, en este caso el voltaje máximo (1.2 V) o mínimo (0 V). Claramente, va a haber momentos en que para la estructura lo más conveniente será una fuerza de control o voltaje máximo y otros en los cuales lo más conveniente será una fuerza lo más chica posible o un voltaje mínimo. Por esta razón, el sistema de control está diseñado para entregar valores entre -1.2 V y 1.2 V. Lo que se logra de esta manera es que el caso de voltaje mínimo (0 V) deje de ser un caso extremo y por lo tanto sea un caso más frecuente. Posteriormente, a la señal se le aplica un bloque que obtiene el valor absoluto de ésta (bloque Abs), eliminándose así los voltajes negativos. Se observa también que el voltaje de salida del sistema FLC se multiplica por 1.2 y posteriormente se le aplica un bloque de saturación a los valores de operación reales de los disipadores. El objetivo de esto es hacer el caso de voltaje máximo más frecuente, ya que señales cercanas a los 1.2 V quedarían en dicho valor al multiplicarse por 1.2 y posteriormente acotarse en 1.2V.

## Disipador MR

Dicho bloque consiste en el modelo del disipador magnetoreológico (figura 4.20). Toma como variables de entrada el voltaje proveniente del sistema de control y el vector de estado, el cual se descompone en el desplazamiento y velocidad relativos del primer piso o nivel del disipador. Las variables de entrada son transformadas a las unidades del modelo del disipador (cm), el cual entrega la fuerza aplicada. Dicha fuerza es multiplicada por el número de disipadores magnetoreológicos presente (variable según amortiguamiento de los aisladores, ver sección 4.8).



**Figura 4.20:** Bloque Disipador MR

## 4.6 Optimización del sistema de control

Se mencionó anteriormente la conveniencia de usar un sistema de control en lógica difusa. Se introdujo los algoritmos genéticos como herramienta de optimización del sistema de control, como también el modelo general en Simulink, necesario para el cálculo de la respuesta del edificio Andalucía.

En este capítulo se lleva a cabo la optimización del sistema de control propiamente tal mediante la aplicación de los dos algoritmos genéticos introducidos anteriormente.

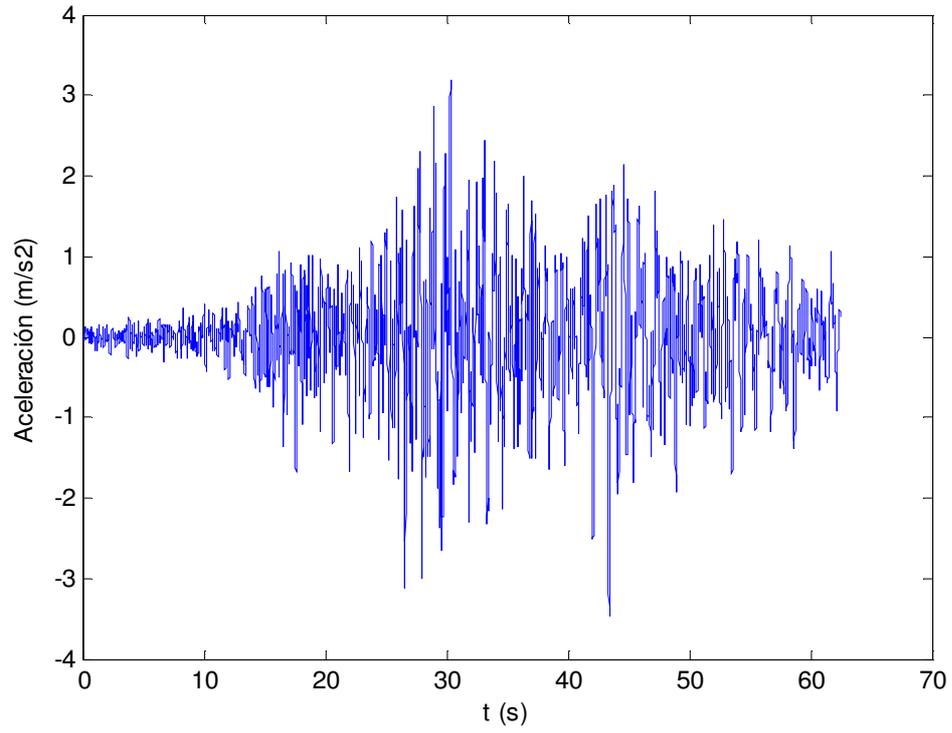
El sistema de control busca minimizar la respuesta del edificio para distintos sismos chilenos. El sistema de control durante un sismo decide continuamente el voltaje a aplicar al disipador magnetoreológico en base a variables de entrada que caractericen el estado dinámico de la estructura. Estas variables deben ser medibles en tiempo real y por lo menos deben ser dos, ya que un sistema de control con una sola variable de entrada no es confiable (Barra, 2007). En este caso se eligió como variables de entrada la aceleración y la aceleración retrasada en 0.025s en el cuarto piso, básicamente, por su facilidad para medirla.

La respuesta de la estructura es un término amplio que es necesario acotar. En este caso, las variables que se minimizan son la aceleración absoluta máxima del cuarto piso y el desplazamiento relativo máximo del cuarto piso con respecto al suelo. La aceleración absoluta es necesario minimizarla pues las fuerzas inerciales resultantes son directamente proporcionales a ella. Por otro lado, es muy frecuente que en edificios aislados se presenten grandes deformaciones producto de la flexibilidad del sistema de aislación. Es conveniente minimizar dichas deformaciones pues, en caso de ser muy grandes, podría ocurrir un choque de la estructura con estructuras

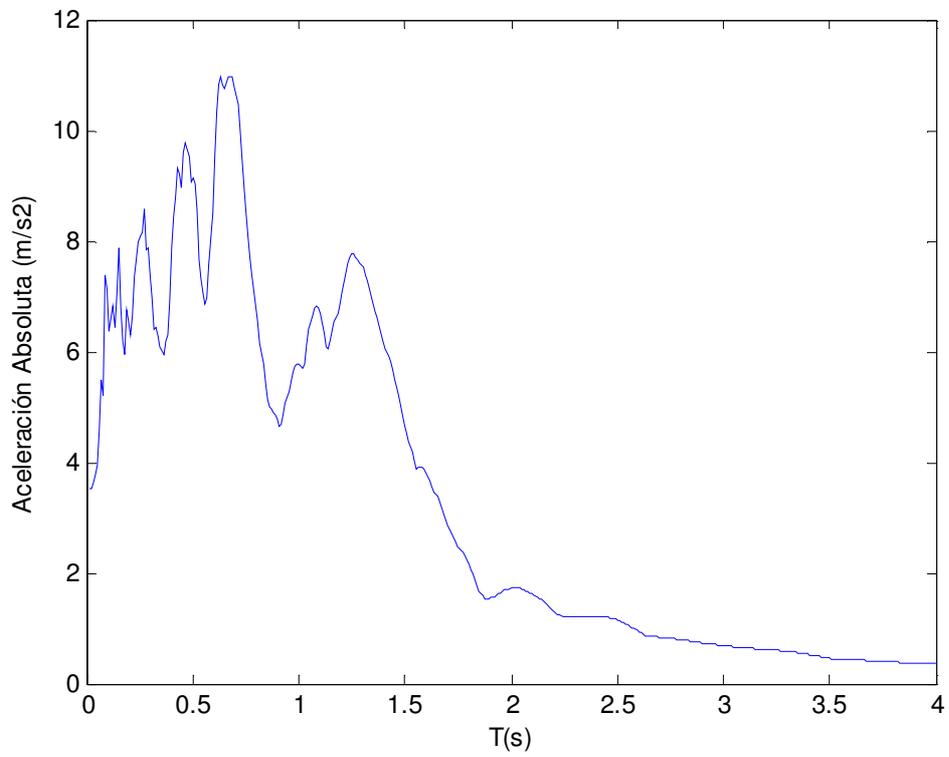
vecinas, presentar problemas elementos no estructurales que interactúen entre el suelo y el edificio como cañerías o también sobrepasar la capacidad de deformación de los aisladores.

También es necesario definir para qué sismos se busca minimizar la respuesta. En este estudio se busca un sistema de control robusto, es decir, se privilegia más que el sistema de control minimice la respuesta para varios sismos a que produzca una gran disminución de la respuesta en un sismo, pero amplifique la respuesta en otros. Esto es porque no se sabe exactamente a qué sismos va a estar sujeta la estructura a futuro, por lo que el entrenamiento del sistema de control para un solo sismo es muy riesgoso, ya que podría resultar en un sistema de control que amplifique la respuesta en vez de reducirla.

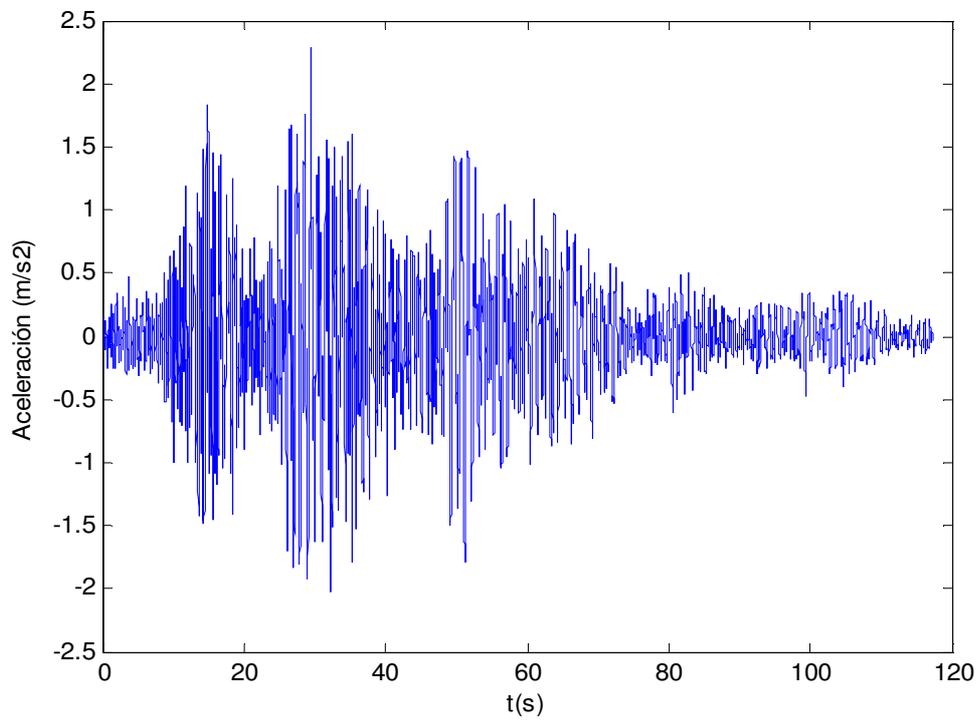
Para lograr esa robustez, se utilizó como datos de entrenamiento cuatro sismos del terremoto chileno de 1985. Estos son Llay-Llay S10W, Ventana WE, Viña del Mar S20W y Lolleo N10E. Los acelerogramas y espectros de aceleración de los sismos para un amortiguamiento del 5% se pueden ver en las figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28.



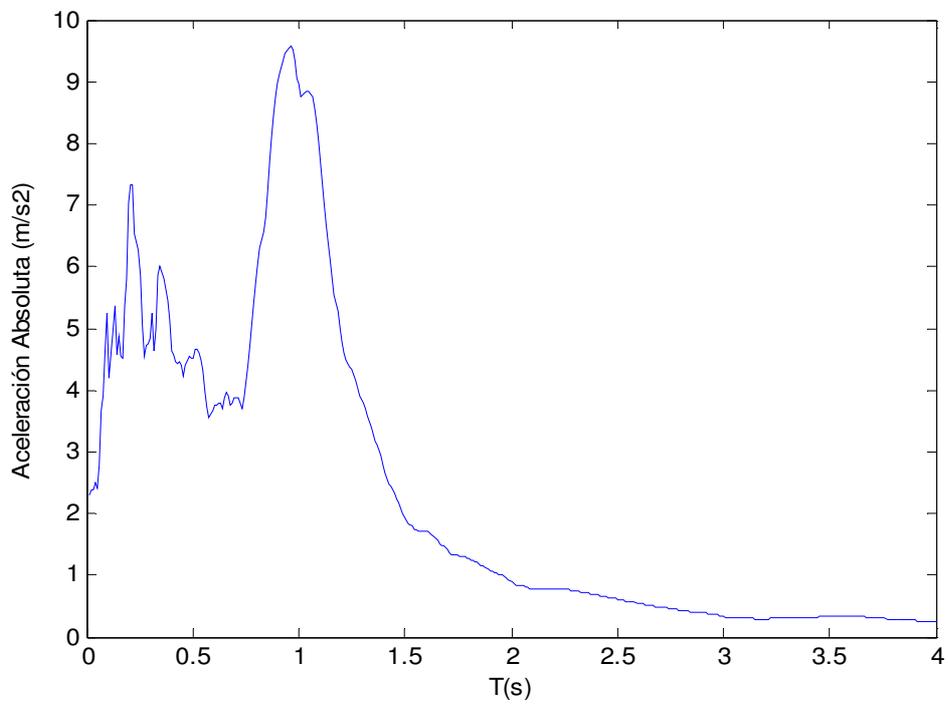
**Figura 4.21:** Acelerograma Llay-Llay S10W



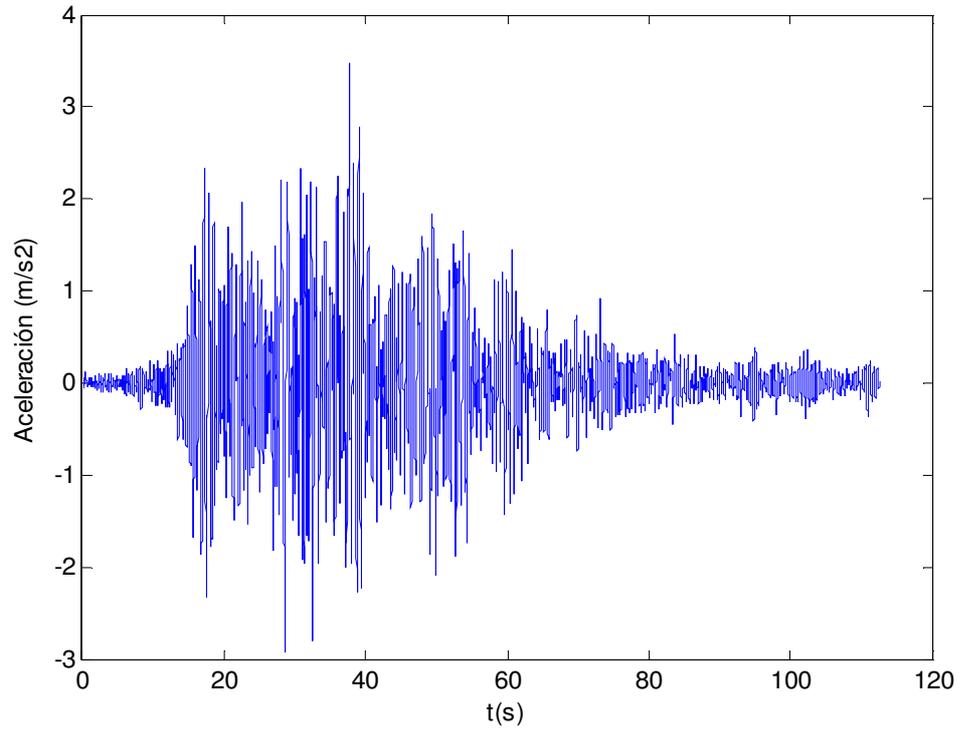
**Figura 4.22:** Espectro de aceleraciones Llay-Llay S10W



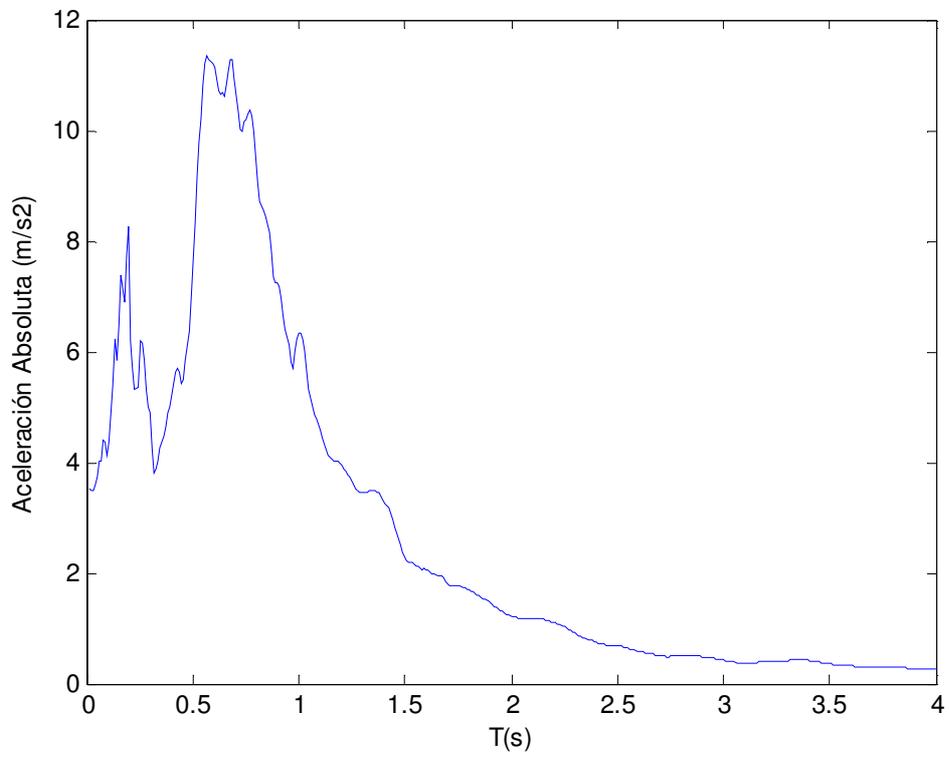
**Figura 4.23:** Acelerograma Ventanas WE



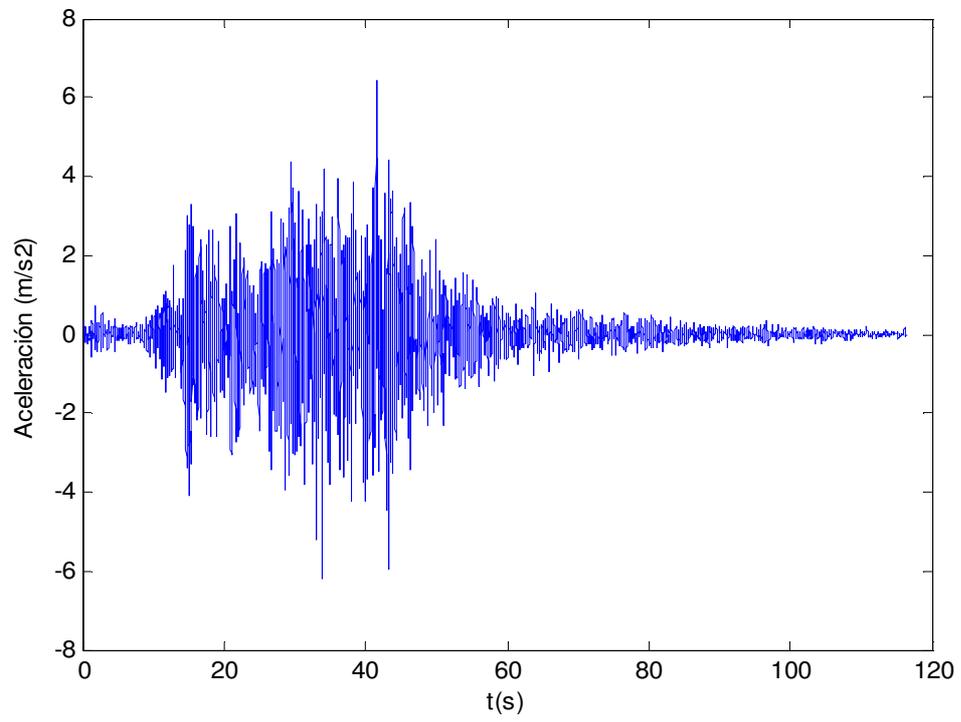
**Figura 4.24:** Espectro de aceleraciones Ventanas WE



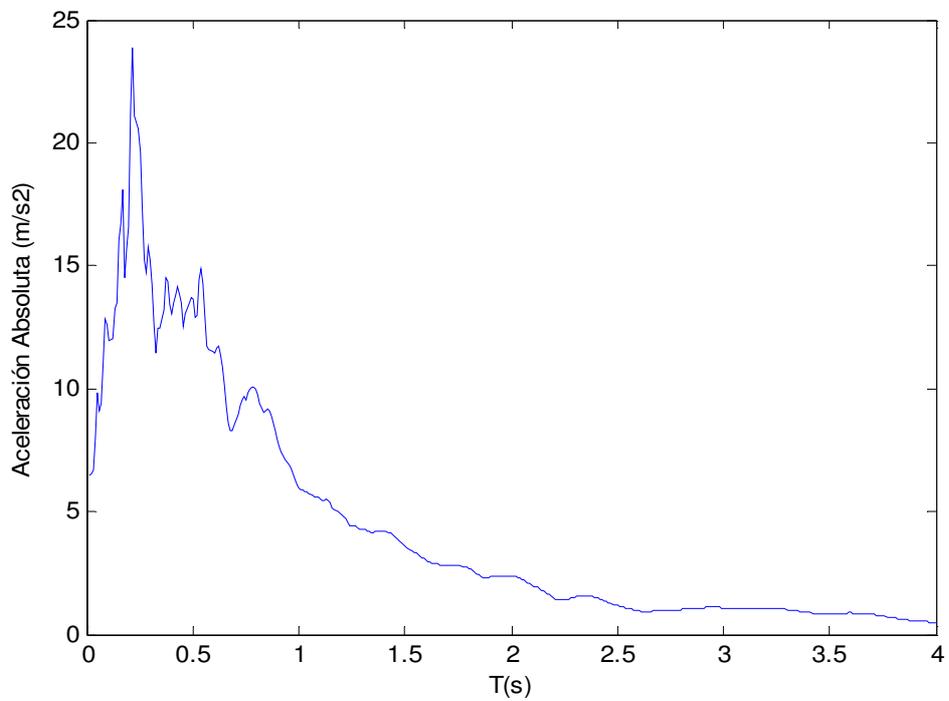
**Figura 4.25:** Acelerograma Viña del Mar S20W



**Figura 4.26:** Espectro de aceleraciones Viña del Mar S20W



**Figura 4.27:** Acelerograma Lolloe N10E



**Figura 4.28:** Espectro de aceleraciones Lolloe N10E

Como se mencionó en la introducción, el estudio se realiza para 2 situaciones distintas. Una para el edificio Andalucía con los aisladores que realmente tiene en la actualidad (12% de amortiguamiento) y otro con aisladores hipotéticos de amortiguamiento menor (5%). Para ambos casos se obtiene sistemas de control distintos.

Mediante prueba y error se logró determinar que la cantidad óptima de disipadores magnetoreológicos necesarios para cada caso no era la misma. Para el caso de aisladores con 5% de amortiguamiento el óptimo eran 8 disipadores y para el caso de 12% de amortiguamiento, el óptimo eran 4 disipadores.

### Codificación del cromosoma

La caracterización de una solución en algoritmos genéticos se denomina cromosoma. En este caso, un cromosoma contiene toda la información necesaria para caracterizar completamente un sistema de control.

El sistema de control en lógica difusa estará compuesto de 20 reglas de lógica difusa cada uno. Dichas reglas relacionarán un conjunto de pertenencia de cada variable de entrada (aceleración y aceleración retrasada) con un conjunto de pertenencia de salida (voltaje) de la siguiente manera:

*Regla 1:*

*Si aceleración pertenece al conjunto 1 y aceleración retrasada pertenece al conjunto 2, entonces voltaje pertenece al conjunto 3.*

*Regla 2:*

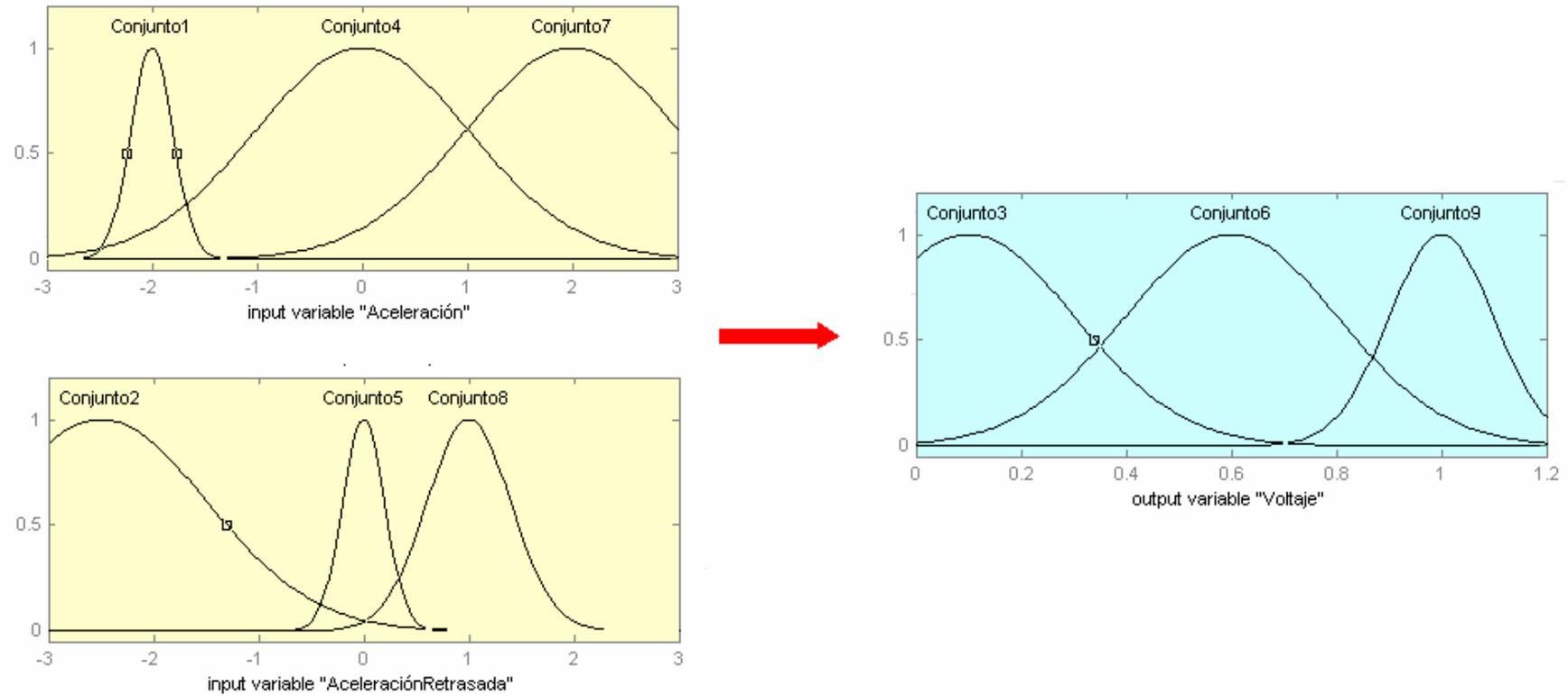
*Si aceleración pertenece al conjunto 4 y aceleración retrasada pertenece al conjunto 5, entonces voltaje pertenece al conjunto 6.*

*Regla 3:*

*Si aceleración pertenece al conjunto 7 y aceleración retrasada pertenece al conjunto 8, entonces voltaje pertenece al conjunto 9.*

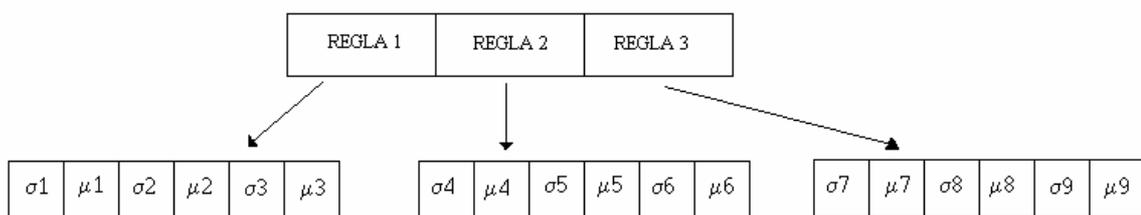
*Etc.*

En la figura 4.29 se puede observar un ejemplo de sistema de control para las tres reglas recién descritas.



**Figura N° 4.29:** Ejemplo de sistema de control para 3 reglas con funciones de pertenencia gaussianas

Para cada regla de lógica difusa es necesario definir tres conjuntos difusos. En total se necesitan 60 conjuntos difusos para definir las 20 reglas. Por otra parte, se utilizaron conjuntos difusos de forma gaussiana, los cuales quedan definidos por dos variables, media y desviación estándar (figura 4.30). Por lo tanto, para definir un sistema de control se necesitan 120 variables.



**Figura N° 4.30:** Cromosoma para 3 reglas

El tamaño de la población inicial para cada algoritmo es distinto. Para el algoritmo genético con mejoramiento local de cromosomas (GALIC) se necesita usualmente un tamaño de población inicial menor que para el algoritmo genético con clasificación no dominada (NSGAI) (Roschke, 2006), por lo que el tamaño de población inicial para GALIC sería de 10 individuos y para el NSGAI sería de 50 individuos.

Como se mencionó anteriormente, las variables a minimizar son la aceleración máxima absoluta del cuarto piso y el desplazamiento máximo relativo del cuarto piso con respecto al suelo. Esto no presenta problemas para algoritmos genéticos multiobjetivos como el NSGAI, pero si para algoritmos de objetivo único como el GALIC, donde hay que necesariamente elegir sólo una variable a minimizar.

Mediante prueba y error se observó que al minimizar el desplazamiento máximo, la disminución de aceleraciones era muy pequeña o en algunos casos incluso aumentaba. Sin embargo, al tratar de minimizar la aceleración, adicionalmente se presentaban disminuciones importantes del desplazamiento, por lo que se decidió que la variable a minimizar con el GALIC sería la máxima aceleración absoluta del cuarto piso.

Para la ejecución del GALIC, se necesita definir la cantidad de partes  $n$  en que se dividirá cada cromosoma y cuantas copias  $m$  se clonarán de cada parte. En este estudio se dividió en cuatro partes de cinco reglas cada una, y cada parte fue clonada 3 veces.

Resumiendo, se corrieron dos algoritmos genéticos distintos (GALIC y NSGAI) para dos casos cada uno (amortiguamiento del aislador de 5% y 12%). Ciertos parámetros son comunes a ambos algoritmos genéticos (cantidad de reglas y cantidad de variables por cromosoma, tipo de función de pertenencia y variables de entrada). Otros varían según el tipo de algoritmo genético (tamaño de población inicial, variables a minimizar) y otros varían según el amortiguamiento del aislador (cantidad de disipadores magnetoreológicos). Todo esto se puede observar en la tabla N° 4.3.

**Tabla N° 4.3:** Parámetros utilizados para los algoritmos genéticos

	<b>GALIC</b>		<b>NSGAI</b>	
	<b>5%</b>	<b>12%</b>	<b>5%</b>	<b>12%</b>
<b>Cantidad de reglas</b>	20	20	20	20
<b>Cantidad de variables</b>	120	120	120	120
<b>Tipo de función de pertenencia</b>	Gaussiana	Gaussiana	Gaussiana	Gaussiana
<b>Cantidad de disipadores magnetoreológicos</b>	8	4	8	4
<b>Variable de entrada 1</b>	Aceleración	Aceleración	Aceleración	Aceleración
<b>Variable de entrada 2</b>	Aceleración retrasada	Aceleración retrasada	Aceleración retrasada	Aceleración retrasada
<b>Variables a minimizar</b>	Aceleración absoluta máxima 4to Piso	Aceleración absoluta máxima 4to Piso	Aceleración absoluta máxima 4to Piso	Aceleración absoluta máxima 4to Piso
	--	--	Desplazamiento relativo máximo 4to Piso	Desplazamiento relativo máximo 4to Piso
<b>Tamaño de población Inicial</b>	10	10	50	50

El GALIC se dejó corriendo por 150 generaciones en cada caso, mostrando una absoluta convergencia.

EL NSGAI se dejó corriendo por 200 generaciones en cada caso, mostrando también una absoluta convergencia.

El tiempo computacional requerido para realizar dicha cantidad de generaciones fue aproximadamente de 5 días en ambos casos para un computador AMD Athlon Dual Core 4400+, 1 GB de memoria RAM.

## **Capítulo 5: Resultados**

Los algoritmos genéticos fueron usados en simulaciones numéricas para los casos de 5% y 12% de amortiguamiento del aislador. En total, 6 sistemas de control en lógica difusa (FLC) fueron diseñados, tres para el caso de 5% y tres para el caso de 12%. En cada caso, un FLC fue obtenido con el algoritmo genético GALIC y los otros dos con el algoritmo genético NSGAI. Como el NSGAI es multiobjetivo, éste entregaba varios FLC, algunos con resultados óptimos desde el punto de vista de las aceleraciones y otros con resultados óptimos desde el punto de vista de los desplazamientos. Se eligió el que entregaba la menor aceleración y el que entregaba el menor desplazamiento.

Los casos pasivos en los cuales el voltaje en el disipador magnetoreológico es constante y máximo (caso passive on), constante y mínimo (caso passive off), y otro caso en el cual no había disipadores magnetoreológicos, fueron también evaluados para comparar las soluciones obtenidas con los distintos algoritmos genéticos.

Adicionalmente, se evaluó un sistema de control alternativo Skyhook. Dicho sistema de control funciona de la siguiente manera:

Si  $v_a * v_r > 0$  , entonces  $V = V_0$

Si  $v_a * v_r < 0$ , entonces  $V = 0$

Es decir, si el producto de las velocidades absoluta y relativa (en este caso las velocidades se refieren al 4to Piso) es positivo, entonces se aplica un voltaje constante  $V_0$ . Ahora si el producto de las velocidades absoluta y relativa es negativo, entonces no se aplica voltaje. El valor del voltaje  $V_0$  necesita ser

calibrado mediante prueba y error para los sismos de diseño de manera de obtener un mejor funcionamiento del sistema de control. En este estudio, para el caso del 5%  $V_0 = 0.6$  V, y para el caso del 12%  $V_0 = 0.5$  V.

Los resultados de las simulaciones se muestran en las tablas 5.1 y 5.2 para los siguientes casos:

Caso 1: Caso sin disipadores magnetoreológicos

Caso 2: Caso Passive Off (Voltaje constante = 0 V)

Caso 3: Caso Passive On (Voltaje constante = 1.2 V)

Caso 4: Caso con sistema de control alternativo Skyhook

Caso 5: Caso con sistema de control obtenido con algoritmo genético GALIC (FLC 1 y 4)

Caso 6a: Caso con sistema de control obtenido con NSGAI, eligiendo el FLC que da menor aceleración (FLC 2 y 5)

Caso 6b: Caso con sistema de control obtenido con NSGAI, eligiendo el FLC que da menor desplazamiento (FLC 3 y 6)

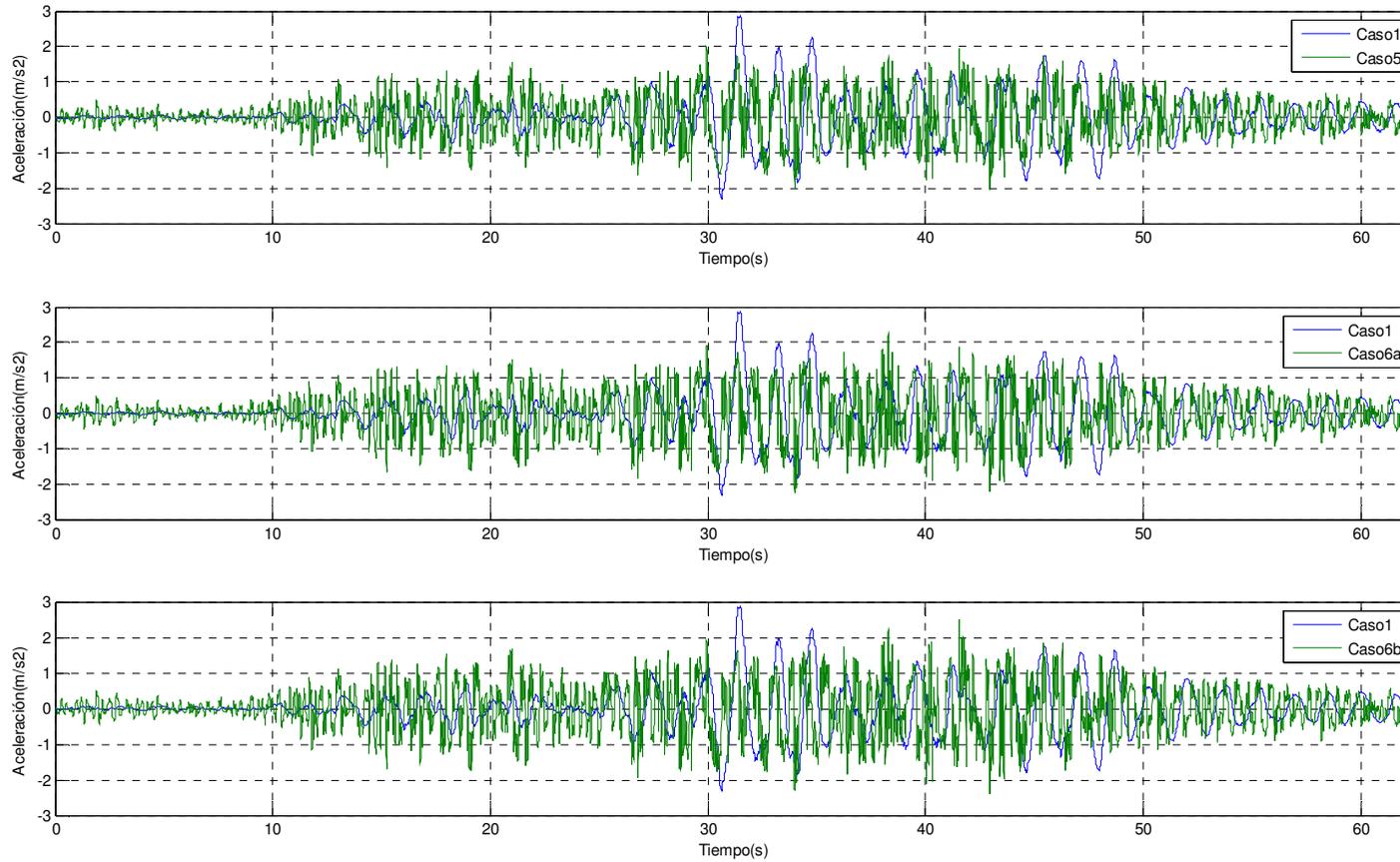
**Tabla 5.1: Resultados caso 5% de amortiguamiento del aislador**

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5 (FLC1)	Caso 6a (FLC2)	Caso 6b (FLC3)
	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)
LLOLLEO	2.884 0.199	2.664 0.174	2.577 0.054	2.482 0.075	2.040 0.073	2.257 0.059	2.507 0.056
LLAY LLAY	3.332 0.231	2.713 0.177	1.930 0.084	1.935 0.099	2.103 0.106	1.907 0.087	1.944 0.085
VIÑA	2.000 0.137	1.743 0.105	1.734 0.057	1.657 0.067	1.581 0.070	1.677 0.058	1.793 0.058
VENTANA	1.538 0.106	1.345 0.077	1.544 0.040	1.551 0.044	1.337 0.048	1.408 0.043	1.558 0.041
<b>TOTAL</b>	<b>9.754</b> <b>0.671</b>	<b>8.464</b> <b>0.534</b>	<b>7.784</b> <b>0.236</b>	<b>7.626</b> <b>0.284</b>	<b>7.061</b> <b>0.297</b>	<b>7.249</b> <b>0.246</b>	<b>7.802</b> <b>0.240</b>

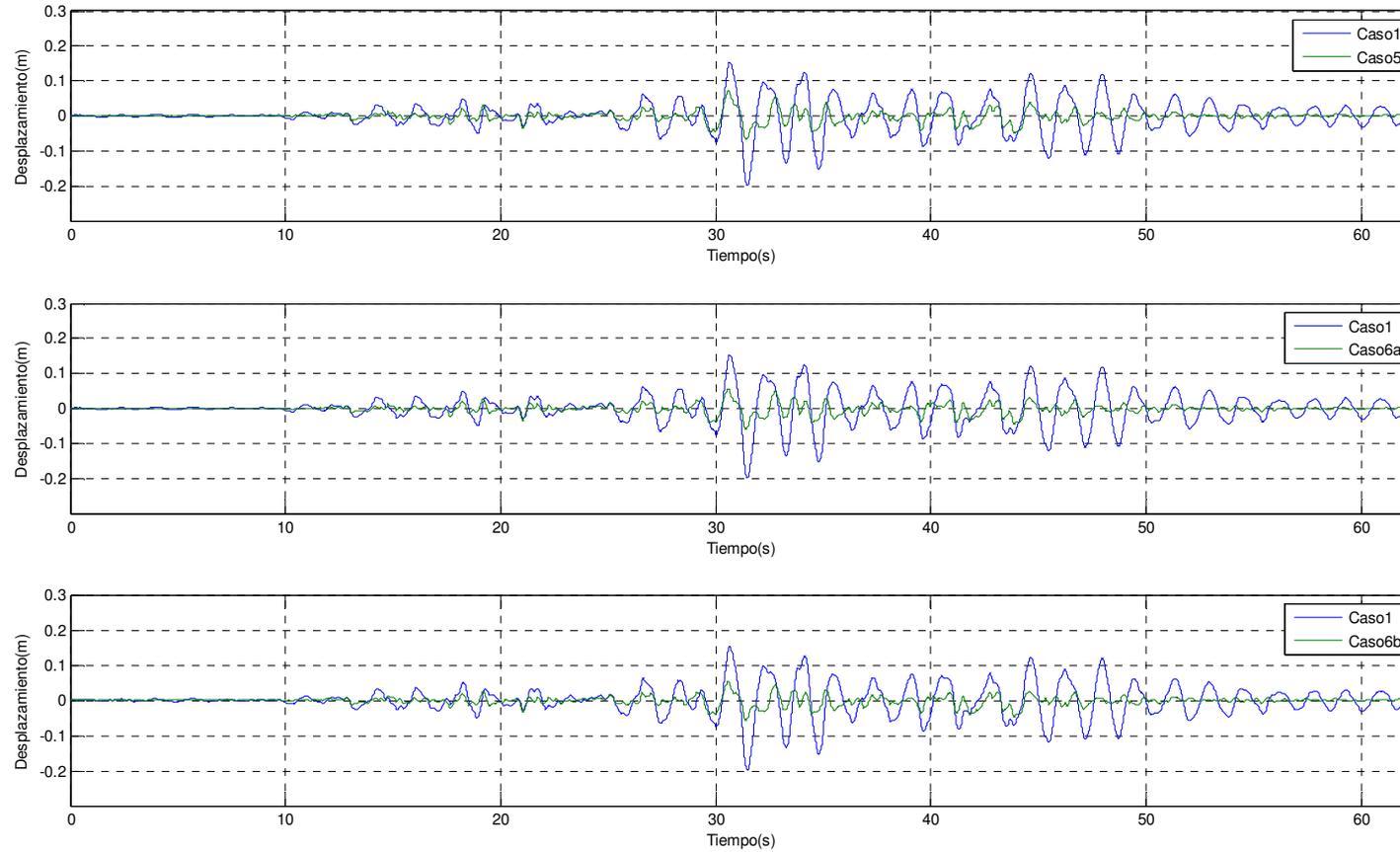
**Tabla 5.2: Resultados caso 12% de amortiguamiento del aislador**

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5 (FLC4)	Caso 6a (FLC5)	Caso 6b (FLC6)
	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)	Acel. Abs. Máx (m/s <sup>2</sup> ) Desp rel. Máx (m)
LLOLLEO	2.455 0.158	2.300 0.144	1.808 0.093	1.641 0.075	1.731 0.094	1.686 0.093	1.806 0.093
LLAY LLAY	2.436 0.160	2.431 0.155	2.162 0.119	1.895 0.095	2.020 0.121	2.144 0.119	2.148 0.118
VIÑA	1.618 0.105	1.564 0.098	1.490 0.073	1.426 0.065	1.443 0.074	1.474 0.073	1.480 0.073
VENTANA	1.234 0.079	1.201 0.072	1.272 0.055	1.311 0.045	1.258 0.055	1.270 0.055	1.271 0.055
<b>TOTAL</b>	<b>7.743</b> <b>0.502</b>	<b>7.496</b> <b>0.470</b>	<b>6.733</b> <b>0.339</b>	<b>6.272</b> <b>0.281</b>	<b>6.452</b> <b>0.343</b>	<b>6.575</b> <b>0.339</b>	<b>6.706</b> <b>0.339</b>

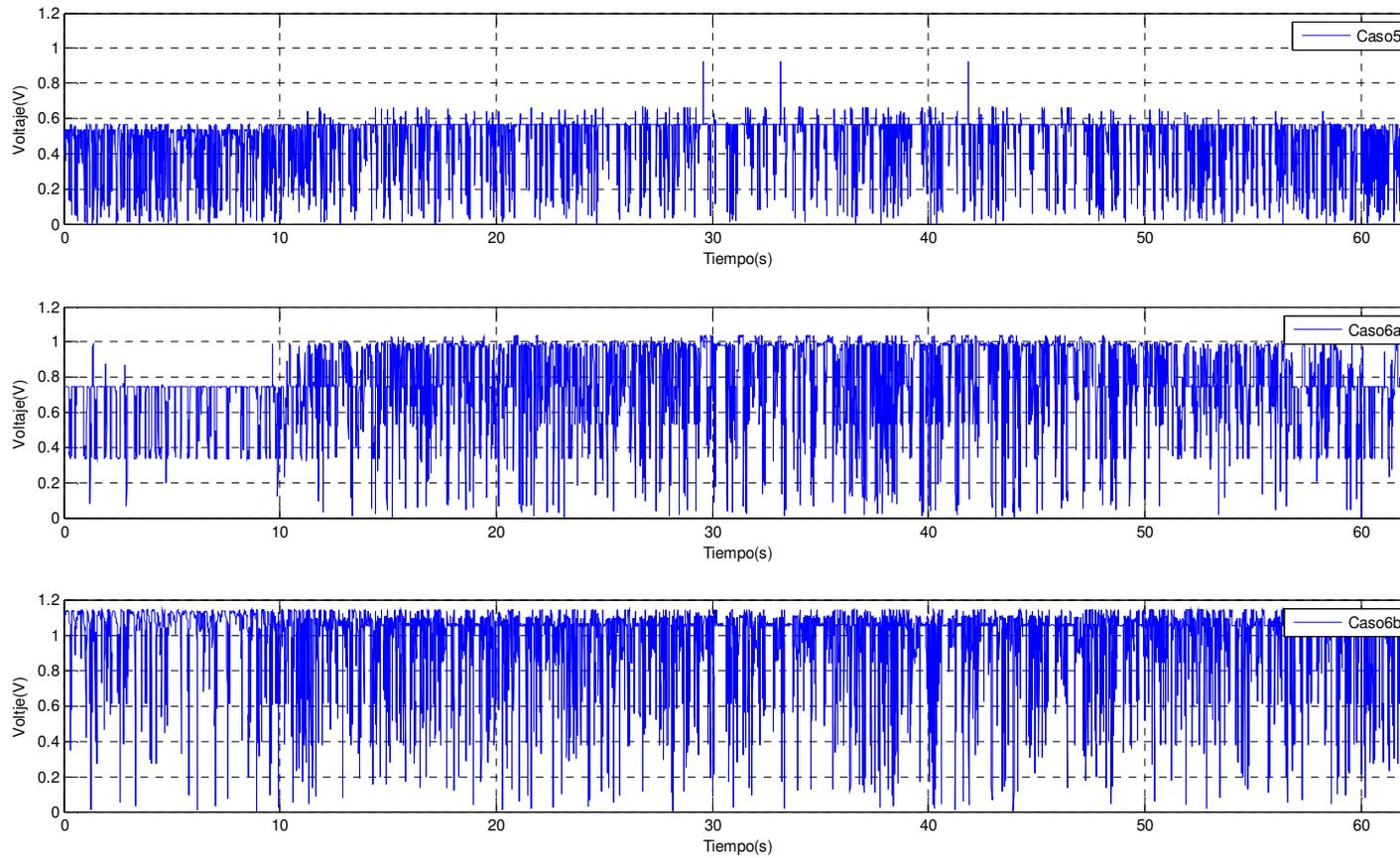
A continuación se muestran para cada sismo, gráficos comparativos de la respuesta del edificio con FLC (Casos 5, 6a y 6b) y sin disipadores magnetoreológicos (Caso 1), además del voltaje aplicado en función del tiempo para cada FLC (Figuras 5.1 a 5.24). La respuesta corresponde al grado de libertad superior del edificio (4to piso).



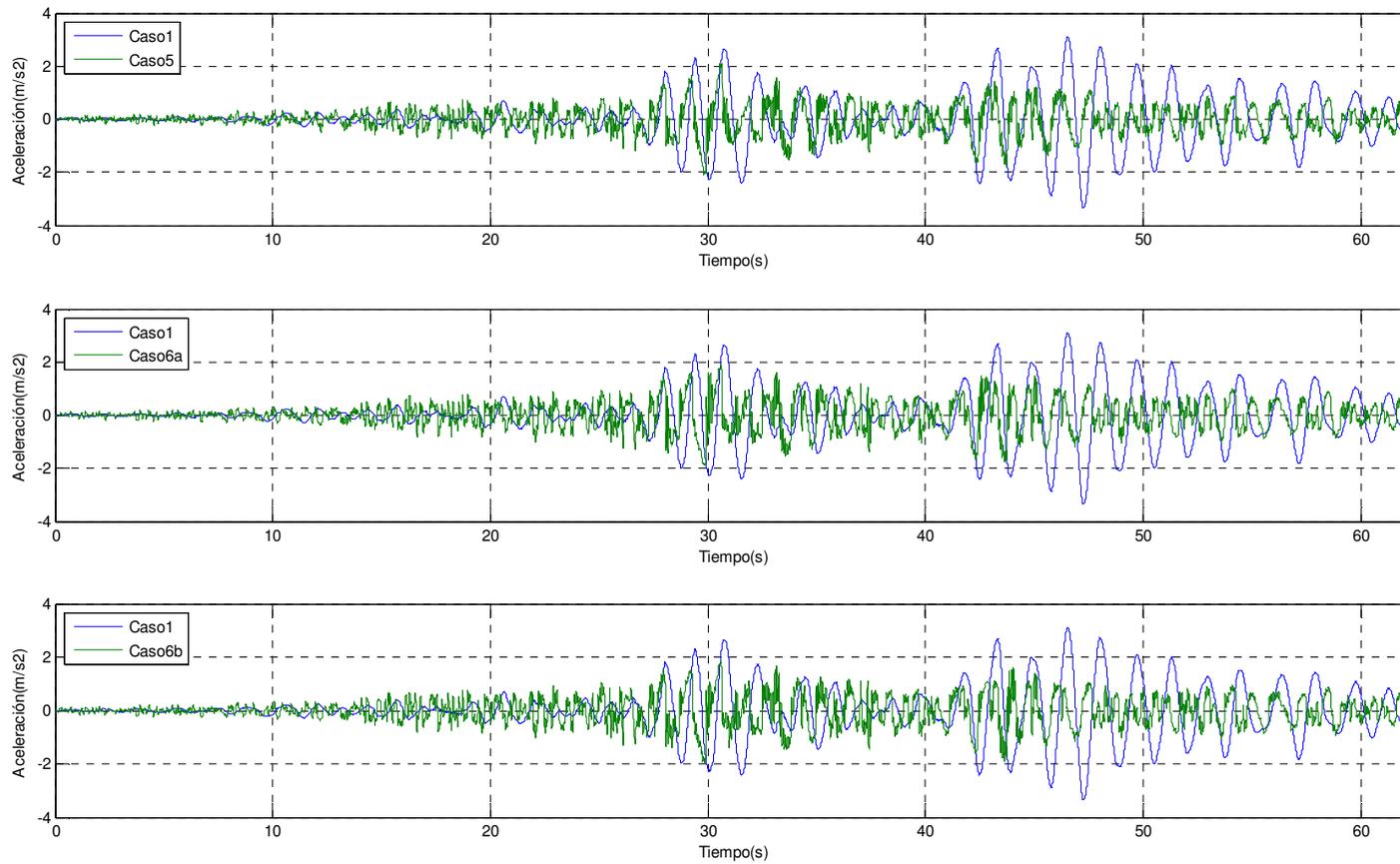
**Figura 5.1:** Llolleo N10E, amortiguamiento 5%, aceleraciones



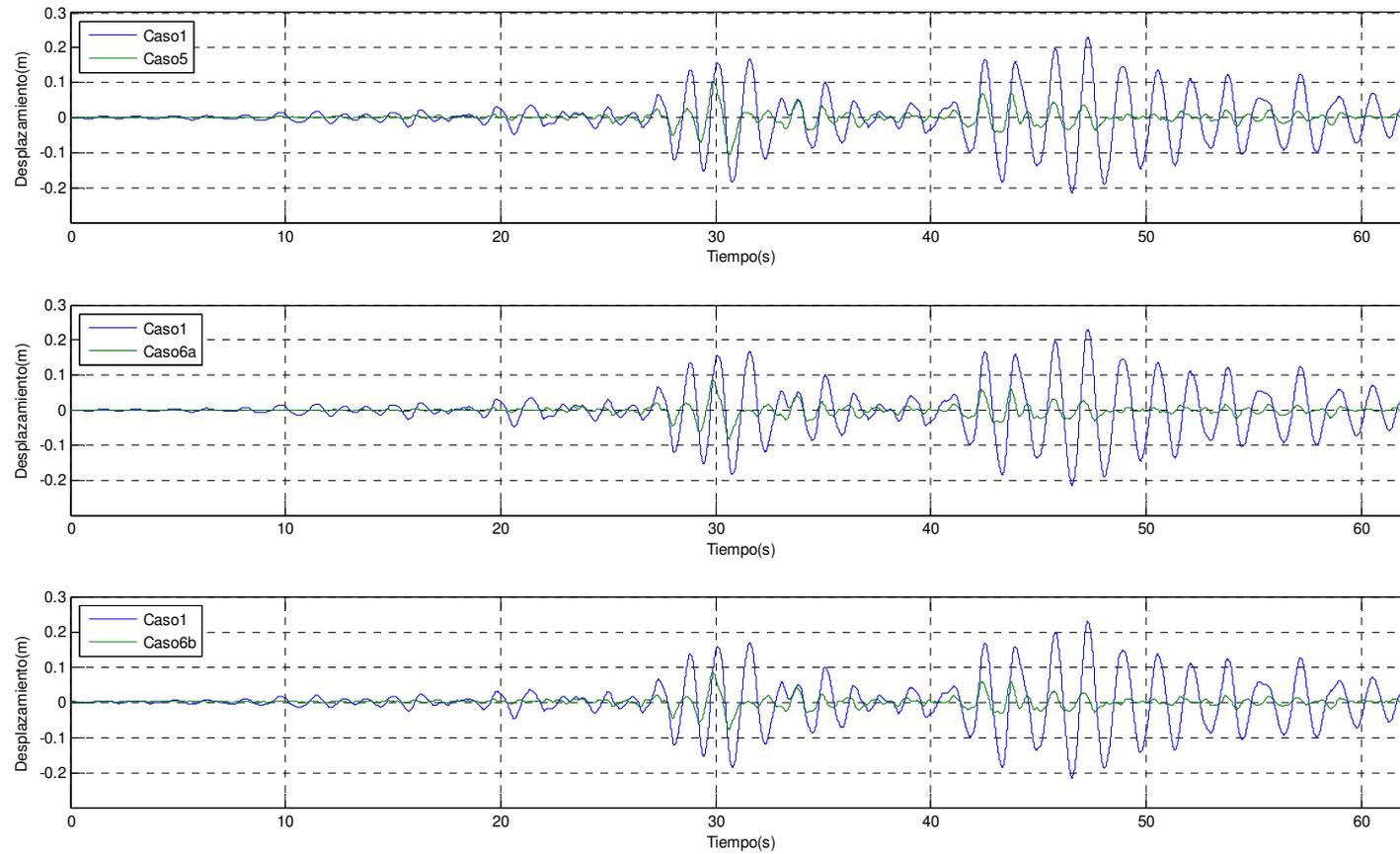
**Figura 5.2:** Llolleo N10E, amortiguamiento 5%, desplazamientos



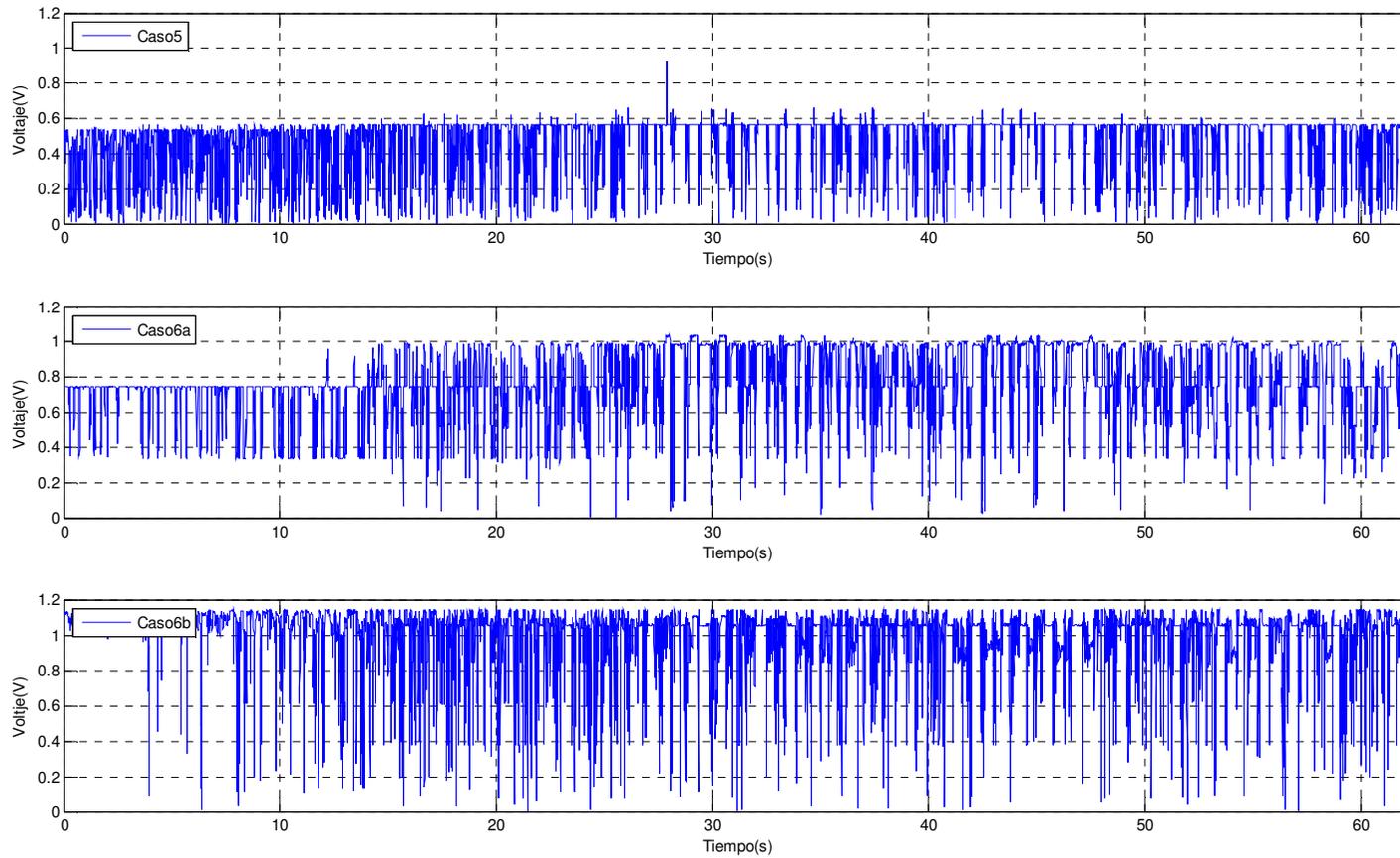
**Figura 5.3:** Llolleo N10E, amortiguamiento 5%, voltaje



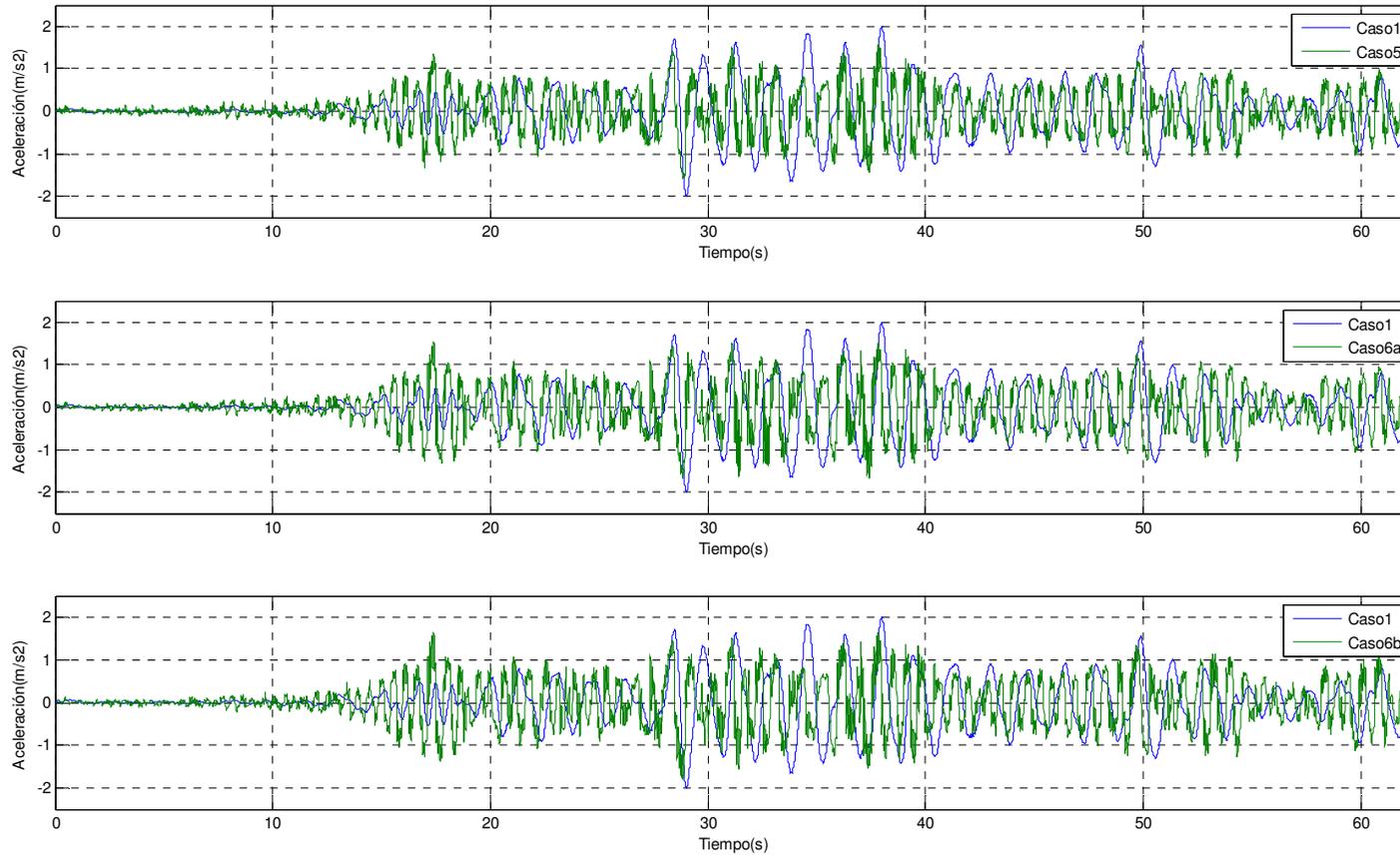
**Figura 5.4:** Llay Llay S10W, amortiguamiento 5%, aceleraciones



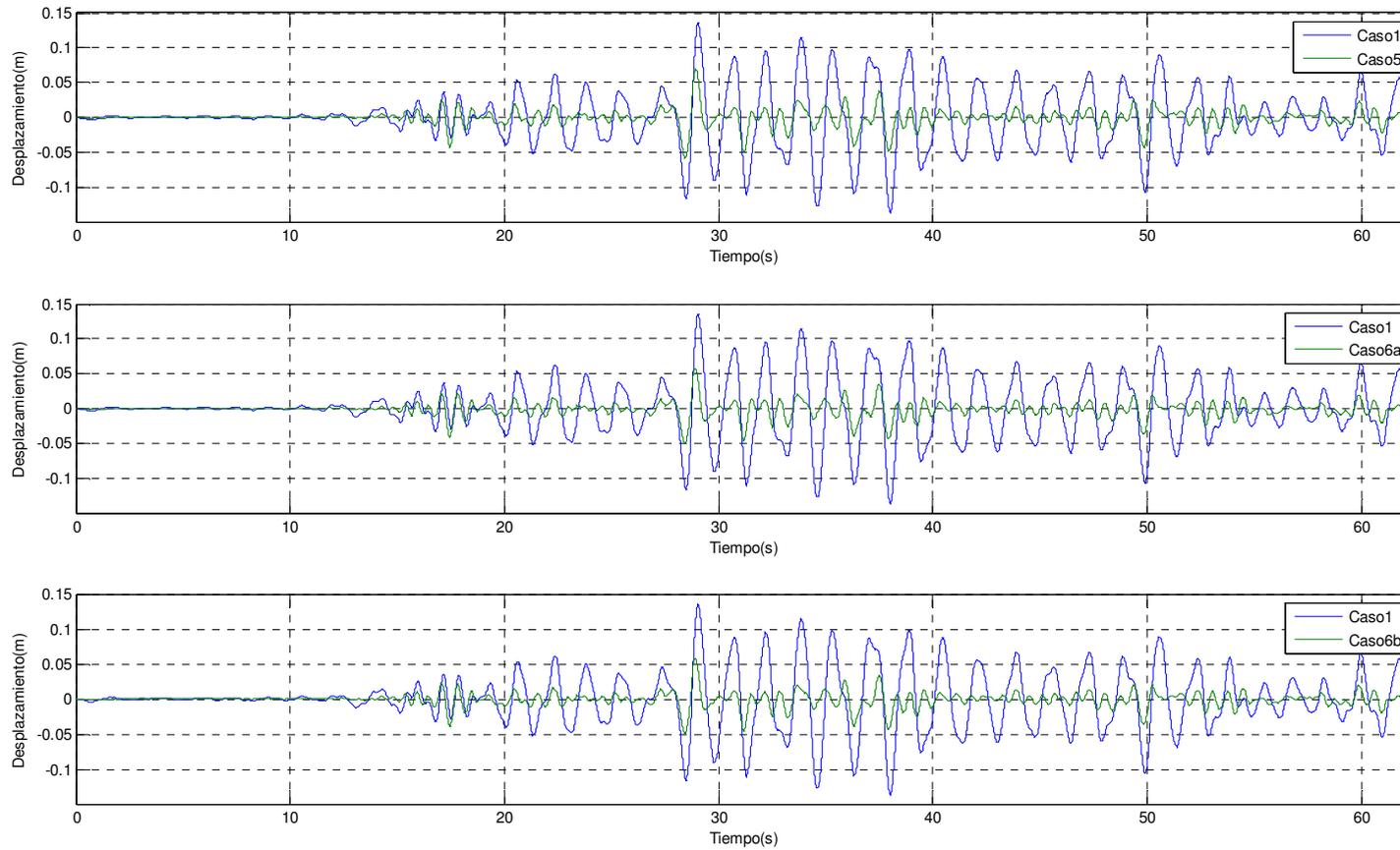
**Figura 5.5:** Llay Llay S10W, amortiguamiento 5%, desplazamientos



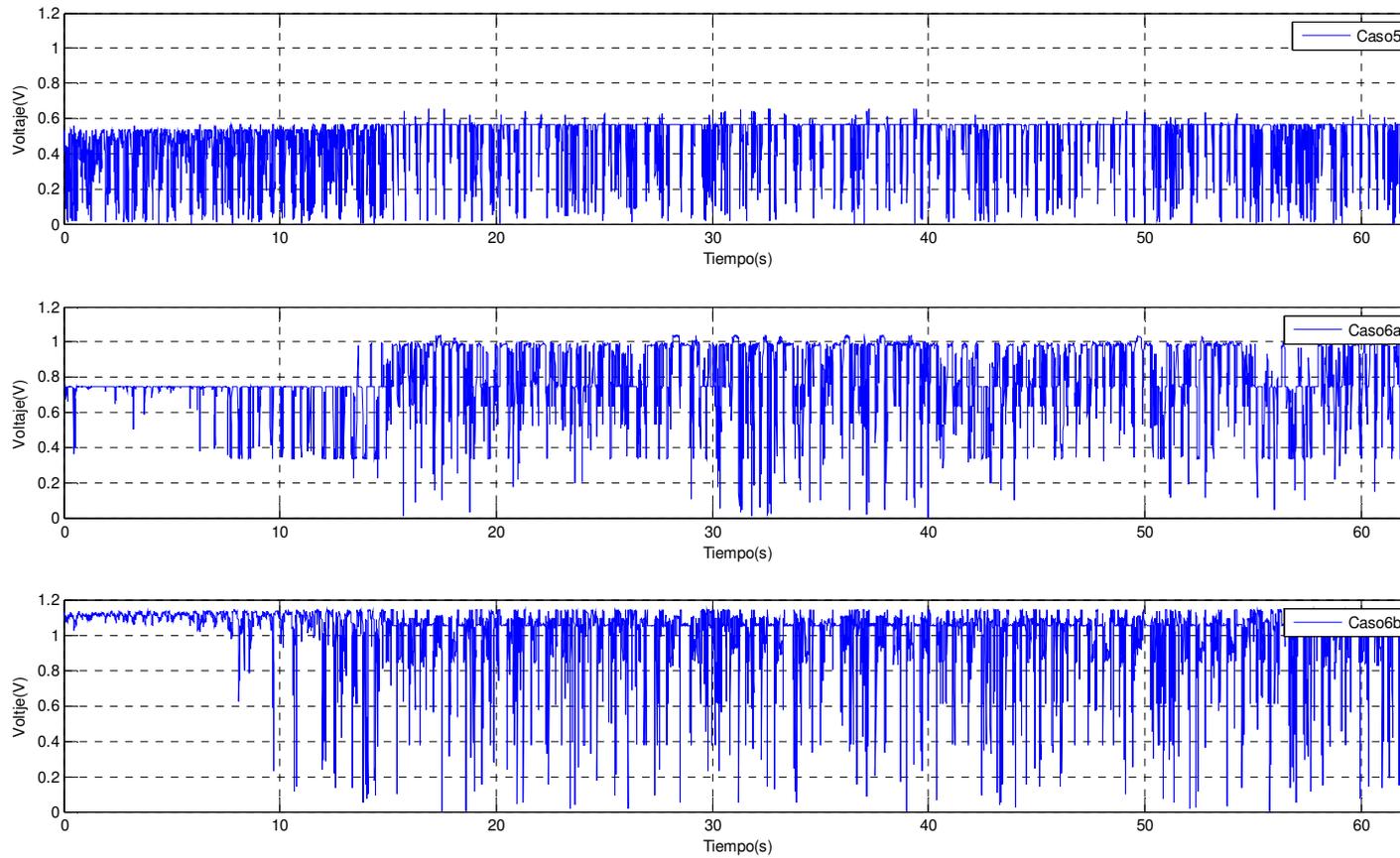
**Figura 5.6:** Llay Llay S10W, amortiguamiento 5%, voltaje



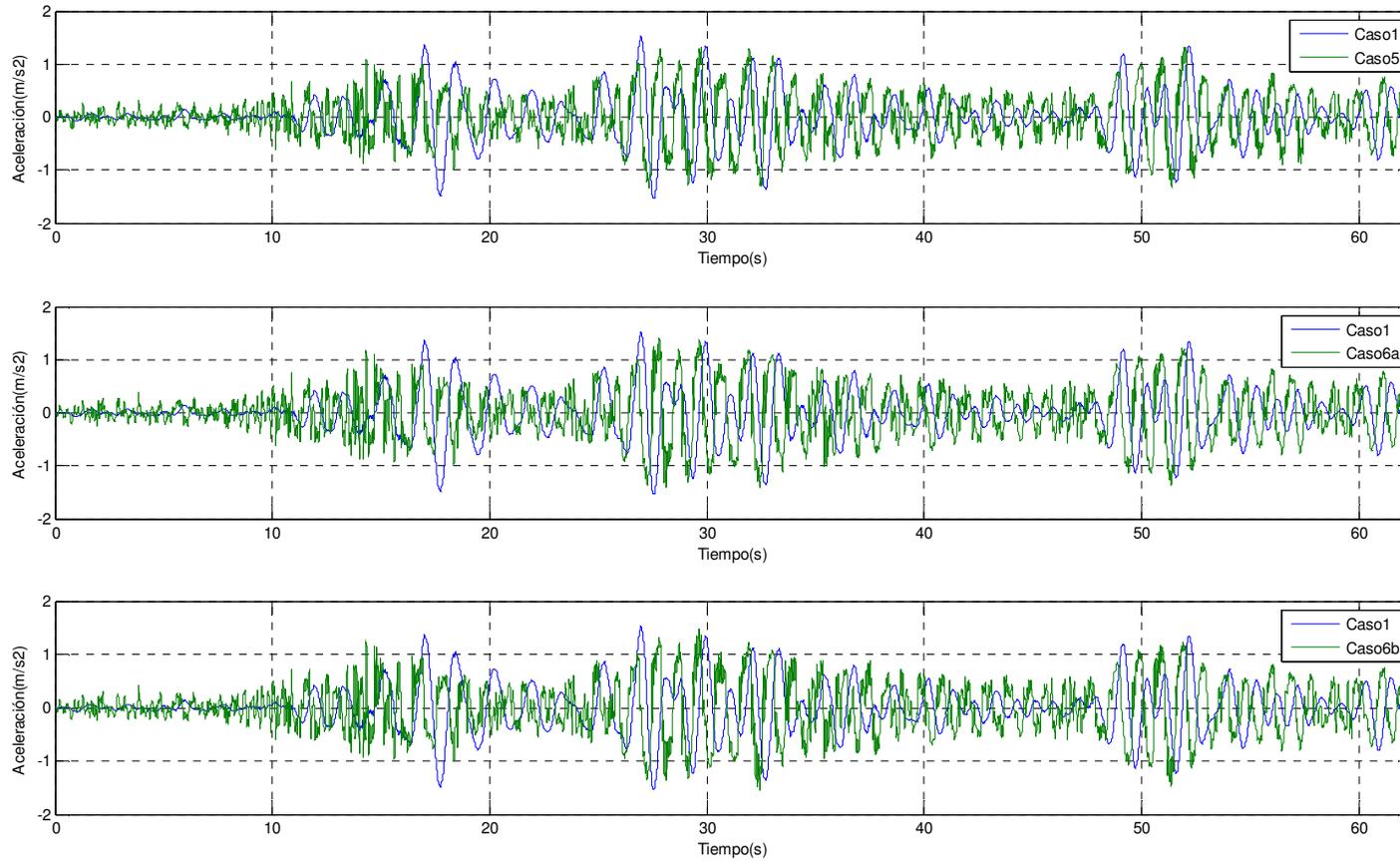
**Figura 5.7:** Viña del Mar S20W, amortiguamiento 5%, aceleraciones



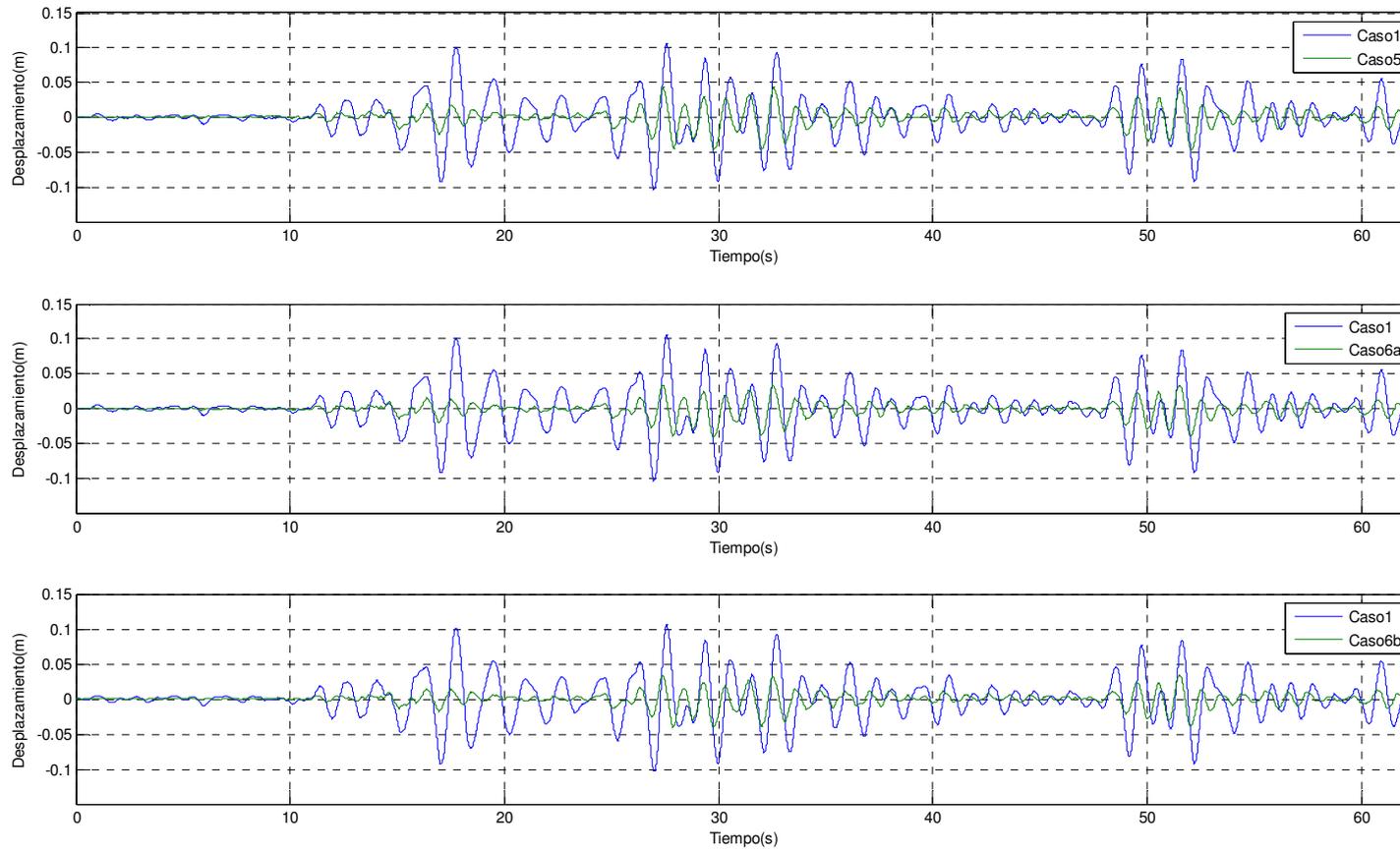
**Figura 5.8:** Viña del Mar S20W, amortiguamiento 5%, desplazamiento



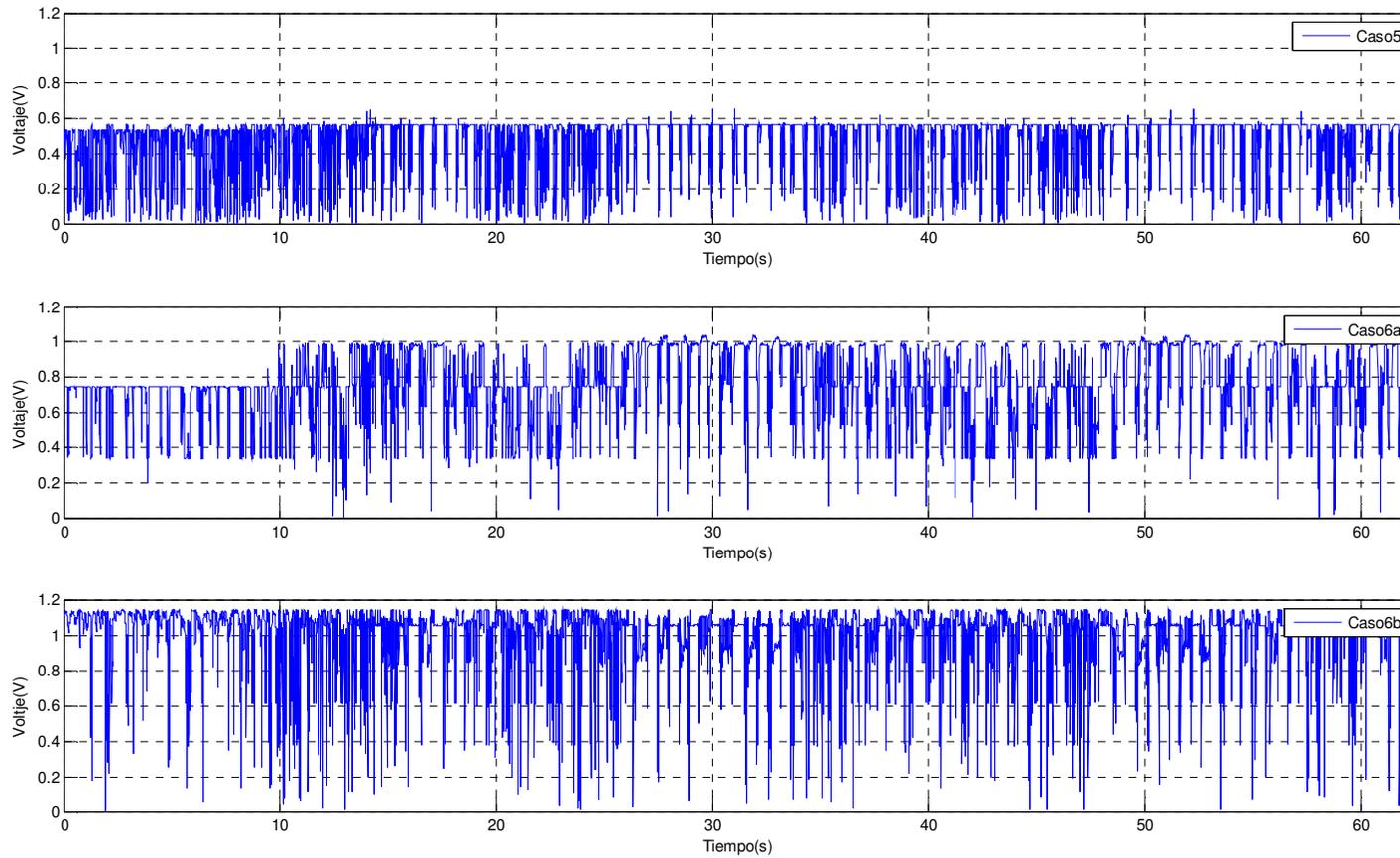
**Figura 5.9:** Viña del Mar S20W, amortiguamiento 5%, voltaje



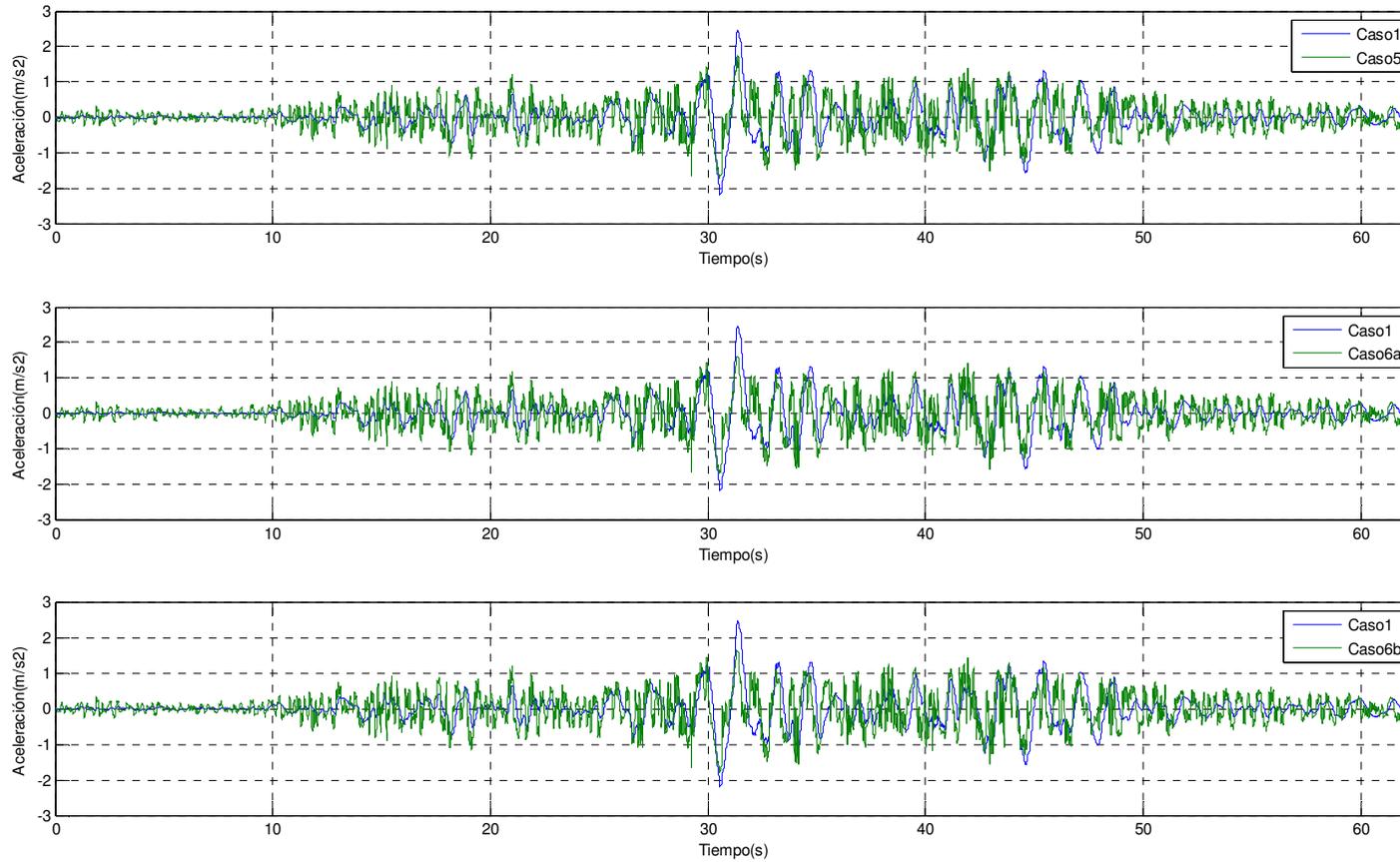
**Figura 5.10:** Ventana WE, amortiguamiento 5%, aceleraciones



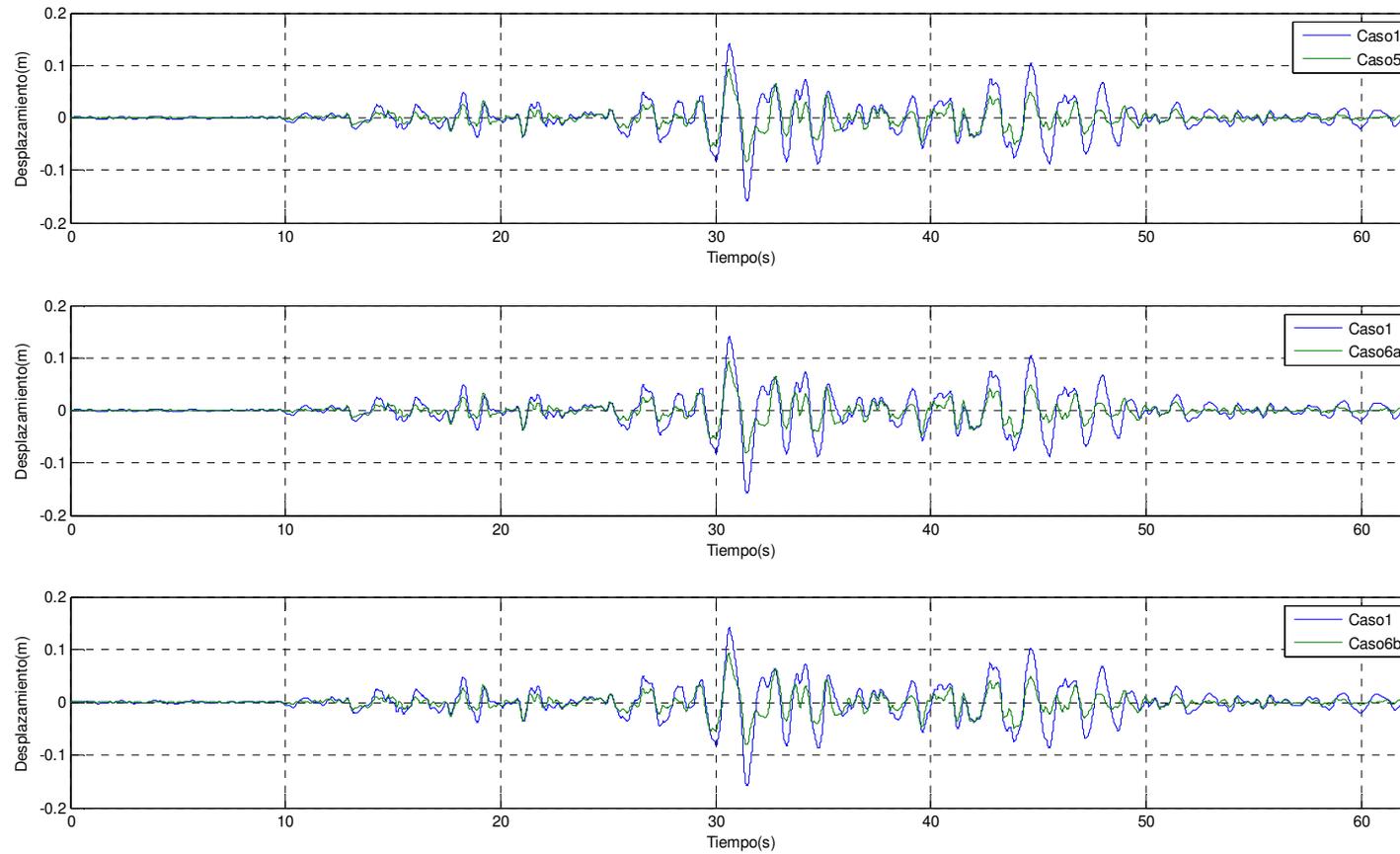
**Figura 5.11:** Ventana WE, amortiguamiento 5%, desplazamientos



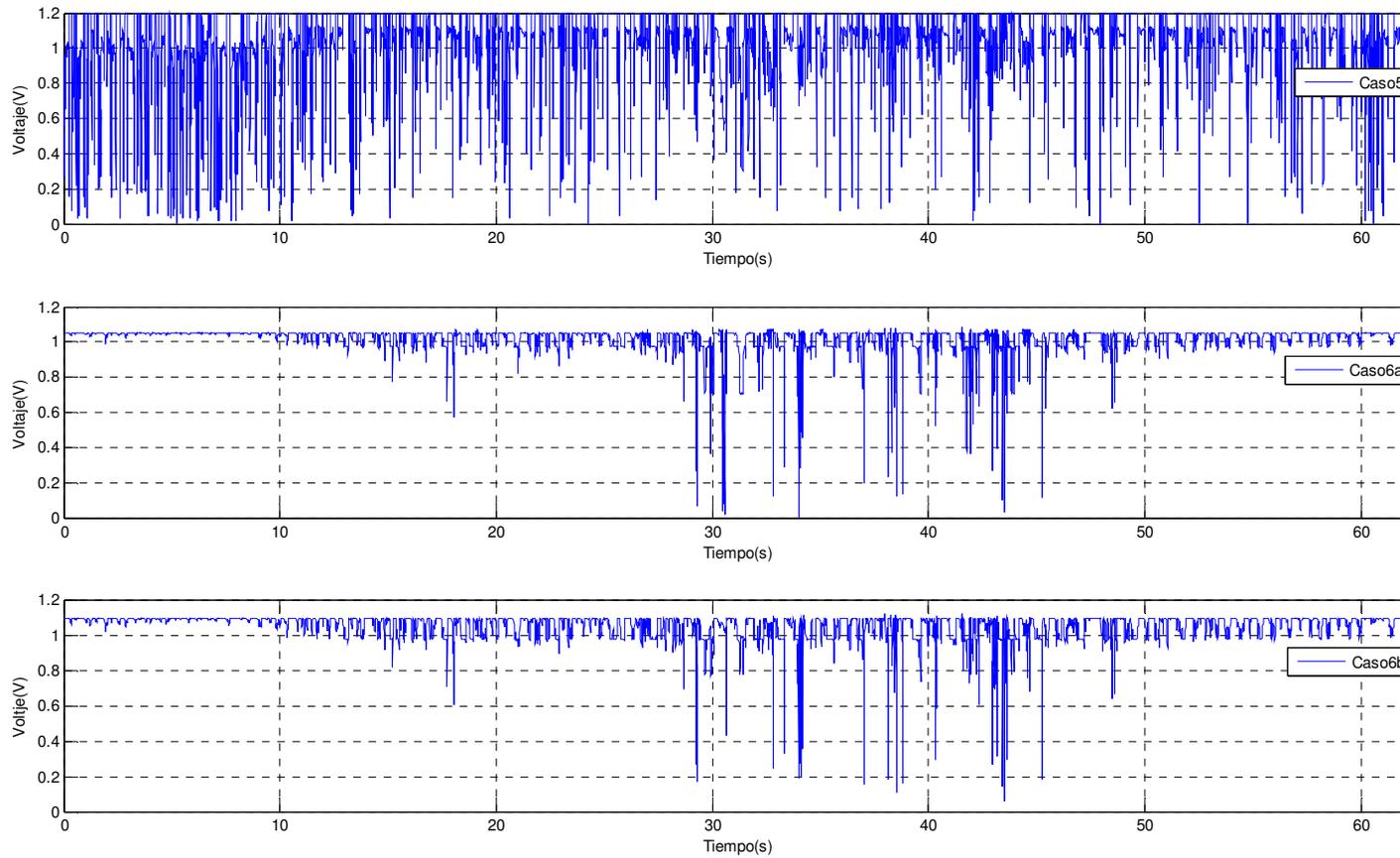
**Figura 5.12:** Ventana WE, amortiguamiento 5%, voltaje



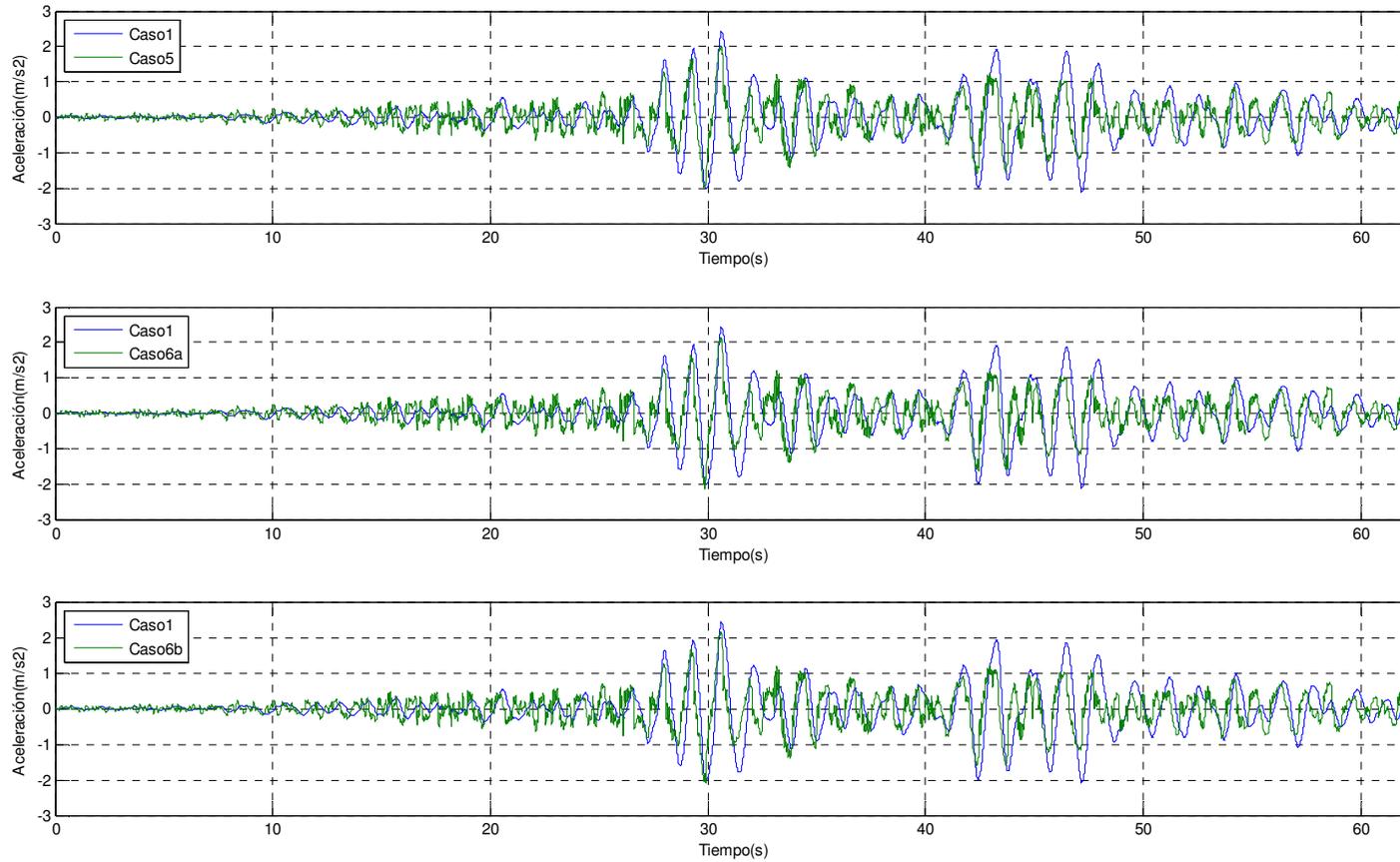
**Figura 5.13:** Llolleo N10E, amortiguamiento 12%, aceleraciones



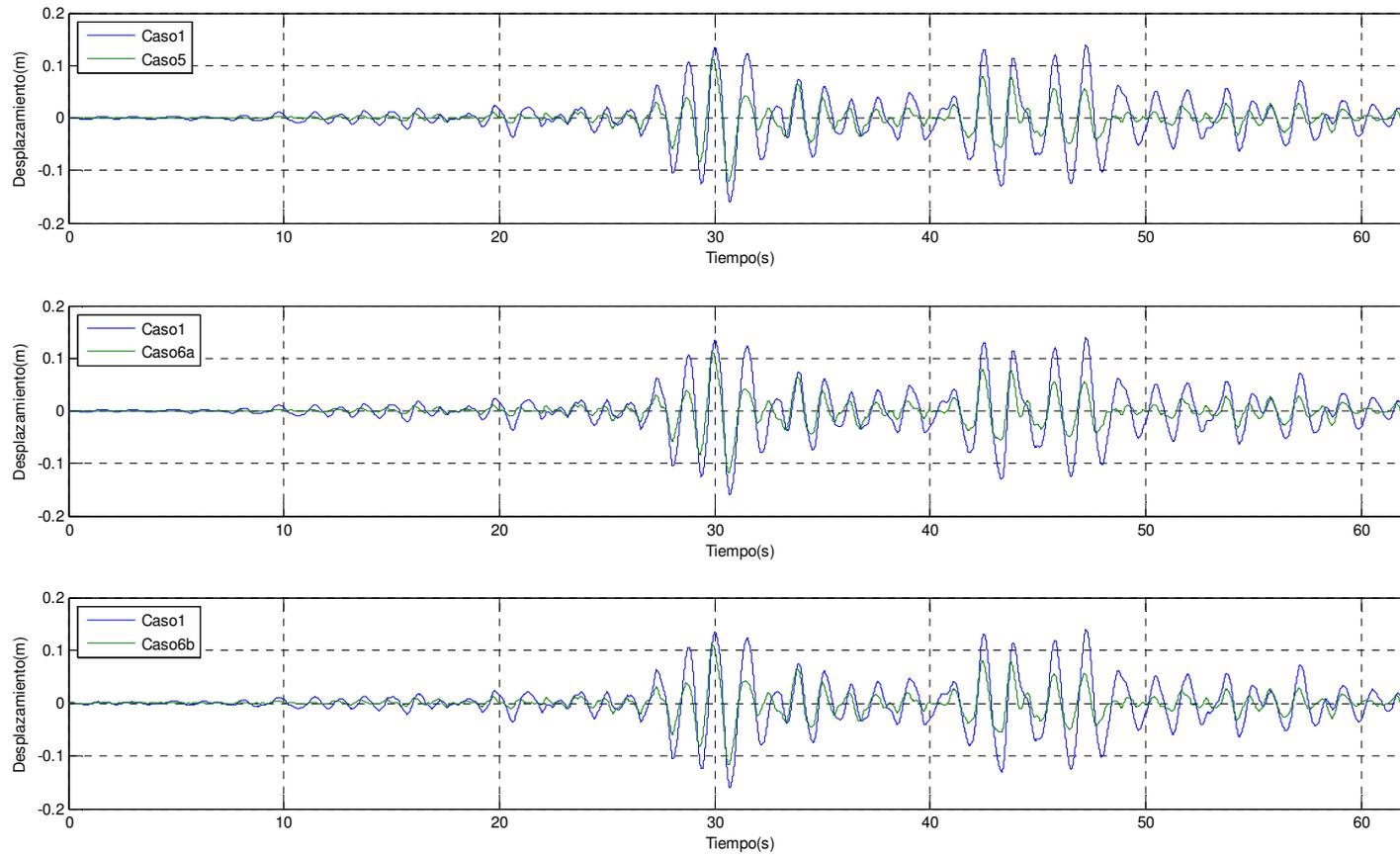
**Figura 5.14:** Llolleo N10E, amortiguamiento 12%, desplazamientos



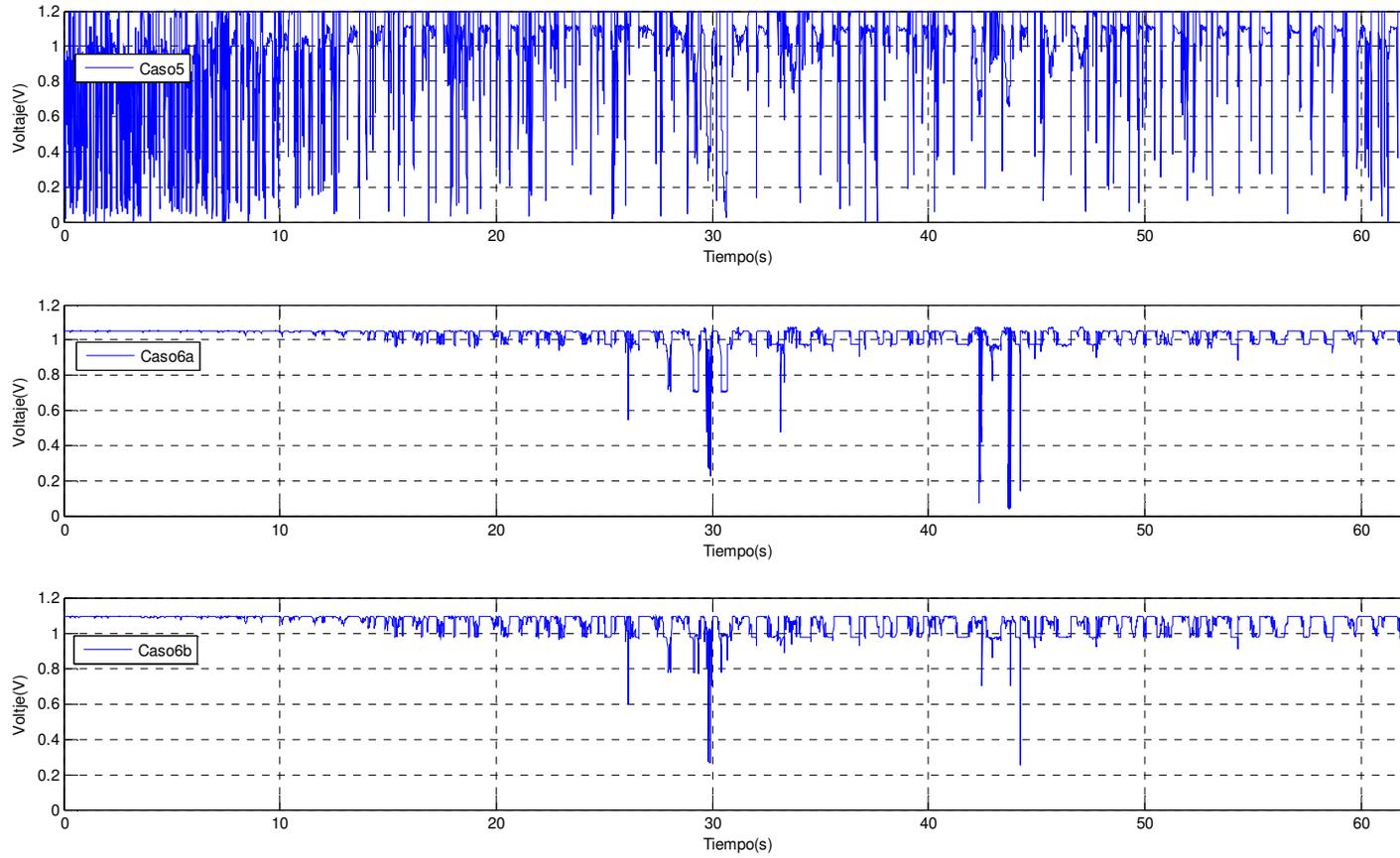
**Figura 5.15:** Llolleo N10E, amortiguamiento 12%, voltaje



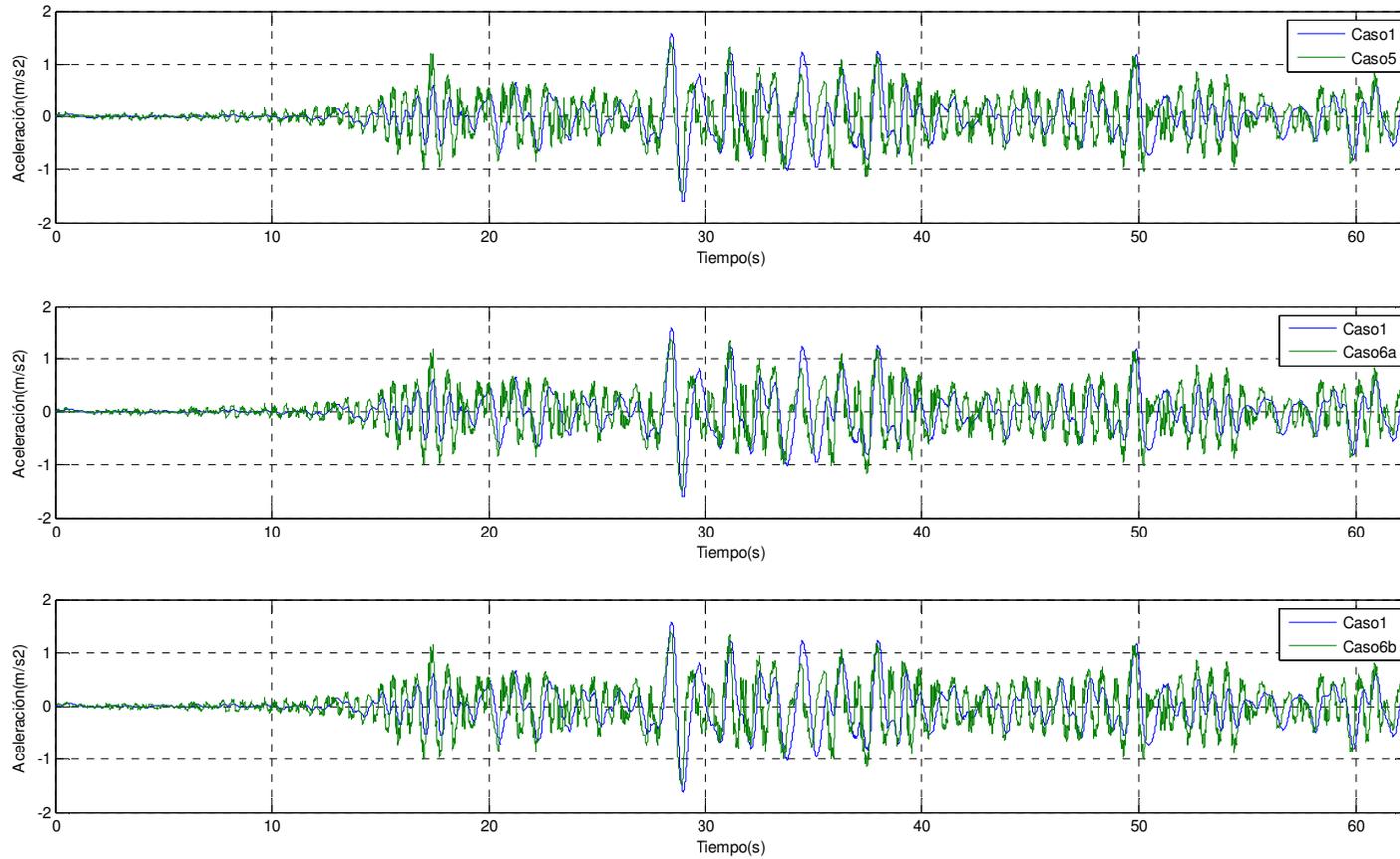
**Figura 5.16:** Llay Llay S10W, amortiguamiento 12%, aceleraciones



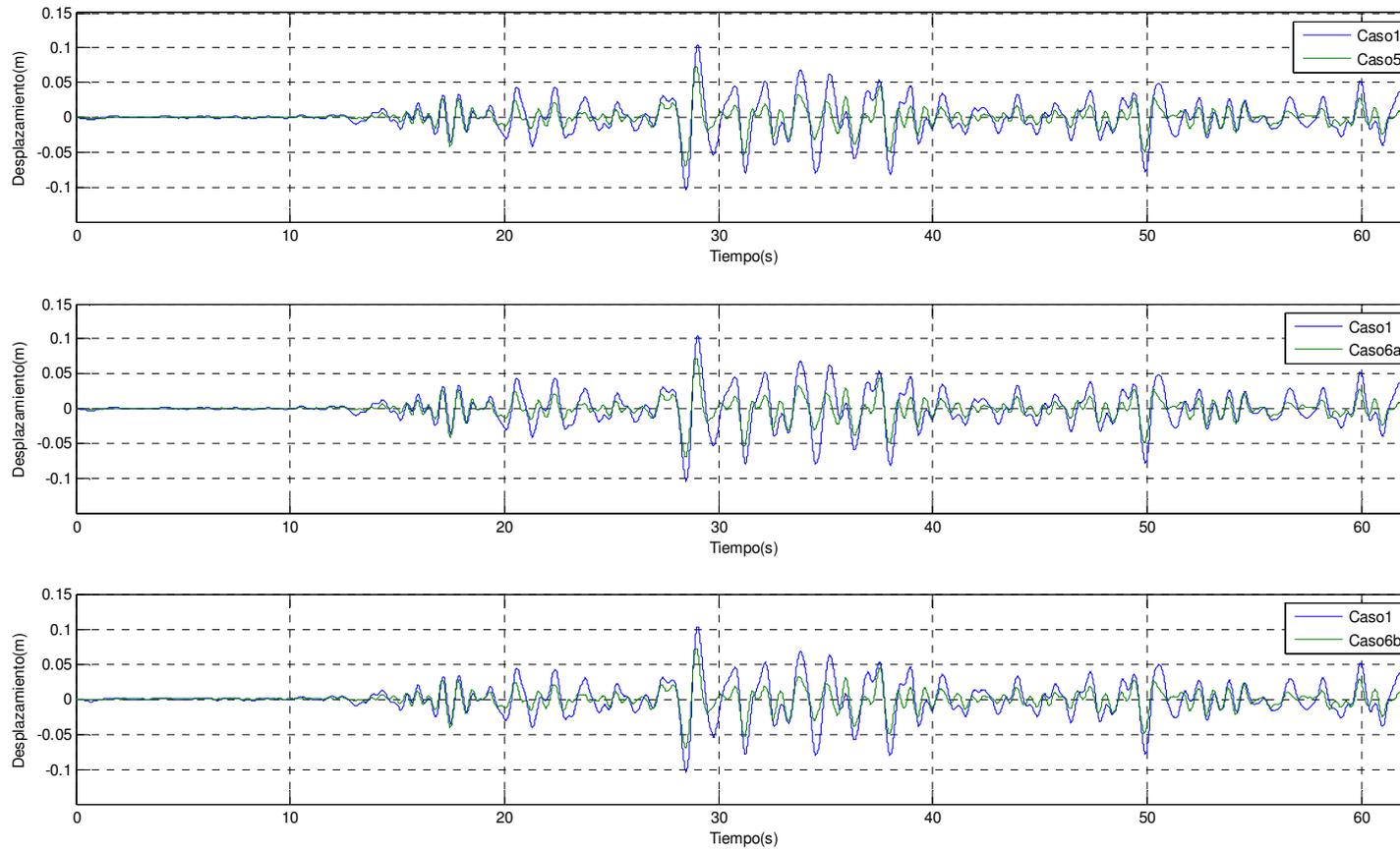
**Figura 5.17:** Llay Llay S10W, amortiguamiento 12%, desplazamientos



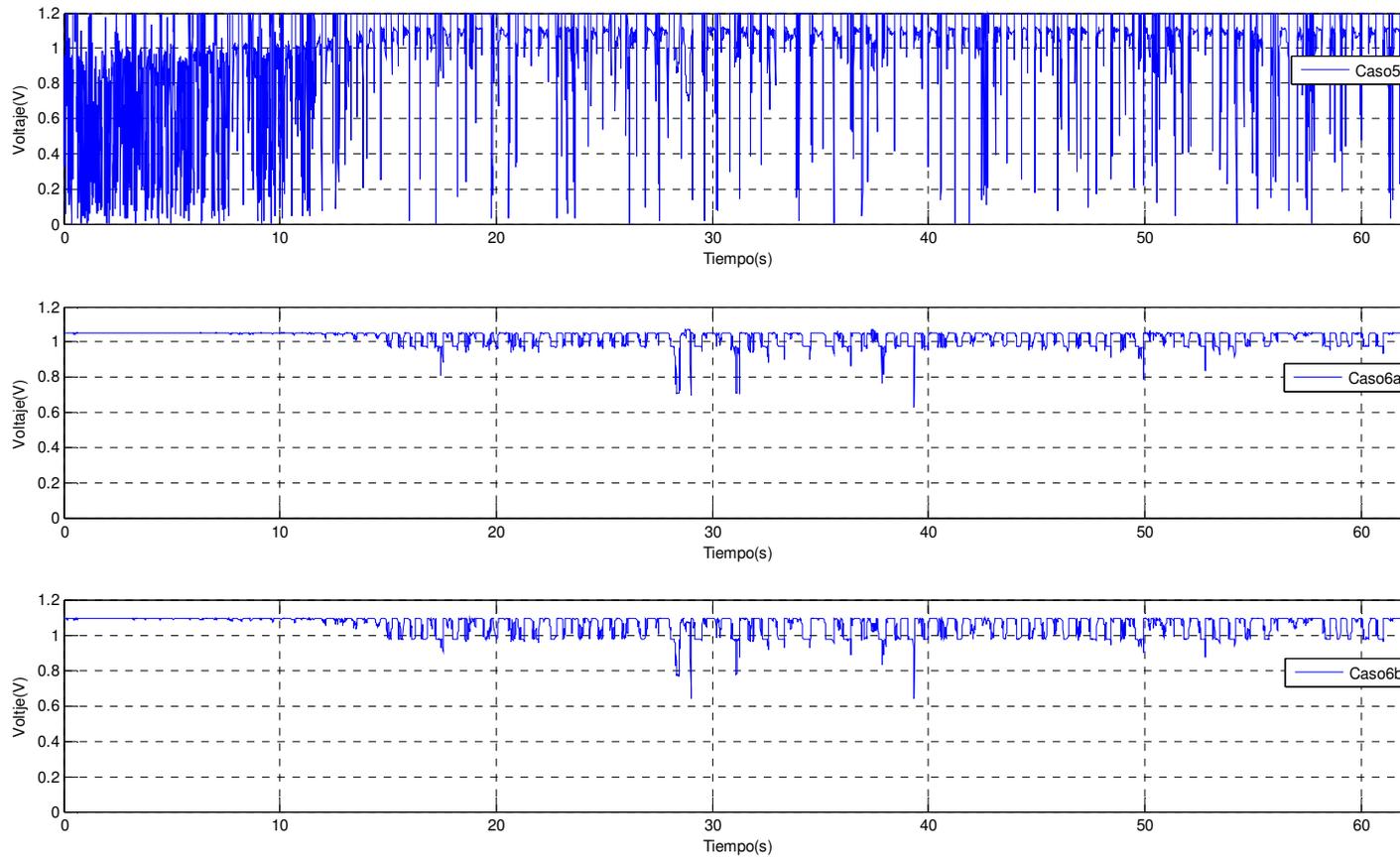
**Figura 5.18:** Llay Llay S10W, amortiguamiento 12%, voltaje



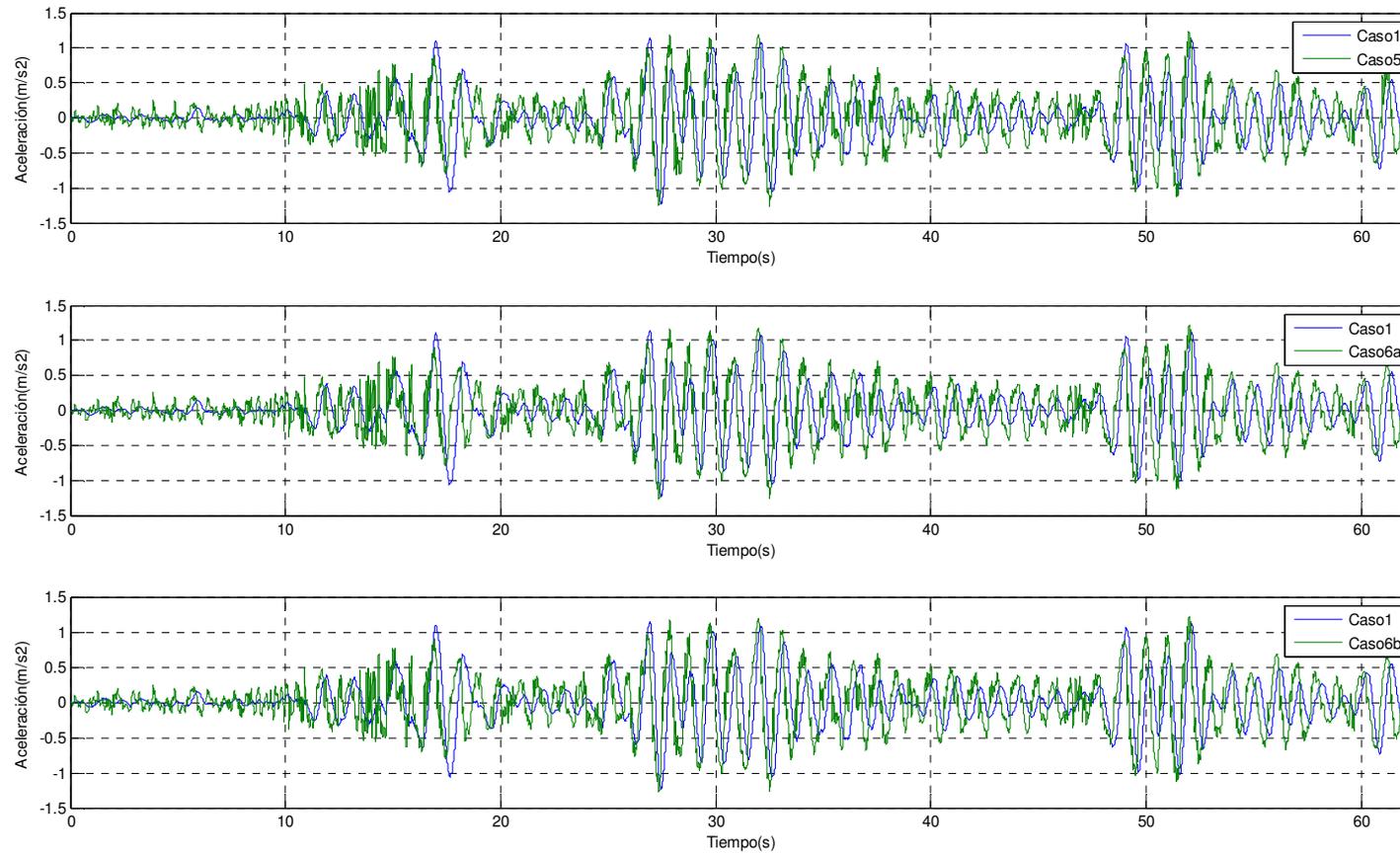
**Figura 5.19:** Viña del Mar S20W, amortiguamiento 12%, aceleraciones



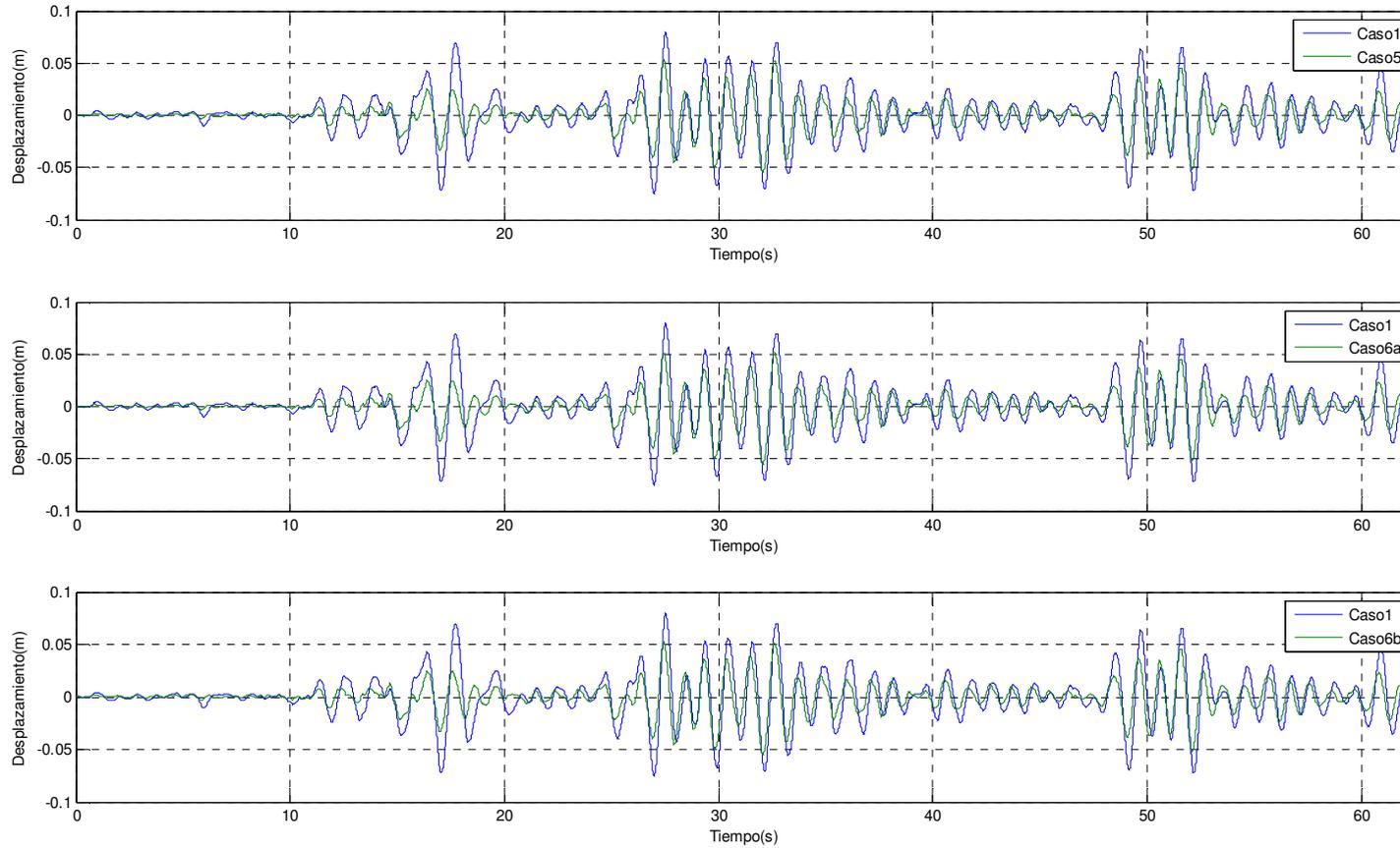
**Figura 5.20:** Viña del Mar S20W, amortiguamiento 12%, desplazamientos



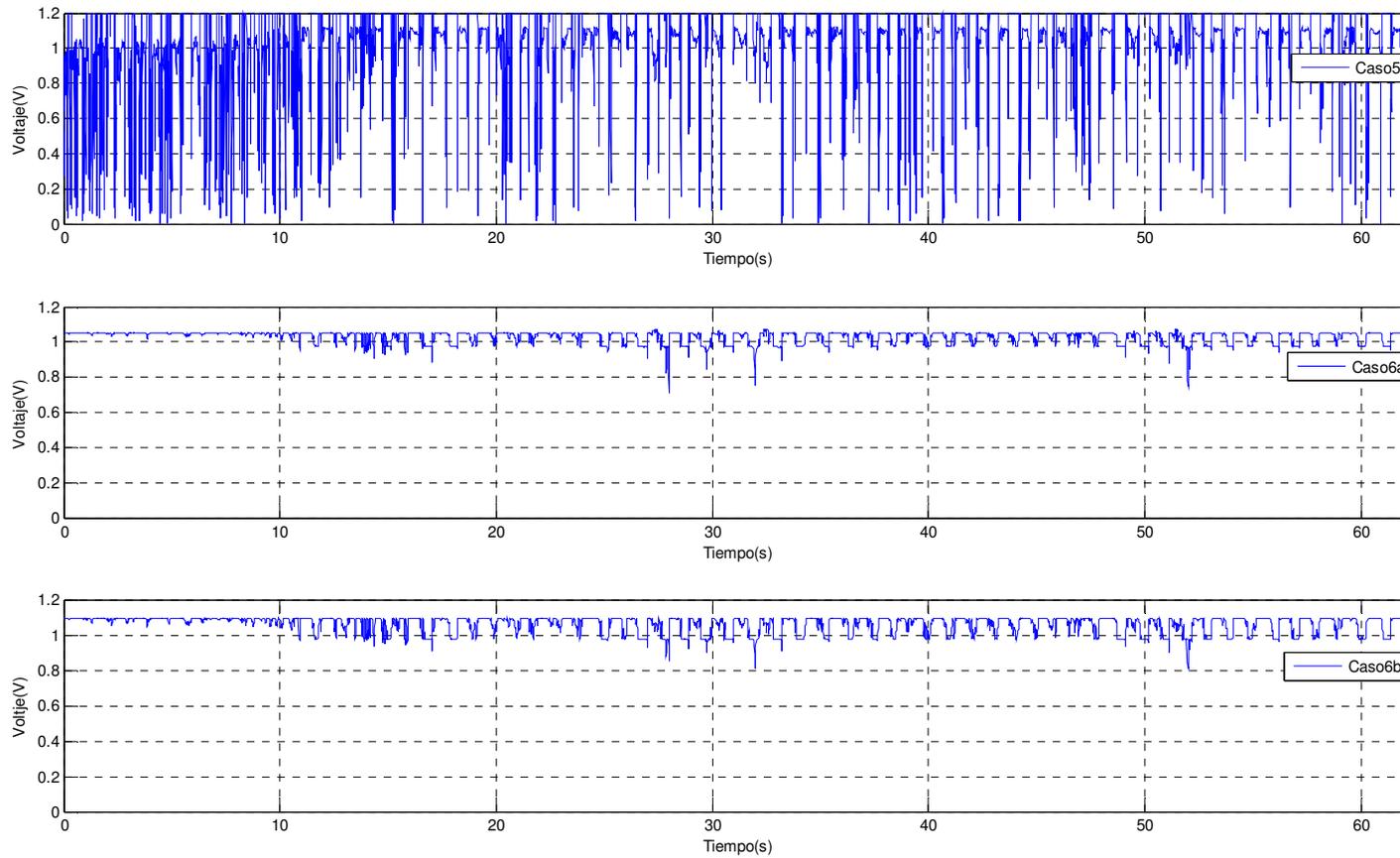
**Figura 5.21:** Viña del Mar S20W, amortiguamiento 12%, voltaje



**Figura 5.22:** Ventana WE, amortiguamiento 12%, aceleraciones



**Figura 5.23:** Ventana WE, amortiguamiento 12%, desplazamientos



**Figura 5.24:** Ventana WE, amortiguamiento 12%, voltaje

## **Capítulo 6: Conclusiones**

Se ha desarrollado un estudio numérico de la eficacia de un sistema de control estructural híbrido en una estructura con aisladores de goma y disipadores magnetoreológicos. El edificio Andalucía fue construido en 1992 para familias con bajos ingresos. Se trata de un edificio de 4 pisos, consistentes en pisos de hormigón armado en el primer nivel y albañilería confinada en los pisos restantes, además de losas de hormigón armado en cada nivel.

La operación de los disipadores magnetoreológicos ha sido optimizada mediante el uso de sistemas de control en lógica difusa obtenidos mediante algoritmos genéticos. Las funciones objetivo a minimizar fueron la aceleración absoluta máxima y el desplazamiento relativo máximo del 4to piso. En el proceso de optimización se consideraron cuatro registros sísmicos del terremoto chileno de 1985 (Llolleo N10E, Llay Llay S10W, Viña del Mar S20W y Ventana WE). Se diseñaron sistemas de control óptimos para los casos de aisladores con amortiguamiento del 12% (caso real del edificio Andalucía) y 5% (caso ficticio).

En ambos casos fue posible obtener sistemas de control en lógica difusa que minimizan la suma de las aceleraciones absolutas máximas y la suma de los desplazamientos relativos máximos para los cuatro sismos antes mencionados. Se puede afirmar, por lo tanto, que se han obtenido sistemas de control robustos, pues su funcionamiento es adecuado para varios sismos de diferentes características.

La evaluación relativa de un sistema de control por sobre otro en problemas de optimización multiobjetivo depende de la importancia relativa que un objetivo tenga sobre el otro. Así, para un proyecto en particular, el desplazamiento relativo máximo puede ser la variable crítica (por ejemplo ante la posibilidad de choque con

una estructura vecina), por lo que el sistema de control óptimo para ese caso sería el que obtenga menor desplazamiento relativo, independiente de la reducción o incluso aumento que eso podría traer en las aceleraciones absolutas.

Por otro lado, ciertos equipos industriales son muy susceptibles a aceleraciones grandes, por lo que en ese caso el sistema de control óptimo podría ser el que entregue menores aceleraciones absolutas.

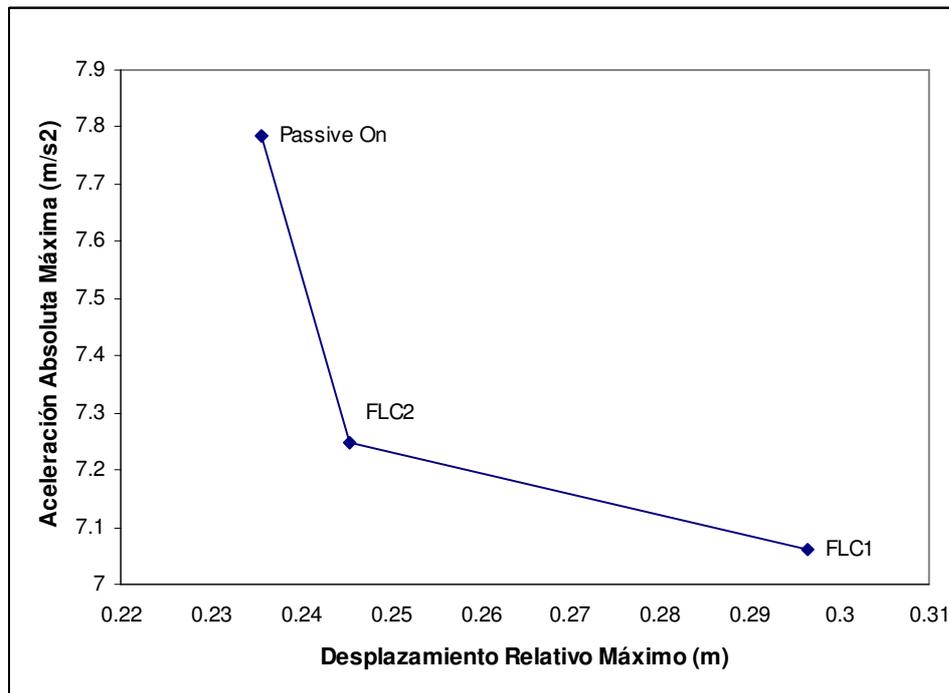
En este estudio se analizan los distintos sistemas de control obtenidos mediante el concepto de Pareto-Dominancia (sección 4.3.3).

En general, las aceleraciones obtenidas con cada sistema de control son comparadas con las del caso 1 (sin disipadores magnetoreológicos) y con el mejor caso pasivo (caso no controlado, puede ser el caso 2 o 3). Los desplazamientos en tanto sólo son comparados con el caso 1.

En el caso en que el amortiguamiento de los aisladores es un 5% del amortiguamiento crítico, se tienen 3 sistemas de control óptimos no dominados por ningún otro. Estos son el FLC1 (caso 5), FLC2 (caso 6a) y el caso Passive On (caso 3). La curva de Pareto para este caso se aprecia en la figura 6.1.

Se puede observar que el mejor FLC para reducir las aceleraciones es el FLC1, con reducciones de 27.6 % con respecto al caso 1 y 9.3% con respecto al mejor caso pasivo (caso 3).

Sin embargo, la mejor estrategia de control para disminuir los desplazamientos corresponde al caso Passive On (caso 3), con una reducción de 64.9% con respecto al caso 1.



**Figura 6.1:** Curva de Pareto para 5% de amortiguamiento

En los gráficos de la aceleración del edificio para los 4 sismos (Figuras 5.1, 5.4, 5.7 y 5.10), se observa que a pesar de haber una reducción en la aceleración peak, en muchos instantes la aceleración de la estructura controlada es superior a la de la estructura sin disipadores. En caso de que se requiera prevenir esto mediante la disminución de la aceleración RMS, se tendría que incluir este parámetro como un objetivo aparte.

Lo anterior no sucede para los desplazamientos (Figuras 5.2, 5.5, 5.8 y 5.11). En general se observa que el desplazamiento relativo de la estructura controlada es inferior al de la estructura sin disipadores para toda la duración del sismo.

Si se observan los registros en el tiempo del voltaje aplicado al disipador con los tres FLC (Figuras 5.3, 5.6, 5.9 y 5.12), se observa que el FLC1 tiende a no

sobrepasar 0.5 V, el FLC2 1.0 V y el FLC3 1.1V. En este caso, coincide que los FLC que tienden a ocupar mayores voltajes, tienen una mayor reducción de desplazamientos. A su vez, el FLC que tiene mayor reducción de aceleración, prácticamente no sobrepasa nunca 0.5 V.

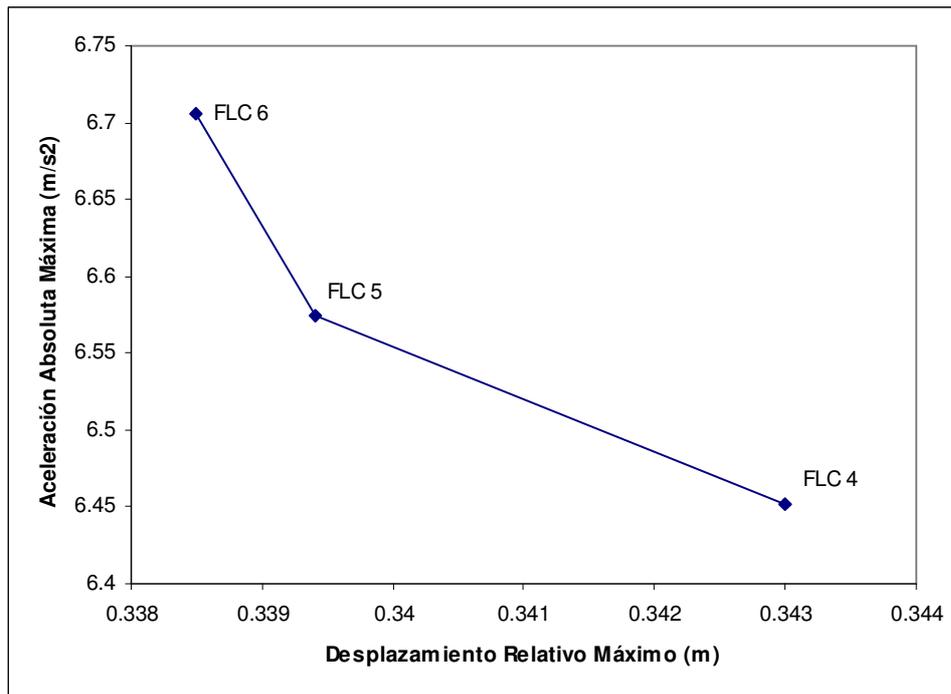
En este caso, el sistema de control alternativo Skyhook no destaca sobre los FLC. De hecho, no está en el rango 1 de Pareto-Dominancia.

En el caso en que el amortiguamiento de los aisladores es un 12% del amortiguamiento crítico, se tiene un solo sistema no dominado, que corresponde al sistema alternativo Skyhook. En este caso, dicho sistema de control domina sobre todos los demás FLC, obteniendo menores desplazamientos y aceleraciones. El sistema de control Skyhook reduce las aceleraciones 19.1% con respecto al caso 1 y 6.8% con respecto al mejor caso pasivo (caso3). Por su parte, los desplazamientos son reducidos en un 44% con respecto al caso 1.

Sin considerar este sistema de control se tiene 3 sistemas de control no dominados, estos son: el FLC4 (caso 5), FLC5 (caso 6a) y FLC6 (caso 6b). La curva de Pareto se aprecia en la figura 6.2.

Se puede observar que el mejor FLC para reducir las aceleraciones es el FLC4, con reducciones de 16,7 % con respecto al caso 1 y 4.2% con respecto al mejor caso pasivo (caso 3).

El mejor FLC para disminuir los desplazamientos es el FLC6 (caso 6b), con una reducción de 32.5% con respecto al caso 1, siendo superior por un margen mínimo al caso Passive On (caso 3, reducción de 32.3% con respecto al caso1).



**Figura 6.2:** Curva de Pareto para 12% de amortiguamiento

En los gráficos de la aceleración del edificio para los 4 sismos (Figuras 5.13, 5.16, 5.19 y 5.22), se observa el mismo fenómeno que sucede en el caso de 5%, esto es, que a pesar de haber una reducción en la aceleración peak, en muchos instantes la aceleración de la estructura controlada es superior a la de la estructura sin disipadores. Al igual que en el caso de 5%, si se requiere prevenir esto mediante la disminución de la aceleración RMS, se tendría que incluir este parámetro como un objetivo aparte.

Lo anterior no sucede para los desplazamientos (Figuras 5.14, 5.17, 5.20 y 5.23). En general, se observa que el desplazamiento relativo de la estructura controlada es inferior al de la estructura sin disipadores para toda la duración del sismo.

Si se observan los registros en el tiempo del voltaje aplicado al disipador con los tres FLC (Figuras 5.15, 5.18, 5.21 y 5.24), se observa que el FLC5 tiende a aplicar un voltaje casi constante de 1.05 V. Lo mismo sucede con el FLC6, el cual tiende a aplicar un voltaje casi constante de 1.1 V. En este caso, coincide que los FLC que tienden a ocupar mayores voltajes, tienen una mayor reducción de desplazamientos. A su vez, el FLC que tiene mayor reducción de aceleración (FLC4), tiene un voltaje promedio mucho más bajo y variable que los otros dos FLC.

Comparando globalmente la situación de 5% de amortiguamiento con la de 12% de amortiguamiento, se observa que esta última tiene menores aceleraciones, pero menor reducción con respecto al caso sin disipadores, es decir, se tiene un menor control de las aceleraciones, y la adición de los disipadores magnetoreológicos es menos efectiva que en el caso del 5%, donde dicha adición produce reducciones de las aceleraciones mucho mayores porcentualmente.

En cuanto a los desplazamientos, se observa que en general los desplazamientos controlados son menores en el caso de 5% que en el caso de 12%. Esto se debe a que el caso de 12% tiene menos disipadores instalados que el caso de 5% (4 disipadores contra 8), ya que de otra forma el control de las aceleraciones se tornaba muy difícil.

#### Limitaciones del estudio y recomendaciones a trabajos futuros

La principal limitación de este estudio es el modelo adoptado para representar a los aisladores elastoméricos. Estos aisladores son modelados a través de resortes de rigidez constante, convirtiéndolos en elementos lineales. La rigidez corresponde a la que tendría el aislador para sismos como los que se utilizaron en este estudio. Esto trae como consecuencia que dicho modelo no sea válido para sismos de menor

magnitud, donde generalmente la rigidez del resorte sería mayor, por lo que no se puede evaluar los sistemas de control obtenidos para sismos más frecuentes.

Por lo mismo, se recomienda que en un trabajo a futuro, se elabore un modelo no lineal más sofisticado del aislador que permita obtener su respuesta para sismos de distinta magnitud. Un ejemplo de esto lo son los modelos ANFIS, los cuales en base a ensayos de laboratorios, calibran modelos en lógica difusa para representar adecuadamente un sistema (Jang, 1993).

Por otro lado, un inconveniente no menor es el gran tiempo que demoran las rutinas de algoritmos genéticos en converger. Esto trae como consecuencia que se deban acortar el número de rutinas a ejecutar, lo que en un proceso tan dependiente de la prueba y error como lo son los algoritmos genéticos, no es favorable.

Esto podría atacarse utilizando programación paralela que optimice el uso de computadores de varios núcleos, ya que actualmente las rutinas de Matlab que no sean explícitamente programados de esta manera, no hacen uso de más de 1 núcleo por rutina.

## Anexo A: Comprobación de períodos de la estructura simplificada

$$k := \begin{pmatrix} 165536 & -14368 & -2798 \\ -14329 & 75019 & -33458 \\ -2632 & -31520 & 29568 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$i := 1..3 \quad j := 1..3$$

$$\text{dif}_{i,j} := \frac{k_{i,j} - k_{j,i}}{k_{i,j}} \cdot 100$$

$$\text{dif} = \begin{pmatrix} 0 & 0.27 & 5.93 \\ -0.27 & 0 & 5.79 \\ -6.31 & -6.15 & 0 \end{pmatrix}$$

Matriz que muestra los errores porcentuales de los términos simétricos (K debe ser simétrica)

Al no haber diferencias significativas, se deja el valor definitivo de 2 puntos simétricos como el promedio de ambos.

$$i := 1..3 \quad j := 1 \quad k_{i,j} := \frac{k_{i,j} + k_{j,i}}{2} \quad k_{j,i} := k_{i,j}$$

$$i := 2..3 \quad j := 2 \quad k_{i,j} := \frac{k_{i,j} + k_{j,i}}{2} \quad k_{j,i} := k_{i,j}$$

Matriz de rigidez definitiva:

$$k = \begin{pmatrix} 165536 & -14348 & -2715 \\ -14348 & 75019 & -31520 \\ -2715 & -31520 & 29568 \end{pmatrix} \frac{\text{tonf}}{m}$$

$$i := 1..3 \quad j := 1..3$$

$$\text{dif}_{i,j} := \frac{k_{i,j} - k_{j,i}}{k_{i,j}} \cdot 100$$

$$\text{dif} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Definición de matriz de masas: Como los grados de libertad están ubicados en el centro de gravedad del plano donde se concentrará la masa, es que la matriz de masas es diagonal.

$$M := \begin{pmatrix} 4.512 & 0 & 0 \\ 0 & 4.554 & 0 \\ 0 & 0 & 5.765 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{tonf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

$$w2 := \text{eigenvals}(M^{-1} \cdot k) \quad w2 = \begin{pmatrix} 37177.397 \\ 18770.261 \\ 2342.376 \end{pmatrix} \frac{1}{\text{s}^2}$$

$$T_i := \frac{2 \cdot \pi}{(w2_i)^{0.5}} \quad T = \begin{pmatrix} 0.0326 \\ 0.0459 \\ 0.1298 \end{pmatrix} \text{s}$$

El principal período de vibración en esta dirección es

$$T_{\text{modelo}} := T_3 \quad T_{\text{modelo}} = 0.1298 \text{s}$$

El período obtenido con del modelo de elementos finitos es:

$$T_{\text{ef}} := 0.1367 \text{s}$$

Por lo tanto el error porcentual es de

$$\text{error} := \frac{T_{\text{ef}} - T_{\text{modelo}}}{T_{\text{ef}}} \cdot 100 \quad \text{error} = 5.03$$

## Anexo B: Obtención de la matriz de masa, rigidez y amortiguamiento

$$k := \begin{pmatrix} 123962 & -107227 & -20082 & 3508 \\ -107272 & 129400 & -20445 & -1624 \\ -20059 & -20428 & 73746 & -33260 \\ 3431 & -1587 & -32475 & 30637 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$i := 1..4 \quad j := 1..4$$

$$\text{dif}_{i,j} := \frac{k_{i,j} - k_{j,i}}{k_{i,j}} \cdot 100$$

$$\text{dif} = \begin{pmatrix} 0 & -0.04 & 0.11 & 2.19 \\ 0.04 & 0 & 0.08 & 2.28 \\ -0.11 & -0.08 & 0 & 2.36 \\ -2.24 & -2.33 & -2.42 & 0 \end{pmatrix}$$

Matriz que muestra los errores porcentuales de los términos simétricos (K debe ser simétrica)

Al no haber diferencias significativas, se deja el valor definitivo de 2 puntos simétricos como el promedio de ambos.

$$i := 1..4 \quad j := 1 \quad k_{i,j} := \frac{k_{i,j} + k_{j,i}}{2} \quad k_{j,i} := k_{i,j}$$

$$i := 2..4 \quad j := 2 \quad k_{i,j} := \frac{k_{i,j} + k_{j,i}}{2} \quad k_{j,i} := k_{i,j}$$

$$i := 3..4 \quad j := 3 \quad k_{i,j} := \frac{k_{i,j} + k_{j,i}}{2} \quad k_{j,i} := k_{i,j}$$

Matriz de rigidez definitiva:

$$k = \begin{pmatrix} 123962 & -107250 & -20071 & 3470 \\ -107250 & 129400 & -20428 & -1587 \\ -20071 & -20428 & 73746 & -32868 \\ 3470 & -1587 & -32868 & 30637 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{tonf}}{\text{m}}$$

$$i := 1..4 \quad j := 1..4$$

$$\text{dif}_{i,j} := \frac{k_{i,j} - k_{j,i}}{k_{i,j}} \cdot 100$$

$$\text{dif} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Definición de matriz de masas: Como los grados de libertad están ubicados en el centro de gravedad del plano donde se concentrará la masa, es que la matriz de masas es diagonal.

$$M := \begin{pmatrix} 4.009 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.512 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.554 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.765 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{tonf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

$$w2 := \text{eigenvals}(M^{-1} \cdot k) \quad w2 = \begin{pmatrix} 55056.549 \\ 21353.672 \\ 14.454 \\ 4683.317 \end{pmatrix} \frac{1}{\text{s}^2}$$

$$T_i := \frac{2 \cdot \pi}{(w2_i)^{0.5}} \quad T = \begin{pmatrix} 0.0268 \\ 0.043 \\ 1.6527 \\ 0.0918 \end{pmatrix} \text{s}$$

Frecuencias angulares de los modos de vibrar:

$$i := 1..4 \quad w_i := \sqrt{w2_i} \quad w = \begin{pmatrix} 234.641 \\ 146.129 \\ 3.802 \\ 68.435 \end{pmatrix} \frac{1}{\text{s}}$$

$$\text{Aux} := \begin{pmatrix} \frac{1}{3.802} & 3.802 \\ \frac{1}{68.435} & 68.435 \end{pmatrix}$$

Primer caso corresponde a aisladores reales en el edificio Andalucía (12%)

$$\beta := \begin{pmatrix} 0.12 \\ 0.05 \end{pmatrix} \quad \text{Amortiguamiento de 12\% para el primer modo(solo aislador) y} \\ \text{5\% para el segundo modo (2\% estructura y 12\% aislador)}$$

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} := 2 \cdot (A_{ux}^{-1} \cdot \beta) \quad a_0 = 0.8941 \quad a_1 = 0.0013$$

$$C := a_0 \cdot M + a_1 \cdot k$$

$$C = \begin{pmatrix} 161.057 & -136.242 & -25.496 & 4.407 \\ -136.242 & 168.415 & -25.950 & -2.016 \\ -25.496 & -25.950 & 97.753 & -41.752 \\ 4.407 & -2.016 & -41.752 & 44.074 \end{pmatrix} \frac{\text{tonf} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

Amortiguamiento de los modos restantes

$$\text{3er Modo: } \beta_3 := \frac{a_0}{2 \cdot w_2} + \frac{a_1 \cdot w_2}{2} \quad \beta_3 = 0.10$$

$$\text{4to Modo: } \beta_4 := \frac{a_0}{2 \cdot w_1} + \frac{a_1 \cdot w_1}{2} \quad \beta_4 = 0.15$$

Segundo Caso corresponde a aisladores ficticios de bajo amortiguamiento (5%)

$$\text{Amort} := \begin{pmatrix} 0.05 \\ 0.03 \end{pmatrix} \quad \text{Amortiguamiento del 5\% para el primer modo(solo aislador) y} \\ \text{3\% para el segundo modo (2\% estructura y 5\% aislador)}$$

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} := 2 \cdot (\text{Aux}^{-1} \cdot \text{Amort}) \quad a_0 = 0.3687 \quad a_1 = 0.0008$$

$$C := a_0 \cdot M + a_1 \cdot k$$

$$C = \begin{pmatrix} 100.403 & -85.588 & -16.017 & 2.769 \\ -85.588 & 104.928 & -16.302 & -1.266 \\ -16.017 & -16.302 & 60.530 & -26.229 \\ 2.769 & -1.266 & -26.229 & 26.574 \end{pmatrix} \frac{\text{tonf} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

Amortiguamiento de los modos restantes

$$\text{3er Modo: } \beta_3 := \frac{a_0}{2 \cdot w_2} + \frac{a_1 \cdot w_2}{2} \quad \beta_3 = 0.06$$

$$\text{4to Modo: } \beta_4 := \frac{a_0}{2 \cdot w_1} + \frac{a_1 \cdot w_1}{2} \quad \beta_4 = 0.09$$

## Referencias

- [1] Aguilera, P. “Efecto de vibraciones verticales en la respuesta de un edificio aislado sísmicamente”, *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2002.
- [2] Ahlawat, A. S., and Ramaswamy, A. “Multi-objective optimal design of FLC driven hybrid mass damper for seismically excited structures”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, 2002, pp. 1459-1479.
- [3] Barra, P. “Desarrollo sistema de control para disipador magneto reológico en pasarela peatonal”, *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2007.
- [4] Chopra, A. “Earthquake Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, (2nd edn)”, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.
- [5] Deb, K, Agrawal, S, Pratab, A, Meyarivan, T “A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGAI”, *Proceedings of PPSN-6*, 2000, pp. 849-858.
- [6] Dyke, S. J., y Spencer, B. F., Jr. “Seismic response control using multiple MR dampers”. *Proc. 2nd Int. Workshop on Struct. Control, Hong Kong University of Science and Technology Research Centre*, Hong Kong, 1996, pp. 163-173.
- [7] Furuhashi, T, Miyata, Y, Nakaoka, K, Uchikawa, Y. “New approach to genetic based machine learning and an efficient funding of fuzzy rules”, *Advances in Fuzzy Logic, Neural Networks, and Genetic Algorithms*, 1995, pp. 114-122.

- [8] Jang, J. "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 23, 1993, pp. 665-684.
- [9] Jangid R S, Kelly JM. "Base isolation for near-fault motions", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2001, pp. 691-707
- [10] Karr C. L., "Design of an Adaptive Fuzzy Logic Controller Using a Genetic Algorithm", *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, Univ. of Calif., San Diego, 1992, pp. 450-457.
- [11] Kelly, J. "The role of damping in seismic isolation", *Proceedings of the Joint ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, Seismic Shock and Vibration Isolation*. San Diego, CA, Julio 1998
- [12] Kelly, S. "Seismic Protection of Structures using hybrid control systems", *A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of science in Civil Engineering*, Washington State University, Mayo 1997.
- [13] Kim, H. –S. Y Roschke, P. N., "Design of Fuzzy Logic Controller for Smart Base Isolation System using Genetic Algorithm", *Engineering & Structures*, Vol. 28, 2006, pp. 84-96
- [14] Lin, P.Y., Roschke, P.N. and Loh, C.H. "Hybrid base-isolation with magnetorheological damper and fuzzy control", *Structural Control and Health Monitoring*, 2006, pp. 384-405

- [15] Lin, P-Y, Roschke, P, Loh, C-H, “System identification and real application of a smart magneto-rheological damper”, *Proceedings of the 2005 International Symposium on Intelligent Control, 13th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Limassol, Cyprus, 2005.
- [16] Lotfi A. Zadeh, "Fuzzy Sets", *Information and Control*,. vol. 8, 1965, pp. 338-353
- [17] Lu Q., Peng, Z., Chu, F. Y Huang, J. "Design of Fuzzy Controller for Smart Structures Using Genetic Algorithms", *Smart Materials and Structures*, Vol. 12, 2003, pp. 979-986.
- [18] Oh, J., Roschke, P. N., Lin, P.-Y., Carlson, J. D., and Sunakoda, K., "Experimental Behavior and Neuro-Fuzzy Modeling of 30-ton Magnetorheological Damper," *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 8, No. 2, Marzo, 2004, pp. 213-219.
- [19] MATLAB. Version 7.4.0 The Mathworks Inc.; 2007.
- [20] Reyes, M. “Factibilidad de uso de disipadores magnetoreologicos en pasarelas peatonales”, *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil*, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2006.
- [21] Shook, D, Roschke, P, Lin, P-Y, Loh, C-H, “GA-optimized fuzzy logic control of a large-scale building for seismic loads”, *Engineering & Structures* 2008, pp. 436-449.