

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ALGORITMO DE CONTROL DE DESPLAZAMIENTOS DE EDIFICIOS SEMIACTIVO DE MANERA DESCENTRALIZADA

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

P R E S E N T A D A P O R

ERNESTO MORALES FRANCO

DIRECTOR DE TESIS: DR. MANUEL E. RUIZ-SANDOVAL HERNÁNDEZ

MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE DE 2008

ALGORITMO DE CONTROL DE DESPLAZAMIENTOS DE EDIFICIOS SEMIACTIVO DE MANERA DESCENTRALIZADA RESUMEN

POR

ERNESTO MORALES FRANCO

En la actualidad, la ingeniería estructural tiene la obligación de brindar comodidades a la sociedad. La presente tesis implementa de manera analítica recursos tecnológicos innovadores en la ingeniería civil. El desarrollo de este tema en México es casi desconocido, pero no por ello olvidado.

En esta investigación se presenta una noción del control estructural y de los diferentes tipos de este. Así mismo, se realiza un repaso general del estado del arte del control estructural, desde el siglo pasado hasta la actualidad. Destacándose así, tanto los avances logrados como el constante interés de diversos investigadores de todo el mundo por hacer estructuras más seguras. México no es pionero en el control estructural, pero debido a la vulnerabilidad que presentan varias zonas del país, ante desastres naturales, se han desarrollado dispositivos de este tipo.

El objetivo general de la presente tesis es determinar un algoritmo de control descentralizado que permita reducir los desplazamientos de edificios ante eventos sísmicos.

Para dicho fin, se llevan a cabo simulaciones utilizando estructuras representativas de edificaciones altas y bajas. La primera etapa consiste en someter a las estructuras a los sismos Centro-NS, Taft-NS y Hachihone-NS, escalados a una velocidad de 50 m/s. Los resultados a estudiar son: los desplazamientos, las velocidades, las aceleraciones, los desplazamientos de entrepiso y las fuerzas aplicadas a la estructura.

En cada una de las siguientes etapas, se realiza una comparación de los resultados obtenidos al modificar las estructuras con diferentes controles, a saber:

- control pasivo
- control activo centralizado (ideal)
- control activo descentralizado parcialmente
- control semiactivo centralizado

Finalmente, se propone un algoritmo de control descentralizado, en el cual cada dispositivo reacciona de manera independiente ante una solicitación. Se pretende obtener un algoritmo sencillo y fácil de implementar.

Esta investigación es un pequeño paso ante el rezagado camino de la ingeniería mexicana, en este tema. Sin duda, es necesario estimular el uso de la gran gama de recursos existentes en la ingeniería civil, y para ello es preciso llevar a cabo trabajos interdisciplinarios que requieren conocimientos de otras áreas de investigación.

Para mis padres, quienes me han apoyado incondicionalmente.

CONTENIDO

	TABLAS	vi
	FIGURAS	vii
	AGRADECIMIENTOS	xi
	1. INTRODUCCIÓN	1
	1.1. GENERALIDADES	1
	1.2. ANTECEDENTES	2
	1.3. CLASIFICACIÓN DEL CONTROL	3
	1.3.1CONTROL PASIVO	3
	1.3.2 OTROS DISIPADORES	12
	1.3.3 CONTROL ACTIVO	13
	1.3.4 CONTROL HÍBRIDO	15
	1.3.5 CONTROL SEMIACTIVO	16
	1.4. DISIPACIÓN DE ENERGÍA PASIVA	20
	1.5. CONTROL ESTRUCTURAL	20
	1.5.1CONTROL ESTRUCTURAL CENTRALIZADO Y DECENTRALIZADO	20
	1.6. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	24
2.	FUNDAMENTOS DEL CONTROL ACTIVO, PASIVO Y	05
		25
	2.1. GENERALIDADES	25
	2.2. REPRESENTACION DE ESTADOS	25
	2.3. CONTROL ESTRUCTURAL MODERNO	26
	2.4. CONTROL ÓPTIMO LINEAL CLÁSICO	27
	2.5. SOLUCIÓN DEL CONTROL (LQR)	31
	2.6. REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA SIN CONTROL	32
	2.7. REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA CON CONTROL PASIVO	33

	2.8. REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA CON CONTROL ACTIVO	33
	2.9. REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA CON CONTROL SEMIACTIVO	34
	2.10. CONCEPTO GENERAL DEL CONTROL CENTRALIZADO	35
3.	MODELOS ADOPTADOS	
	3.1. GENERALIDADES	37
	3.2. MODELO DE 5 NIVELES	37
	3.3. MODELO DE 20 NIVELES	41
	3.4. SISMOS UTILIZADOS	46
	3.5. DISPOSITIVOS UTILIZADOS	47
4.	IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO	49
	4.1. GENERALIDADES	49
	4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SIN CONTROL	49
	4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CON CONTROL PASIVO	52
	4.4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CON CONTROL ACTIVO	54
5.	IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL SEMIACTIVO CENTRALIZADO	69
	5.1. GENERALIDADES	69
	5.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CON CONTROL SEMIACTIVO	69
6.	IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ACTIVO DESCENTRALIZADO	85
	6.1. GENERALIDADES	85
	6.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CON CONTROL ACTIVO DESCENTRALIZADO PARCIALMENTE	85
7.	IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL SEMIACTIVO DESCENTRALIZADO	95
	7.1. GENERALIDADES	95

7.2. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO	95
7.3. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PROPUESTO	101
8. CONCLUSIONES	116
9. REFERENCIAS	118

TABLAS

Tabla 3.1 Propiedades del modelo analítico	39
Tabla 3.2 Propiedades dinámicas del modelo analítico	40
Tabla 3.3 Propiedades de estructura SAC de 20 Niveles	42
Tabla 3.4 Propiedades dinámicas de estructura SAC de 20 niveles	45
	10
Tabla 3.5 Especificaciones de los dispositivos SHM	48
Tabla 4.1 Dimensiones de las matrices para cada modelo	52
Tabla 4.2 Dimensiones de las matrices necesarias para LQR para cada	
modelo	55
Tabla 4.3 Dimensiones de las matrices obtenidas del LQR para cada	
modelo	55
Tabla 7.1 Pendientes implementadas en el algoritmo de control semiactivo	00
descentralizado propuesto	101
Tabla 7.2 Pendientes implementadas en el algoritmo de control semiactivo	
descentralizado propuesto para 20 niveles	100
	103

FIGURAS

Figura 1.1 Anillo de fuego y placas tectónicas, origen de actividad sísmica	1
Figura 1.2 TMD instalada en Taipei 101	4
Figura 1.3 Dispositivos disipadores de energía metálicos	6
Figura 1 4 Dispositivos disipadores de energía por fricción	7
Figura 1.5 Dispositivos disipadores de energía viscoelásticos	8
Figura 1.6 Dispositivos disipadores de energía videocidades	a
Figura 1.7 Dispositivos disipadores de energía tino TLCD	10
Figura 1.8 Aisladoros do baso	11
Figura 1.0 Dispositivos disipadares de aparaía povedeses	10
Figura 1.9 Dispositivos disipadores de energía novedosos	12
	14
	14
Figura 1.12 Esquema de tendon de control activo	14
Figura 1.13 HMD tipo V instalado en la torre Shinsuku Park en Japon	15
Figura 1.14 Aislamiento de base activo	15
Figura 1.15 Amortiguador de orificio variable implementado en edificio Shizuoka	
Japón	16
Figura 1.16 Amortiguador de fricción controlable	17
Figura 1.17 Esquema de amortiguador de impacto	18
Figura 1.18 Esquema de amortiguador de liquido controlable (TLCD)	18
Figura 1.19 Sección transversal del amortiguador ER	19
Figura 1.20 Amortiguador MR	19
Figura 1.21 Esquema de control centralizado	21
Figura 1.22 Esquema de control parcialmente centralizado	22
Figura 1.23 Esquema de control descentralizado	23
Figura 2.1 Esquema de configuración Moderna (MIMO)	27
Figura 2.2 Sistemas que sor regidos por las condiciones de frontera	30
Figura 2.3 Comportamiento de las soluciones del control	32
Figura 2.4 Esquema de control pasivo. Ciclo abierto	32
Figura 2.5 Esquema de control activo. Ciclo cerrado	34
Figura 2.6 Esquema de control semiactivo. Ciclo cerrado	35
Figura 2.7 Escaparia usual do adquisición do datos con control contralizado	25
Figura 2.8 Diagrama do fluio para control activo	26
Figura 2.0 Diagrafila de llujo para control comiectivo	20
Figura 3.1 Estructura con sistema de control semiactivo	30
Figura 3.2 Ubicación de los dispositivos en planta y elevación	38
Figura 3.3 Instalación y modelado de dispositivo, y su conexión a partir de su	00
	38
Figura 3.4 Modelo estructural y su representacion esquematica	39
Figura 3.5 Modelo con control estructural y su representación esquemática	
simplificada	40
Figura 3.6 Estructura Benchmark y la ubicación de los dispositivos	41
Figura 3.7 Modelo sin control estructural y su representación esquemática	43
Figura 3.8 Modelo con control estructural y su representación esquemática	44
Figura 3.9 Sismos seleccionados y normalizados a una velocidad espectral de	
50m/s	46
Figura 3.10 Configuración de las pruebas con Amortiguadores MR	47
Figura 4.1 Modelo para estructura sin control estructural	49

seleccionados. 50 Figura 4.3 Respuestas máximas de la estructura de 20 niveles ante los 3 sismos seleccionados. 51 Figura 4.4 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control pasivo ante los 3 sismos seleccionados. 53 Figura 4.5 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control pasivo ante los 3 sismos seleccionados. 54 Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 57 Figura 4.6 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 58 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 59 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 60 Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 61 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01 62 Figura 4.14 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01 y 0.005. 63 Figura 4.14 Ruerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 64 <	Figura 4.2 Respuestas máximas de la estructura de 5 niveles ante los 3 sismos	
Figura 4.3 Respuestas máximas de la estructura de 20 niveles ante los 3 sismos seleccionados	seleccionados	50
seleccionados. 51 Figura 4.4 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control pasivo ante los 3 sismos seleccionados. 53 Figura 4.5 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control pasivo ante los 3 sismos seleccionados. 54 Figura 4.6 Esquema básico de control activo centralizado. 56 Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 57 Figura 4.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 59 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 60 Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 61 Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 62 Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 2 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 63 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 64 Figura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 64	Figura 4.3 Respuestas máximas de la estructura de 20 niveles ante los 3 sismos	
Figura 4.4 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control pasivo 53 ante los 3 sismos seleccionados. 54 Figura 4.5 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control pasivo 56 Figura 4.6 Esquema básico de control activo centralizado. 56 Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 57 Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 58 Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 58 Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 58 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo 59 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo 61 Figura 4.10 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 61 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo 61 Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 61 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 61 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 64 Figura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con cont	seleccionados	51
ante los 3 sismos seleccionados. 53 Figura 4.5 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control pasivo 54 Figura 4.6 Esquema básico de control activo centralizado. 56 Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 57 registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 57 Figura 4.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo 58 Figura 4.9 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 58 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo 59 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo 60 Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 61 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 62 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 63 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 63 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 62 Figura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 63 ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 64	Figura 4.4 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control pasivo	
Figura 4.5 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control pasivo 54 Figura 4.6 Esquema básico de control activo centralizado. 56 Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 57 ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 57 Figura 4.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al 58 Figura 4.9 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 59 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo 59 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo 60 Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 61 Figura 4.13 Pespuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 62 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 63 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 64 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 64 Figura 4.16 Sexpuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 64 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estru	ante los 3 sismos seleccionados	53
ante los 3 sismos seleccionados. 54 Figura 4.6 Esquema básico de control activo centralizado. 56 Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 57 Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 58 Figura 4.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 59 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 60 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 61 Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 62 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 64 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 64 Figura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005.	Figura 4.5 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control pasivo	
Figura 4.6 Esquema básico de control activo centralizado. 56 Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 57 Figura 4.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 58 Figura 4.9 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 60 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 61 Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 61 Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 62 Figura 4.13 Fespuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 63 Figura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 64 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 66 Figura 5.1 Bexpu	ante los 3 sismos seleccionados	54
Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	Figura 4.6 Esquema básico de control activo centralizado	56
ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 57 Figura 4.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al 58 Figura 4.9 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 59 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al 60 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al 61 Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 61 Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 61 Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 62 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 63 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 64 Figura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 64 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 64 Figura 4.17 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 66 Figura 5.16 Fuerzas ac	Figura 4.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo	
Figura 4.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 58 Figura 4.9 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 64 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 67 Figura 5.1 Esquema básico de control semiactivo centraliz	ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	57
registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 58 Figura 4.9 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 59 Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 60 Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 61 Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 62 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 63 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 64 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 65 Figura 4.16 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 66 Figura 4.17 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 67 Figura 5.1 Esquema básico de control semiactivo centralizado. 70 Figura 5.2 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01	Figura 4.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al	
Figura 4.9 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	58
ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	Figura 4.9 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo	
Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	59
registro Tati-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 60 Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 61 Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al 62 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 63 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 63 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 64 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 64 Figura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 66 Figura 4.17 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 67 Figura 4.18 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 68 Figura 5.1 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 67 Figura 5.2 Subsistema "Control semiactivo" para edificio de 20 niveles con control activo 68 Figura 5.3 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo 71 Figura 5.4 Fuerzas acum	Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al	
Figura 4.11 Respuestas maximos de la estructura de 5 niveles con control activo ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	60
ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01. 61 Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al 62 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 63 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 64 Figura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 64 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 66 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 67 Figura 4.17 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 67 Figura 5.1 Esquema básico de control semiactivo centralizado. 67 Figura 5.1 Esquema básico de control semiactivo centralizado. 70 Figura 5.3 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control 71 Figura 5.4 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 70 Figura 5.4 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 71 Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control sem	Figura 4.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo	~ /
Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	61
registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01 62 Figura 4.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 63 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 64 Figura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 66 Figura 4.17 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 67 Figura 4.18 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 67 Figura 4.18 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 67 Figura 5.1 Esquema básico de control semiactivo centralizado. 70 Figura 5.2 Subsistema "Control semiactivo" para edificio de 20 niveles con control 68 Figura 5.3 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 71 Figura 5.4 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 70 Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 74 Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centr	Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles debidos al	~~
Figura 4.13 Respuestas maximos de la estructura de 20 niveles con control activo 63 ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01	62
ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 63 Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 64 Figura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 66 Figura 4.17 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 67 Figura 4.18 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005. 67 Figura 5.1 Esquema básico de control semiactivo centralizado. 70 Figura 5.2 Subsistema "Control semiactivo" para edificio de 20 niveles con control semiactivo ante el registro Centro-NS con R de 0.03. 73 Figura 5.4 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado 74 Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control semiactivo ante el registro Taft-NS con R de 0.03. 74 Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control semiactivo ante el registro Taft-NS con R de 0.03. 75 Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control semiactivo ante el registro Hachi-NS con R de 0.03. 76	Figura 4.13 Respuestas maximos de la estructura de 20 niveles con control activo	~~
Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	ante el registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	63
Feigura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 64 Figura 4.15 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 65 Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 66 Figura 4.17 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 66 Figura 4.17 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 67 ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al	~ 4
Figura 4.15 Respuestas maximos de la estructura de 20 niveles con control activo 65 ante el registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	64
anie en legistro Tait-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	rigura 4.15 Respuestas maximos de la estructura de 20 niveles con control activo	6E
Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 riveles debidos al 66 Figura 4.17 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 67 Figura 4.18 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 67 Figura 4.18 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles con control activo 67 Figura 4.18 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 68 registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	Eigure 4.16 Euerzen agumuladan anligadan a la patruature de 20 nivelan debiden al	05
Figura 4.17 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 67 Figura 4.17 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control activo 67 Figura 4.18 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al 67 registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	registre Teft NS con P do 0.1, 0.02, 0.01 v 0.005	66
Figura 4.17 Respuestas maximos de la estructura de 20 niveles con control activo 67 ante el registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	Figure 4.17 Despuestes méximes de la estructure de 20 pivoles con control activo	00
Figura 4.18 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	anto al registro Hachi-NS con P do 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	67
registra 4. 10 ruerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005	Figure 4.18 Euorzes acumuladas anlicadas a la ostructura do 20 pivolos dobidos al	07
Figura 5.1 Esquema básico de control semiactivo centralizado	registre Hachi-NS con P do 0.1, 0.03, 0.01 v 0.005	68
Figura 5.7 Esquerna basico de control semiactivo centralizado. 70 Figura 5.2 Subsistema "Control semiactivo" para edificio de 20 niveles. 71 Figura 5.3 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 73 semiactivo ante el registro Centro-NS con R de 0.03. 73 Figura 5.4 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado 74 Centro-NS R de 0.03. 74 Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 74 semiactivo ante el registro Taft-NS con R de 0.03. 75 Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 76 Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 76 Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 76 Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 76 Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 77 Figura 5.8 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 77 Figura 5.9 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control 78 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79	Figure 5.1 Esqueme bésice de centrel comiective contrelizade	70
Figura 5.2 Subsistema Control semiactivo para edinicio de 20 miveles	Figura 5.1 Esquerria basico de control semiactivo centralizado	70
rigura 5.5 Respuestas maximos de la estructura de 5 niveles con control 73 rigura 5.4 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado 74 Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 74 Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 75 Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 75 Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 76 Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 76 Figura 5.8 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 77 Figura 5.9 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control 78 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 70 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 71	Figura 5.2 Subsistema Control semiactivo para editicio de 20 niveles	11
Figura 5.4 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado 74 Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 74 Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 75 Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 75 Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 76 Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control 76 Figura 5.8 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 77 Figura 5.8 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 77 Figura 5.9 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control 78 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 70 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 70 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 71 <	somiactivo anto ol rogistro Contro-NS con P do 0.02	72
Centro-NS R de 0.03. 74 Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control semiactivo ante el registro Taft-NS con R de 0.03. 75 Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 76 Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control semiactivo ante el registro Hachi-NS con R de 0.03. 76 Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control semiactivo ante el registro Hachi-NS con R de 0.03. 77 Figura 5.8 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 77 Figura 5.9 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control semiactivo ante el registro Centro-NS con R de 0.01. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 79 Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. 80	Figura 5.4 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado	75
Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control semiactivo ante el registro Taft-NS con R de 0.03	Centro-NS P de 0.03	71
rigura 5.5 Respuestas maximos de la estructura de 5 miveles con control semiactivo ante el registro Taft-NS con R de 0.03	Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control	/4
Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Taft- 76 NS R de 0.03	semiactivo ante el registro Taft-NS con R de 0.03	75
NS R de 0.03	Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Taft-	70
Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con controlsemiactivo ante el registro Hachi-NS con R de 0.03	NS R de 0.03	76
rigura 6.7 Respuestas maximes de la estructura de e mineres con control77semiactivo ante el registro Hachi-NS con R de 0.0378Figura 5.8 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Hachi-78NS R de 0.0378Figura 5.9 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control79Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado.79Centro-NS R de 0.01	Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control	70
Figura 5.8 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Hachi- NS R de 0.03	semiactivo ante el registro Hachi-NS con R de 0.03	77
NS R de 0.03 78 Figura 5.9 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control semiactivo ante el registro Centro-NS con R de 0.01	Figura 5.8 Euerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Hachi-	.,
Figura 5.9 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con controlsemiactivo ante el registro Centro-NS con R de 0.01Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado.Centro-NS R de 0.01	NS R de 0.03	78
semiactivo ante el registro Centro-NS con R de 0.01	Figura 5.9 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control	. 0
Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Centro-NS R de 0.01	semiactivo ante el registro Centro-NS con R de 0.01.	79
Centro-NS R de 0.01	Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo v semiactivo centralizado.	
	Centro-NS R de 0.01	80

Figura 5.11 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control	.
semiactivo ante el registro Tatt-NS con R de 0.01	81
Figura 5.12 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Tatt-	~~
NS R de 0.01	82
Figura 5.13 Respuestas maximos de la estructura de 20 niveles con control	~~
semiactivo ante el registro Hachi-NS con R de 0.01	83
Figura 5.14 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado.	~ (
Hachi-NS R de 0.01	84
Figura 6.1 Modelo con control activo descentralizado (5 niveles)	86
Figura 6.2 Agente del control descentralizado de cada dispositivo (5 niveles)	87
Figura 6.3 Niveles de descentralización	87
Figura 6.4 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo	
descentralizado ante el registro Centro-NS con R de 0.03	89
Figura 6.5 Fuerzas acumuladas del control activo descentralizado. Centro-NS R de	
0.03	90
Figura 6.6 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo	
descentralizado ante el registro Taft-NS con R de 0.03	91
Figura 6.7 Fuerzas acumuladas del control activo descentralizado. Taft-NS R de	
0.03	92
Figura 6.8 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control activo	
descentralizado ante el registro Hachi-NS con R de 0.03	93
Figura 6.9 Fuerzas acumuladas del control activo descentralizado. Hachi-NS R de	
0.03	94
Figura 7.1 Modelo de Kurino	96
Figura 7.2 Píales en el Lienzo	97
Figura 7.3 Descripción física del fundamento del algoritmo	98
Figura 7.4 Comportamiento del algoritmo propuesto	99
Figura 7.5 Diagrama de modelado para algoritmo propuesto (5 Niveles)	100
Figura 7.6 Proceso llevado a cabo en cada agente de manera descentralizada	101
Figura 7.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control	
propuesto ante el registro Centro-NS	102
Figura 7.8 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 5 niveles.	
Centro-NS	103
Figura 7.9 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control	
propuesto ante el registro Taft-NS	104
Figura 7.10 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 5 niveles.	
Taft-NS	105
Figura 7.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control	
propuesto ante el registro Hachi-NS	106
Figura 7.12 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 5 niveles.	
Hachi-NS	107
Figura 7.13 Diagrama de modelado para algoritmo propuesto (20 Niveles)	108
Figura 7.14 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control	
propuesto ante el registro Centro-NS	110
Figura 7.15 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 20 niveles.	
Centro-NS	111
Figura 7.16 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control	
propuesto ante el registro Taft-NS	
· · ·	112
Figura 7.17 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 20 niveles.	112

Figura 7.18 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control	
propuesto ante el registro Hachi-NS	114
Figura 7.19 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 20 niveles.	
Hachi-NS	115

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, quienes me infundieron la ética y la actitud que guían mi transitar por la vida. Así como los consejos y apoyo ofrecidos antes, y durante el desarrollo de este trabajo.

A mi hermana, por estar a mi lado y darme toda su ayuda. También a mis familiares por confiar en mí y brindarme su apoyo en momentos difíciles.

A Brenda, por su apoyo en la conclusión de esta etapa profesional.

Al Dr. Manuel E. Ruiz Sandoval Hernández, director de mi tesis, quien con su asesoramiento personal, técnico y científico, me estimuló para seguir creciendo intelectualmente. Además logró contagiarme con sus ideas y me impulsó a ponerlas en práctica.

A mis compañeros de posgrado por su amistad y compañerismo.

Agradezco a la UAM, por la formación otorgada durante mi estancia en esta casa de estudios. En particular, al posgrado en Ingeniería Estructural y su planta de profesores, quienes me brindaron sus conocimientos en distintos cursos.

Finalmente, también agradezco al CONACYT por la beca proporcionada, ya que sin esos recursos hubiera sido imposible culminar este trabajo.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

En diversas partes del mundo existen zonas de alto riesgo a desastres naturales, tales como: erupciones volcánicas, huracanes, terremotos etc. En México un problema latente son precisamente los sismos, debido a que nuestro país se encuentra ubicado en una zona de alta sismicidad, conocida como "el anillo de fuego". Esta corresponde a los límites de las placas tectónicas mostradas en la figura 1.1 y en donde se desarrolla una gran actividad sísmica.



Figura 1.1 Anillo de fuego y placas tectónicas, origen de actividad sísmica

Dicha actividad sísmica ocasiona daño tanto a las estructuras que se encuentran cimentadas en zonas cercanas a las fallas (Pacífico Mexicano), como a las que se localizan en otras zonas no tan próximas (Ciudad de México).

No sólo los movimientos telúricos dañan las estructuras. Nuestro país se encuentra ubicado en una zona donde los huracanes son un peligro inminente tanto por el Océano Pacífico como por el Atlántico.

La ingeniería estructural, preocupada por el buen comportamiento de las estructuras civiles así como por el confort de los usuarios del mismo, ha desarrollado sistemas que permiten controlar la respuesta sísmica de las estructuras. Estos sistemas consisten en incluir dispositivos que contrarrestan las acciones externas.

Las vibraciones estructurales producidas por sismos o vientos pueden ser controlados por medio de la modificación de las estructuras (masas, rigidez, amortiguamiento, forma estructural o incluyendo fuerzas pasivas o activas). El diseño por resistencia no asegura que el edificio responderá bien dinámicamente para satisfacer el confort y seguridad de los ocupantes.

La ingeniería evoluciona cuando existe un intercambio de conocimientos. Este trabajo pretende contribuir al desarrollo de la ingeniería estructural en conjunto con otras disciplinas, ya que intenta coadyuvar en la implementación de desarrollos tecnológicos

originados en las industrias automotriz y espacial a la solución de problemas típicos de ingeniería civil.

1.2 ANTECEDENTES

La ocurrencia de desastres naturales provoca, en muchos casos, la pérdida de vidas humanas y costos materiales elevados. Es de interés por parte de los investigadores el mitigar o controlar las acciones de dichos eventos. Esta sección se enfoca principalmente a acontecimientos históricos acerca de fenómenos sísmicos. México es sometido a este tipo de sucesos de manera frecuente por las condiciones geográficas en que se encuentra y que se mencionan en las generalidades de esta investigación.

En la actualidad el control estructural, debido a su enfoque a fenómenos sísmicos, es conocido como control de la respuesta sísmica. Se define como "aquellos sistemas de control que tienen la finalidad de proporcionar a las estructuras que los poseen, un desempeño sísmico superior basado en el conocimiento del peligro sísmico de una región y efectos de sitio, dinámica estructural y ubicación óptima e inteligente de dispositivos que ayudan al control" (Notas-Tena 2006).

El interés de los investigadores y hombres de la práctica, no es reciente. Existen nociones del control estructural desde hace más de 100 años, cuando John Milne (Japón) construyó una casa de madera sobre balines para demostrar que la estructura podría ser aislada de un sismo (G.W. Housner *et al.* 1997).

En Estados Unidos, en 1906, se patentó un sistema similar donde un edificio se sostiene sobre una placa de acero soportada por cuerpos esféricos. Otro intento de aislamiento fue el de separar la cimentación de la superestructura mediante capas de talco por Calentariens en Inglaterra en 1909; posteriormente, en 1921, en Tokio, Frank Lloyd Wrigh construye la primera estructura aislada, la cual consistía en utilizar una capa de lodo como elemento aislante. En esa década apareció el concepto de "piso suave", el cual consiste en concentrar el daño en el primer nivel (Notas-Tena 2006).

Asimismo, en 1909, surgen los principios de osciladores resonantes con sistemas sencillos. En un comienzo no incluían amortiguamiento, sólo masas unidas por resortes; sin embargo se fueron perfeccionando hasta que se llegó a aplicaciones en edificios. Resulta difícil implementar dichos osciladores debido a que las cargas accidentales a las que es sometido un edificio tienen un amplio contenido de frecuencias y no son sólo movimientos armónicos simples o monocromáticos.

A partir de 1959 la investigación, así como su implementación creció. Aparecieron aplicaciones en Rusia, Yugoslavia, Ucrania, México, China, Estados Unidos y Nueva Zelanda. Este último país fue el líder en investigación durante la década de los 70's y parte de los 80's, debido a las aportaciones del profesor Robinson, quien trabajó con elastómeros para sistemas de aislamiento (Notas-Tena 2006).

A mediados de la década de los 80's el liderazgo en el aislamiento es tomado por Japón y Estados Unidos, quienes desarrollaron investigación e incrementaron el número de aplicaciones; con todo, en la última década, Japón se convirtió en el país con mayor número de aplicaciones de aislamiento, seguido por Estados Unidos. Actualmente algunos países asiáticos siguen los pasos del país Nipón (Notas-Tena 2006).

México no se ha olvidado de este tipo de control. De hecho, ya existen aplicaciones de aislamiento, por parte de Manuel González Flores, quien aisló a base de balines una escuela y una iglesia. Sin olvidar a Federico Garza Tamez, quien basado en el principio pendular, aíslo la prensa de Reforma en 1995 y tres años después un edificio en Guadalajara. También existen aplicaciones en puentes a base de elastómeros laminados con corazón de plomo y otros dispositivos, como el utilizado en la presa de Infiernillo. En los últimos años la investigación que se ha desarrollado en este campo sólo se ha hecho por un grupo reducido de investigadores (Notas-Tena 2006).

La evolución del campo del control estructural en EE.UU. ha sido muy rápido. En este país, los sistemas de aislamiento de base pasiva en edificios de baja y mediana altura han sido aceptados como estrategias de diseño (G.W. Housner *et al.* 1997). Cabe mencionar que en la década de los 80's se desarrollan y presentan las primeras recomendaciones para diseño sísmico de estructuras con aislamiento por parte de Estados Unidos y Japón. Sin embargo, no fue si no hasta 1990 cuando se incorporan a las normas AASHTO y en 1991 en el UBC-91. En México las investigaciones desarrolladas por Tena 1998, Esteva y Veraz 1998 han permitido desarrollar una propuesta de diseño sísmico que es compatible con la filosofía de diseño de los reglamentos mexicanos (Tena 2003).

Durante la Segunda Guerra Mundial los conceptos de aislamiento y absorción de vibraciones fueron desarrollados y aplicados a aviones. Quizás este sea el motivo por lo que no se presentan avances significativos en la ingeniería estructural. Fue hasta los años 60's cuando la instrumentación fue muy popular para medir su desempeño durante sismos grandes (Lynch 2002).

Por otro lado, para estructuras flexibles (edificios altos) que son susceptibles a vientos fuertes, se han empleado amortiguadores de manera satisfactoria. A partir de ello comenzó a aparecer el interés por el estudio de dispositivos disipadores de energía, y fue hasta los 60's cuando comenzó un incremento en la investigación de este rubro.

A partir de los 70's las aplicaciones de las masas resonantes despegaron. El interés por nuevos disipadores fue creciendo. Las aplicaciones se hicieron una realidad en cuanto a control pasivo. Posteriormente, surge el control activo donde aparecen las primeras aplicaciones por la compañía Kajima en 1989, lo que obliga a los investigadores voltear la vista a estas nuevas tendencias.

1.3 CLASIFICACIÓN DEL CONTROL

Las estructuras que se diseñan para tener un desempeño superior presentan muchas restricciones para la implementación del control estructural, entre las cuales se encuentran los costos y la confiabilidad. En esta sección se presenta un resumen de los tipos de control más comunes y que han sido implementados.

1.3.1 CONTROL PASIVO

Es una técnica donde se puede controlar la respuesta de una estructura, mediante la adición de elementos especiales diseñados para modificar su respuesta ante acciones extremas y así absorber sus efectos (Notas Tena-2006). Se caracterizan por que no requieren fuente externa de energía. Las fuerzas que imparte son desarrolladas en respuesta al movimiento de la estructura.

El control pasivo se puede definir entre los controles, como aquel que resulta más sencillo y con un costo inicial más bajo. Se pueden definir tres técnicas para el control pasivo (Notas Tena-2006):

Osciladores de Masa resonante: técnica que tiene sus orígenes en la ingeniería mecánica con la vibración de maquinaria a principios del siglo XX. Consiste en controlar o reducir la respuesta dinámica mediante la inclusión de una masa relativamente pequeña unida por un resorte especial que permita tener una frecuencia de vibración muy cercana a la frecuencia fundamental de la estructura original, con lo que el oscilador adicional responde más rápidamente a la resonancia, y así reduce la respuesta del sistema principal. Dicho concepto pertenece a los dispositivos TMD (Tuned Mass Damper) que en la década de los 40's, gracias a Den Hartog se comienza a implementar en estructuras civiles con gran éxito.

Existen diferentes osciladores resonantes que han tenido numerosas aplicaciones en todo el mundo, a partir de la década de los 70's hasta la fecha. Cabe mencionar que han sido utilizados en edificios importantes, como la torre de Taipei en Taiwán mostrada en la figura 1.2 o la torre John Hancock en Boston.



Figure 1.2 TMD instalada en Taipei 101 (http:wikipedia.org)

 Dispositivos disipadores de energía: técnica que consiste en colocar dispositivos especiales dentro de la estructura original en lugares estratégicos y cuya función es disipar energía mediante deformación inelástica, fricción o amortiguamiento adicional. Amortiguadores de fluencia metálicos: son aquellos que cuentan con un buen mecanismo de disipación de energía a través de la deformación inelástica de metales (figura 1.3). El concepto y experimentación de este trabajo comienza con Kelly en 1972 y Skiner *et al.* en 1975 con disipadores por flexión (figura 1.3 (a)). A partir de las investigaciones de Kelly, en México se desarrolló la investigación de los dispositivos solera a cargo de Aguirre, Sánchez y González Alcorta quienes a partir de 1989, hicieron pruebas en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Tena-2003).

Un dispositivo que surge de este principio son los ADAS (Add Damping And Stiffness), los cuales disipan la energía por medio de los ciclos de histéresis (figura 1.3 (b)). Debido al interés en investigar este ramo, se han determinado las características de estos aparatos. Además, para incluir estos aparatos en el diseño de estructuras se debe ser capaz de caracterizar su comportamiento histerético ante cargas arbitrarias (G.W. Housner *et al.* 1997).

Como resultado del buen comportamiento de estos dispositivos surgen variantes entre las que destacan los TADAS (Triangular Add Damping And Stiffness) desarrollados por Tsai en Taiwán con el mismo principio de los ADAS (figura 1.3 (c)). Posteriormente, se investigaría el comportamiento de los llamados dispositivos paneles de cortante basados en la misma idea que los TADAS en EEUU y México.

Se desarrollaron otros dispositivos que, basados en las propiedades mecánicas de los mismos, logran disipar energía por torsión (figura 1.3 (d)). Otra idea ingeniosa de disipar energía fue la desarrollada en Japón en los 80's. Los tendones desadheridos fueron concebidos para fluir precisamente a carga axial, siguiendo el mismo principio de concentrar la disipación de energía.

Los dispositivos de fluencia metálicos pueden representarse matemáticamente mediante la elaboración de un modelo que, por teoría de plasticidad, pueda reproducir el comportamiento y predecir la respuesta bajo ciertas cargas. En lo que se refiere a investigaciones analíticas, Soong en 1995 desarrolló un modelo constitutivo. En ese mismo año, Tsai desarrolló una formulación de elementos finitos para evaluar una placa como disipador de energía y compararla con datos experimentales (G.W. Housner *et al.* 1997).

Para la implementación de amortiguadores en estructuras es necesario formular las guías de diseño y procedimiento basadas en estudios experimentales. La metodología se basa en modelos de histéresis fuerza – desplazamiento que se aplican a la ecuación de movimiento del sistema. Aplicaciones con estos dispositivos se encuentran en Nueva Zelanda, Italia, EE.UU. Japón, etcétera. En México se usó en refuerzo de edificios de concreto, así como en edificios nuevos en estructuras desplantadas tanto en suelo firme como en blando (G.W. Housner *et al.* 1997).









Figura 1.3. Dispositivos disipadores de energía metálicos. (a) Disipador por flexión. (b) ADAS. (c) TADAS. (d) Disipador por torsión. (Oviedo y Duque 2006)

Amortiguadores por fricción: son mecanismos para disipar energía, usados por muchos años en los frenos de automóviles para disipar energía cinética de movimiento. El principio se basa en disipar energía mediante la fricción de dos cuerpos sólidos y permite minimizar o incrementar la frecuencia de excitación. Para fines estructurales se inicia su estudio por los 80's.

Entre los principales dispositivos de este tipo se encuentran los dispositivos tipo Pall que consisten en placas atornilladas que disipan energía al moverse (figura 1.4 (a)). Este dispositivo cuenta con un gran número de aplicaciones y es usado principalmente en su país de origen, Canadá.

El amortiguador por fricción de Sumitomo (figura 1.4 (b)) y disipación de energía restringida (G.W. Housner *et al.* 1997) son ejemplos de aparatos que proveen buen desempeño y su comportamiento no se ve afectado significativamente por la amplitud de carga o los ciclos de carga. En años recientes este último se ha aplicado en la protección de nuevas estructuras reforzadas.

Otra técnica que surge con el mismo principio, es la de conexiones atornilladas que consiste en disipar energía en las conexiones. En los contravientos se dejan holguras por las que se puede deslizar la placa y así disipar energía por fricción. Se han hecho pruebas con conexiones de acero con buenos resultados; esta idea fue desarrollada por el Profesor Popov en 1989. A partir de ella se desarrollaron otros dispositivos como el DEFD (Disponsable Elements Friction Dampers) en Macedonia, hasta llegar a las conexiones pos-tensadas friccionantes, conocidas como PFCD (Post-tensioned Friction Damper Conection), las cuales son sistemas auto-centrantes capaces de disipar energía por medio del deslizamiento existente entre los tornillos y placas oblongas de latón (figura 1.4 (c)). Este dispositivo es básicamente una variación de las conexiones del Profesor Popov. (Notas Tena 2006)





Figura 1.4. Dispositivos disipadores de energía por fricción. (a) Disipador tipo Pall. (b) Amortiguador de fricción. (c) Disipación tipo PFCD

Amortiguadores viscoelásticos: consisten en dispositivos que disipan energía a base de materiales viscoelásticos. Su investigación surge en los 50's y no es si no hasta los 70's cuando comienzan a tener aplicaciones en la reducción de desplazamientos. Sus aplicaciones en la ingeniería civil aparecen por 1969 cuando se instalaron amortiguadores viscoelásticos (figura 1.5 (a)) en el ahora sucumbido WTC de Nueva York para reducir vibraciones del viento. Además ya existen aplicaciones en la Ciudad de México, es precisamente en un edificio de la compañía transnacional 3M la que ha desarrollado este tipo de dispositivos.

El comportamiento viscoelástico bajo cargas dinámicas depende de la frecuencia de vibración, esfuerzos y temperaturas ambientales, por lo que resulta difícil el diseño y control de estos dispositivos. El modelo matemático requiere proponer en la ecuación un modelo viscoelástico describiendo el módulo del material.

De manera diferente a los amortiguadores metálicos o friccionantes, un sistema estructural lineal con amortiguamiento viscoelástico permanece lineal, con la contribución de incrementar el amortiguamiento viscoso tanto como la rigidez lateral. Pruebas sísmicas a amortiguadores a escala completa y a otros amortiguadores más pequeños mostraron una deformación mayor al 300%. Estudios señalan que el diseño de los amortiguadores debería incrementar el amortiguamiento a más del 12%. Este dispositivo ha sido utilizado en varios edificios, como en Columbia Sea First Building en Seattle y además se usó en la Torre de Taipei para reducir vibraciones de viento; también en edificios de California y San Diego (G.W. Housner *et al.* 1997).

Se han desarrollado dispositivos con materiales similares con la finalidad de hacerlos más económicos, así como otras variaciones, como son los muros viscoelásticos (figura 1.5 (b)), o los viscoelásticos para conexiones desarrollados en Japón para uso residencial o, aún más complejo, la combinación viscoelástico-friccionante.



(a) (b) Figura 1.5. Dispositivos disipadores de energía viscoelásticos. (a) Disipador viscoelástico. (b) Muro viscoelástico

Amortiguadores con fluidos viscosos, consisten en un pistón cilíndrico inmerso en un fluido viscoso. Fue usado ampliamente en aplicaciones aeroespaciales y militares además se han adaptado a la ingeniería estructural. Se caracterizan por tener una respuesta viscosa lineal y alcanza un amplio rango de frecuencia. La viscosidad natural del aparato se configura a través de orificios (figura 1.6 (a)).

Este tipo de mecanismo, generalmente consiste de un pistón en el amortiguador con una envoltura fileteada (redondeada) con un componente de silicón o aceite. Disipa energía a

través del movimiento del pistón dentro del fluido altamente viscoso y, por lo tanto, la salida de la fuerza del amortiguador es proporcional a la velocidad del pistón. La ventaja de este comportamiento es la relación fuerza-velocidad $f = C * V^n$ la cual puede o no ser lineal; depende del valor de n.

Los dispositivos más populares son los de tipo Taylor que originalmente tenían fines aeroespaciales, adaptados a la ingeniería sísmica (figura 1.6 (b) y (c)). Por lo general, se instalan en diagonal. Actualmente, su aplicación ha crecido de manera significativa en países como Japón, EEUU y México.

Los amortiguadores reducen a 50 – 60 % la respuesta sin amortiguadores. Resultados experimentales muestran que éstos pueden reducir las demandas de deformación inelástica; además, reduce la cantidad de daño por un índice de deformación permanente monitoreado (G.W. Housner *et al.* 1997).



Figura 1.6. Dispositivos disipadores de energía con fluidos viscosos. (a) Esquema general. (b) Dispositivo tipo Taylor de baja fuerza de salida (c) Dispositivo tipo Taylor para puente de autopista (www.taylordevices.com)

Amortiguadores de líquido controlable (TLD): estos dispositivos proporcionan amortiguamiento de manera indirecta al sistema y mejoran su desempeño. Los LTD (Tuned Liquid Damper) absorben energía estructural por medio de las acciones del fluido viscoso y la energía se disipa al pasar el líquido a través de orificios con ciertas características.

Welt y Modi (1989) fueron los primeros en sugerir el uso de TLD en edificios para reducir la respuesta total durante vientos fuertes o sismos. Sin embargo, aparecieron variantes, conocidos como TLCD (Tuned Liquid Column Damper), que consisten en tubos redondeados con agua, donde la frecuencia fundamental depende sólo de la longitud de la columna de agua y la disipación del coeficiente de pérdida principal (figura 1.7). Un segundo amortiguador, propuesto por Nakamura en 1988, según Housner, es aquel que se olvida de los orificios, pero crea una no–linealidad con un hueco entre la masa y el mismo amortiguador. Los experimentos muestran una reducción en las oscilaciones inducidas en el modelo (G.W. Housner *et al.* 1997).

Este dispositivo fue aplicado en el marco de acero de la Torre del Aeropuerto de Nagasaki con 25 amortiguadores. En pruebas se observa que la utilización de este dispositivo aumenta aproximadamente cinco veces el amortiguamiento de la estructura. También se ha implementado en la Torre Yokohama de la marina (G.W. Housner *et al.* 1997).



Figura 1.7. Dispositivos disipadores de energía tipo TLCD. Swaroop (2003)

Aisladores de base: técnica que consiste en colocar dispositivos especiales entre la estructura y la cimentación, con la finalidad de aislar a la estructura de los movimientos del terreno. Esta técnica se recomienda para estructuras desplantadas en suelo firme, ya que la respuesta dinámica se puede reducir notablemente debido al alargamiento del periodo efectivo.

Entre los principales aisladores de base se encuentran:

- Elastoméricos laminados: consisten en placas de acero con hule vulcanizado, que permiten desplazamientos horizontales y una cierta rigidez vertical (figura 1.8 (a)).
- Elastoméricos laminados con corazón de plomo: son placas de acero vulcanizadas, pero la diferencia con el anterior es que estas tienen un corazón de plomo que permite dar rigidez axial e incrementar la energía disipada (figura 1.8 (b)).
- Amortiguadores histeréticos de acero: pertenecen a los de fluencia y pueden trabajar a flexión, torsión o axial (figura 1.8 (c)).

- Amortiguadores por extrusión de plomo: consisten en un tubo engrasado interiormente que contiene plomo, de manera que el plomo se desplaza en el interior del tubo (figura 1.8 (d)).
- Deslizantes: consiste en dejar que la estructura se mueva sobre soportes lisos y no transmita las fuerzas a la superestructura.
- Fricción: tiene el mismo principio que un péndulo, ya que deja mover la superestructura, pero se mantiene controlada por su propio peso (figura 1.8 (c)).







Figura 1.8. Aisladores de base. (a) Aisladores laminados. (b) Ésquema de aisladores laminados con corazón de plomo. (c) Aislador histerético de acero con fluencia axial. (d) Disipador por extrusión. (e) Aislador deslizante (concepto) (f) Aislador de fricción

Las ventajas de este tipo de control son: el costo (ya que es relativamente barato), no consume energía externa, es muy estable y sólo trabaja durante el evento. Considerando un sistema de una masa y un resorte, es decir un sistema de un grado de libertad, su modelo matemático sería la ecuación 1.1:

$$m \cdot \ddot{x} + d \cdot \dot{x} + (k + \Delta k) \cdot x = 0$$
 Ec. 1.1

En la ecuación vemos que para el modelo pasivo, el Δk es constante. Y para el control activo Δk podría cambiar en tiempo real. Alternativamente, el control activo mide X(t) como función del tiempo.

Los sensores y actuadores pueden introducir retrasos. Al igual, existen límites y condiciones para las idealizaciones, tales como $(k + \Delta k) \ge 0$ y la consideración de que toda estructura posee amortiguamiento. El control pasivo no realiza cambios en el sistema en tiempo real; sin embargo, su principal característica es que los controles pasivos son estables.

1.3.2 OTROS DISIPADORES DE ENERGÍA

El interés de extender el desarrollo del control pasivo se ha visto reflejado en un gran número de nuevos dispositivos que disipan energía. Por ejemplo, para los cables de puentes se propuso protegerlos con tubos con cortes de franjas en V o en U, lo cual modifica el número de Reynold y, según pruebas en túnel de viento, esto podría reducir significativamente las vibraciones aerodinámicas. También se ha intentado colocar amortiguadores entre los techos de edificios altos durante sismos fuertes, (figura 1.9) con la finalidad de acoplar estructuras y hacerlas trabajar en conjunto. De igual forma, se ha propuesto un amortiguador de hule con propiedades similares a las de un amortiguador viscoelástico desarrollado por Fujita. Inclusive para los cables de puentes se ha sugerido mejorar su comportamiento bañando el cable con hule (G.W. Housner *et al.* 1997).



Figura 1.9. Dispositivos disipadores de energía novedosos. Acoplamiento de estructuras. Oviedo (2006)

1.3.3 CONTROL ACTIVO

Es una técnica que utiliza sistemas electromecánicos controlados por un software y computadoras. Esta técnica pretende que, a partir de una fuente externa de energía, se controle un actuador que aplica fuerzas a la estructura de una manera preescrita. Además puede ser usada tanto para agregar como para disipar energía. La intención es modificar la respuesta de manera instantánea, lo cual resulta imposible.

La aplicación del control activo funciona bien en el manejo de edificios altos ante condiciones de vientos, pero para sismos resulta muy compleja, pues programar el comportamiento de estructuras y aún más, que se lleve a cabo resulta muy difícil. El principal problema que presenta este control es la cantidad de energía necesaria para su buen funcionamiento. Por otra parte, existe la necesidad de evitar fallas, pues un pequeño error resulta catastrófico, debido a que el sistema se puede desestabilizar por completo.

Al igual, se debe evitar despreciar el tiempo de retraso en el sistema, en la implementación del control en tiempo real. En general, el control activo permite controlar la respuesta de una estructura ante una excitación interna o externa, tales como ruido, tráfico, sismos o vientos, donde su función característica es la suministración de la energía necesaria para llevar a cabo sus efectos de control.

Los actuadores que pueden ser utilizados para este tipo de control son:

- HMD (Hybrid Mass Damper), la cual es una combinación de un TMD y un activador de control activo. Estos aparatos reducen la respuesta estructural principalmente sobre el movimiento natural del oscilador (TMD). Una de sus características es que requiere menos energía que los AMD para operar y su desempeño es comparable (figura 1.10 (a)).
- AMD (Active Mass Driver), consiste en una masa resonante (figura 1.10 (b)); sin embargo, no espera entrar en resonancia para disipar energía si no que trata de equilibrar el movimiento de la estructura adelantándose a lo que podría responder la estructura, como se muestra experimentalmente en la figura 1.11 (a).

La primera aplicación a escala completa de control activo a un edificio fue realizado por la compañía Kajima en 1989, en el edificio llamado Kyobashi Sheiwa de 11 niveles (figura 1.11 (b)). Dicha edificación tiene instalado un sistema AMD que consiste en dos masas también conocidas como AMD's. La masa primaria es usada para el movimiento horizontal (4ton) y la secundaria (1 ton) es empleada para reducir la torsión

En la actualidad se han reportado un gran número de publicaciones como la de Tanida, en 1991, quien desarrolló un HMD en forma de arco donde utiliza sólo una masa de 0.14% en vez de 1% que requería un TMD. También Koike, en 1994 hizo una extensión del HMD con forma de V, la cual tiene la ventaja de ajustarse al periodo fundamental. Varios investigadores como Shing *et al.* (1994), Kawatani *et al.* (1994), Petti *et al.* (1994), Suhardjo *et al.* (1992) y Spencer (1994) han considerado métodos de control óptimo para el diseño de controladores de HMD. Del mismo modo, debe reconocerse el interés de Niiya *et al.* (1994) en este tema, ya que propuso un algoritmo de control ad hoc para HMD's para contar las limitaciones sobre el impacto o golpe que genera la implementación de este dispositivo (G.W. Housner *et al.* 1997).

Tendón de control: técnica que, como su nombre lo dice, proporciona a la estructura fuerzas a base de tendones colocados estratégicamente y controlados por motores (figura 1.12).



Figura 1.10. Modelado de control activo e híbrido. (a) HMD. (b)AMD



Figura 1.11. Implementación del control activo. (a) experimento AMD. Dyke (1995) (b)AMD implementado en Kyobashi Sheiwa



Figura 1.12. Esquema de tendón de control activo. Datta (2003)

1.3.4 CONTROL HIBRIDO

Como su nombre lo indica, este tipo de técnica implica la combinación de control activo y pasivo. Varios autores lo ven como control semiactivo, pero es definido como una combinación de aparatos pasivos y activos, dado que operan múltiples aparatos de control. Con ello tratan de aliviar algunas restricciones y limitaciones que existen cuando sólo actúa uno; sin embargo, por lo general esto resulta más complicado. Este control reduce vibraciones en el edificio bajo vientos fuertes y sismos moderados, por lo que mejora el confort de los ocupantes del edificio.

Los principales sistemas de control híbrido se presentan a continuación:

- Sistemas híbridos de masa amortiguada (HMD): es una combinación de un TMD y un activador de control activo. Estos aparatos reducen la respuesta estructural principalmente sobre el movimiento natural del oscilador (TMD). El HMD requiere menos energía que los AMD para operar y su desempeño es similar. En la actualidad se ha reportado un gran número de publicaciones, donde se estudia la mejora a este sistema y además se ha instalado en edificios en Japón (figura 1.13).
- Aislamiento de base activo (figura 1.14): consiste en un aislamiento de base pasivo, con un actuador para separar el efecto del sistema de aislamiento de base combinada (figura 1.14). El aislamiento de base por si mismo puede reducir las distorsiones de entrepiso y la aceleración absoluta de la estructura, a cambio de grandes desplazamientos en la base. Artículos de sistemas de aislamiento de base presentados por: Nelly (1981-86), Buckle y Mayes (1999), Soung y Cosntantinous (1994), señalan que los sistemas pasivos son limitados en su habilidad para adaptarse a cambios de demandas para la reducción de la respuesta estructural (G.W. Housner *et al.* 1997).



Figura 1.13. HMD tipo V instalado en la torre Shinsuku Park en Japón



Figura 1.14. Aislamiento de base activo.

1.3.5 CONTROL SEMIACTIVO

Técnica que no puede inyectar energía mecánica al sistema estructural; pero tiene dispositivos especiales que pueden controlar el comportamiento dinámico de la estructura de manera óptima para reducir la respuesta del sistema. Es una clase de control activo que requiere energía externa, pero de magnitud muy pequeña en comparación con la activa.

Ejemplos de estos aparatos son:

Amortiguadores de fluidos con orificio variable (figura 1.15): consiste en un orificio electromecánico controlable que altera el flujo hidráulico del amortiguador. Este aparato fue estudiado posteriormente, por el Centro Nacional para la Investigación de Ingeniería Sísmica en Búfalo, N. Y. (Shinozuka en 1992, Symans en 1994, y con Constantinou y Symans en 1996).

En 1993, Sack y Patten condujeron experimentos donde se implementó un actuador hidráulico de este tipo, con una sola línea de puente para disipar la energía inducida por el tráfico de vehículos. Este experimento fue el primero que se llevo a cabo en EEUU a escala completa.

La efectividad del orificio variable ha sido demostrado por simulaciones y por experimentos a escala pequeña estudiados por investigadores como: Hrovat *et al.* (1983), Mizuno (1992), Kurata (1994), Kanagat y Kobori (1994). Estos últimos implementaron uno de estos amortiguadores a escala completa en un sistema activo de rigidez variable. Estos estudios indican que este aparato es efectivo para reducir la respuesta sísmica.



Figura 1.15 Amortiguador de orificio variable implementado en edificio Shizuoka Japón.

Aparatos de fricción controlable: varios aparatos utilizan la superficie de fricción para disipar energía (figura 1.16). Akbay y Aktan (1990-1991) y Kankan *et al.* (1995), propusieron un aparato de fricción variable que consiste en una superficie rígidamente conectada con arrostramiento estructural. La fuerza en la cara interior que fricciona fue ajustada por deslizamiento en cantidades controladas. Según Dowdell y Cherry (1994), los aparatos semiactivos reducen las distorsiones de entrepiso de una estructura que esta sometida a un sismo.



Figura 1.16 Amortiguador de fricción controlable. (a) Modelo. (b) Vista 3D

Dispositivos de rigidez variable

Amortiguadores de impacto semiactivo (figura 1.17): estos dispositivos se han utilizado para reducir vibraciones y ruido en turbinas. Masri y Yang (1973) estudiaron el desempeño de los amortiguadores de impacto ante excitaciones de sismos. Se puede afirmar que cuando están propiamente diseñados, alivianan algunas deficiencias de las

estructuras y tienen características superiores a la forma convencional de los amortiguadores pasivos. Algunos amortiguadores generan mayor reducción en la vibración que otros y para remediarlo se aplican amortiguadores de impacto según requiera el sistema.



Figura 1.17 Esquema de amortiguador de impacto (František 2003)

Amortiguador de líquido controlable – ajustable (TLC): este tipo de aparato usa una columna de fluido que permite modificar las características del dispositivo (figura 1.18). La finalidad es reducir la respuesta de una estructura. Los amortiguadores de líquido controlable se basan en pasar un fluido de un tanque a otro por un arreglo de orificios para agregar amortiguamiento al sistema. Otro sistema utilizado consiste en controlar las vibraciones del sistema por medio de una columna de líquido o fluido; esta no es muy efectiva para una amplia variedad de condiciones de carga, pero reduce la respuesta estructural según Kareem (1994) y Yeh *et al.* (1996). Lou *et al.* (1994), propone un aparato que con la longitud de la columna del fluido controla las propiedades del aparato. Y Harooun *et al.* (1994) presenta un aparato basado en TLC pero con orificio variable.



Figura 1.18 Esquema de amortiguador de liquido controlable (TLCD)

Amortiguador de fluido controlable: la ventaja de este aparato es que sólo se mueve el pistón lo cual hace a este tipo de amortiguador muy seguro. Otra característica esencial es su habilidad para cambiar reversiblemente de un fluido libre a un fluido viscoso lineal y a semisólido con una fuerza de fluencia en milisegundos. Dicha acción se lleva a cabo cuando se expone a un campo eléctrico o magnético. Los dispositivos son conocidos

como fluidos electroreológico (ER) (figura 1.19) y fluido magnetoreológico (MR) (figura 1.20 (a) y (b)), respectivamente.

Los fluidos MR consisten en micro partículas polarizadas magnéticamente y dispersadas con un cargador en medio. Tal cargador puede ser un mineral o un aceite de silicón. Cuando el campo es aplicado, el fluido llega a ser semisólido y exhibe un comportamiento similar a un ER. La transmisión de equilibrio reológico puede ser realizado en pocos milisegundos



Figura 1.19 Sección transversal del amortiguador ER. Cuprich (1998)

Investigaciones como la de Carlson y Weiss (1994), indicaron que el esfuerzo de fluencia factible de un MR fluido tiene un orden de magnitud mayor que el ER. Por otro lado, Carlson y Spencer (1996) y Spencer (1997), reportan el diseño de un dispositivo a escala completa de 20 Ton del amortiguador MR. A partir de dichos reportes se muestra que los aparatos MR son escalables para aplicaciones en ingeniería civil.



Figura 1.20 Amortiguador MR. (a) Sección transversal. (b) Dispositivo real. Dyke (2000)

1.4 DISIPACIÓN DE ENERGIA PASIVA

Todas las estructuras disipan energía ya sea por esfuerzos, fricción, agrietamiento, deformación plástica, etcétera. Los métodos para incrementar la disipación de energía son muy efectivos para reducir vibraciones y muchos de estos incrementan el amortiguamiento; con ello la respuesta de la estructura se mejora considerablemente.

Los sistemas de disipación de energía pasiva abarcan un amplio rango de materiales y aparatos para incrementar amortiguamiento, rigidez y resistencia, y pueden ser usados para mitigar desastres y para la rehabilitación. Existen avances en términos de investigación, como el desarrollo de guías de diseño e implementación, así como la presentación y discusión de publicaciones recientes.

1.5 CONTROL ESTRUCTURAL

El control estructural se define como el sistema mecánico instalado en una estructura con el fin de reducir vibraciones estructurales durante perturbaciones externas, proporcionando así mayor seguridad y habitabilidad (Lynch 2002).

Las configuraciones que se utilizan para representar el control estructural son: la clásica (Simple Input Simple Output - SISO) y la moderna (Multiple Input Multiple Output-MIMO) (Soong 1990). La primera se basa en la teoría de transformadas de Laplace, en la cual sólo existe una sola entrada y una sola salida.

Por otro lado, la configuración MIMO se basa en la representación variable de estados en términos de un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden; además, permite múltiples entradas y múltiples salidas.

1.5.1 CONTROL ESTRUCTURAL CENTRALIZADO Y DESCENTRALIZADO

El control estructural resulta efectivo para mejorar el comportamiento de las estructuras civiles. No obstante, es difícil y costoso implementar un sistema de control en estructuras muy grandes cuando se da la solución en un solo punto. Se ha intentado remediar el problema dividiéndolo en pequeños subsistemas; sin embargo, es probable que cuando existe autonomía en cada uno de los dispositivos la implementación resulte más sencilla. En base a lo anterior el control se puede clasificar en:

- Centralizado
- Parcialmente Centralizado
- Descentralizado

A continuación se presenta una definición de las clasificaciones antes mencionadas.

CONTROL CENTRALIZADO: es aquel que presenta sólo una estación que distribuye las fuerzas de reacción a cada uno de los dispositivos de control de la estructura (figura 1.21).



Figura 1.21 Esquema de control centralizado.

CONTROL PARCIALMENTE DESCENTRALIZADO: en este existen varias estaciones que distribuyen las fuerzas de reacción a los dispositivos. La distribución de la fuerzas corresponden a cada arreglo del subsistema de control de la estructura (figura 1.22).



Figura 1.22 Esquema de control parcialmente centralizado

CONTROL DECENTRALIZADO: control en el cual cada dispositivo decide qué fuerzas de reacción y en qué instante se debe aplicar a la estructura dicha fuerza (figura 1.23).



Figura 1.23 Esquema de control descentralizado

1.6 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La tesis se divide en dos partes. La primera consiste en conocer, desarrollar e implementar los modelos de control activo y semiactivo centralizados a dos estructuras. Esto permitirá llevar a cabo una comparación entre ellas. La selección de los modelos parte de estudios previos en el campo del control estructural.

La segunda parte consiste en desarrollar el algoritmo de control que permita reducir los desplazamientos de los modelos adoptados. En seguida se lleva a cabo una comparación con los modelos implementados en la primera parte. El algoritmo tiene la característica de ser descentralizado. Esto trae consigo un manejo más simple de los datos. Con ello se pretende llevar a cabo una implementación más fácil y una disminución en la energía requerida en el control estructural.

El capítulo 2 muestra las bases del control activo, pasivo y semiactivo de una manera centralizada, parcialmente descentralizada y totalmente descentralizada. Se puede observar su funcionamiento y los fundamentos que permiten llevar a cabo el modelado de este tipo de control.

En el capítulo 3 se describe de manera explícita las características de los modelos estructurales adoptados, y la implementación analítica de los mismos.

En el capítulo 4 se implementa el control activo en los modelos adoptados y se determinan las respuestas máximas.

El capítulo 5 detalla la implementación del control semiactivo centralizado y las respuestas máximas en los modelos determinados en el capítulo 3.

En el capítulo 6 se implementa el control activo parcialmente descentralizado y se obtienen las respuestas máximas de los modelos ya mencionados.

El capítulo 7 presenta la propuesta de control semiactivo completamente descentralizado y se implementa en los modelos seleccionados en el capítulo 3, con sus respectivas respuestas máximas.

Por último, en capitulo 8 se muestran las conclusiones a las cuales se llegaron a partir de comparar las respuestas máximas de los modelos seleccionados ante distintos controles. De igual manera, se describen las ventajas y desventajas de la propuesta presentada en el capitulo 7 y se proponen estudios futuros.
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS DEL CONTROL ACTIVO, PASIVO Y SEMIACTIVO.

2.1 GENERALIDADES

En este capítulo se explican los fundamentos de la teoría del control aplicado a las estructuras; es decir, se muestra la forma de representar los diferentes modelos. Los modelos representados matemáticamente son: sin control, con control pasivo, activo y semiactivo, tanto centralizado como descentralizado. Estos son aplicados a los modelos que se presentan en el capítulo 3.

En esta investigación los análisis están basados en el control moderno, el cual utiliza la representación de estados; dicha representación se definirá más adelante.

2.2 REPRESENTACIÓN DE ESTADOS

La representación de estados se basa en la solución de ecuaciones diferenciales de primer orden de la forma de la ecuación 2.1

$$\dot{z}(t) = g(z(t), u(t), t)$$
 Ec. 2.1

Donde z(t) es el vector variante en el tiempo que denota el estado del sistema, u(t) es el vector de fuerzas de entrada o de disturbios, mientras que t es el tiempo. Sin embargo, para sistemas lineales (empleados en esta investigación), dicha ecuación se reduce a un sistema lineal invariante en el tiempo de la forma de la ecuación 2.2.

$$z = Az + Bu$$
 Ec. 2.2

donde A y B son matrices constantes de dimensiones apropiadas.

La representación de estados, base del control moderno, proporciona grandes ventajas, entre ellas:

- Adaptabilidad para la simulación y cálculos.
- Extensiones directas de sistemas de entrada única, salida única a múltiples entradas y múltiples salidas.
- Fácil generalización para descripciones de sistemas más complejos, tales como sistemas con parámetros variantes en el tiempo o sistemas estocásticos.

2.3 CONTROL ESTRUCTURAL MODERNO

Existen dos configuraciones para representar el control estructural, como se mencionó en el capítulo 1. Sin embargo, para esta investigación se utiliza el control moderno conocido como MIMO. La principal ventaja son las múltiples entradas y salidas que se pueden generar con esta configuración.

El esquema básico de la configuración MIMO se presenta en la figura 2.1. Se muestra la entrada de referencia hacia un controlador, éste también recibe la información de los estados para poder determinar el control que es aplicado al sistema o planta. Finalmente, se obtienen las salidas o respuesta del sistema así como los estados que van hacia el controlador.

Matemáticamente la configuración MIMO se puede representar por medio de la solución de las ecuaciones 2.3 y 2.4.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

 $y(t) = Cx(t) + Du(t)$ Ecs. 2.3 y 2.4

donde $\dot{x}(t)$ representa los estados y y(t)es la respuesta del sistema. La matriz A representa el sistema con dimensiones de 2n x 2n, B representa las entradas con dimensiones de 2n x r, C indica las salidas requeridas en matrices de m x 2n y finalmente, D expresa las matrices de transferencia de m x r. Siendo n el número de grados de libertad (GDL), r el número de fuerzas de control y m el número de salidas.

Para fines de esta investigación, la ecuación de movimiento (Ec. 2.5) es la que define el arreglo matricial del modelo. Para ello se resuelve la ecuación de movimiento de la forma de las ecuaciones 2.3 y 2.4, obteniendo las ecuaciones 2.6 y 2.7; la primera de estas permite ver las entradas al sistema, mientras que la ecuación 2.7 define las salidas.

$$m \cdot \dot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = f(t)$$
 Ec. 2.5

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix} \cdot f(x)$$
$$\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot f(x)$$
Ecs. 2.6 y 2.7

Un sistema no lineal es similar y se presenta en las ecuaciones 2.8 y 2.9. La diferencia radica en la modificación de los estados en función del tiempo.

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)$$

 $y(t) = g(x(t), u(t), t)$
Ecs. 2.8 y 2.9

Un esquema básico de esta configuración se muestra en la figura 2.1.



Figura 2.1.- Esquema de configuración Moderna (MIMO) (Nadiu, 2003)

El objetivo del control estructural no es sólo proporcionar fuerzas a una estructura, ya que se podría afectar el comportamiento de la misma, con incrementos excesivos en los desplazamientos, velocidades o aceleraciones. La intención es proporcionar fuerzas de manera que mejore el comportamiento estructural; es decir, que se lleve a cabo un control óptimo descrito más adelante.

2.4 CONTROL ÓPTIMO LINEAL CLÁSICO

El principal objetivo de aplicar el control estructural es optimizar la respuesta de una estructura. Una manera de determinar un control óptimo es a base de cumplir ciertas condiciones. Estas se pueden medir con la efectividad del índice de desempeño definida por la ecuación 2.10. En dicha ecuación el índice es dividido en dos términos: J_1 representa la etapa inicial y terminal de la función controlada, la cual sólo depende de los intervalos de tiempo iniciales y terminales del control, y de los estados evaluados en dichos instantes, mientras que J_2 integra todo el intervalo de tiempo del control (Soong 1990).

$$J = J_1 * [x(t_0), x(t_f), t_0, t_f] + \int_{t_0}^{t_f} J_2(x, \dot{x}, u, \dot{u}, t) dt$$
 Ec. 2.10

El control óptimo pretende determinar la señal de control que provoque un proceso en el sistema para satisfacer algunas restricciones y, al mismo tiempo, se extremize (maximice o minimice) y seleccione un criterio de desempeño (índice de desempeño).

Para estudios en control estructural el índice de desempeño es usualmente cuadrático en x(t) y u(t). Se establece t_a = 0, con lo que la ecuación 2.10 se reduce a la 2.11.

$$J = \int_{0}^{t_{f}} \left[x^{T}(t) * Q * x(t) + x^{T}(t) * R * u(t) \right] dt$$
 Ec. 2.11

donde Q y R se refieren a las matrices pesadas en el proceso de minimización, las cuales tienen magnitudes asignadas de acuerdo a la importancia que existe entre los estados de las variables y a la fuerza de control respectivamente. La asignación de valores grandes en los elemento de Q indica que la reducción en la respuesta tiene prioridad sobre el control de fuerzas requeridas. Lo opuesto, es cierto cuando los valores de R son grandes en comparación con los de Q. Por lo anterior, la variación de las magnitudes relativas de Q y R, permite obtener un adecuado equilibrio entre la efectividad del control y el consumo de la energía del control (Soong 1990).

Gráficamente, el control óptimo consiste en obtener u*(t) de la figura 2.1; sin embargo no es fácil obtenerlo. La formulación del control óptimo requiere:

- La descripción del modelo matemático, es decir, el sistema a ser controlado.
- La especificación del índice de desempeño.
- Las especificaciones de condiciones de frontera y las restricciones sobre los estados y el control.

Para fines de optimización en la figura 2.1 la Planta o Sistema, se puede describir como el conjunto de ecuaciones lineales o no lineales (Ecs. 2.3 a 2.6) que representan un sistema físico; en este caso representa la estructura. El controlador es otro conjunto de funciones (Ec. 2.8) que determinan las fuerzas de control, es decir, representan los dispositivos. En esta etapa se lleva a cabo la extremización, la cual consiste en encontrar los valores óptimos del control (u(t)).

En general, el índice de desempeño para el sistema de control óptimo es conocido como cuadrático. Este problema es basado en los teoremas de Mayer y Lagrange. Por otro lado, las condiciones de frontera son las restricciones que aparecen en la situación física.

Se pueden obtener soluciones óptimas por medio del cálculo de variaciones y consisten en los siguientes pasos:

- Asumir el valor óptimo deseado al que lleva la función.
- Realizar variaciones e incrementos.
- Aplicar el teorema fundamental del cálculo de variaciones.
- Aplicar el principio de Lemma (basado en el cálculo de variaciones)
- Finalmente encontrar una ecuación diferencial llamada ecuación de Euler-Lagrange.

Entre las opciones que proporcionan las variaciones, se busca encontrar los máximos y mínimos a partir de la segunda variación. Existen métodos directos que consisten en solucionar las ecuaciones diferenciales. Sin embargo, para problemas de orden superior la solución no es muy viable.

Para obtener valores extremos óptimos, a parte del método directo se usa el método de Multiplicadores de Lagrange. Existen modificaciones de estos métodos que permiten mejorar las soluciones; una de ellas es el Halmiltoniano, que se usa para expresar funciones de costo terminal y estados de control; es decir, pueden proporcionar condiciones de frontera para puntos extremos.

Las condiciones de frontera son las restricciones que aparecen en la situación física y, en general, dichas condiciones se pueden presentar en cuatro sistemas diferentes. Estos consisten en:

- > Tiempo final fijo y sistema de estado fijo
- > Tiempo final libre y sistema de estado fijo
- > Tiempo final fijo y sistema de estado libre
- Tiempo final libre y sistema de estado libre

Los sistemas mencionados se pueden representar en la figura 2.2, en la que se muestra cada uno de los sistemas; (a) muestra la importancia para mantener un sistema con estado y tiempo fijo, (b) la importancia se le da al estado aunque podría sufrir retrasos, (c) el interés se da por el tiempo aunque se descuide el estado. Finalmente (d) permite una holgura tanto para el tiempo como para el estado.

Si la condición 2.2 (a) fuera fácil de llevar a cabo se podría usar siempre; pero resulta muy difícil conseguir esta condición por lo que se tiene que optar por permitir un cierto margen de error, ya sea para el estado, para el tiempo o en ambos; pero de manera controlada, como se muestra en 2.2 (b),(c) y (d).



Figura 2.2 Sistemas que son regidos por las condiciones de frontera. (Nadiu, 2003)

Existen varias soluciones del control estructural, entre las cuales se destacan la LQG (Linear Quadratic Gaussian) y el LQR (Linear Quadratic Regulator). El primero de ellos resulta de una combinación de la solución del filtro de Kalman y un retraso del estado completo basado en el principio de separación. Con lo que se debe dar solución a las ecuaciones 2.12 y 2.13, donde ξ y θ representan el ruido blanco del sistema y el ruido medido con una distribución Gaussiana, unidos con una función de correlación (Matlab 7.0).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \xi$$

 $y(t) = Cx(t) + Du(t) + \theta$ Ecs. 2.12 y 2.13

El segundo control óptimo es el LQR. Dicha función se describe con detalle más adelante. Además ha sido usada por varios autores con éxito, con lo que sirve de punto de referencia para este estudio.

2.5 SOLUCIÓN DEL CONTROL (LQR)

Existen diferentes funciones que permiten dar solución óptima al control; sin embargo, una de las más usadas es el LQR. Esto se debe a que esta función permite controlar tanto las variables como la energía aplicada y, por lo tanto, las fuerzas pueden ser alcanzables.

En general, el sistema estructural se puede considerar como un sistema invariante en el tiempo definido por la ecuación 2.14

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + DW(t)$$
 Ec. 2.14

En este caso el X(t) resulta ser la respuesta en términos del sistema, es decir, desplazamientos y velocidades. El sistema se calcula a menudo con algoritmos de valoración que usan medidas obtenidas de acelerómetros del sistema como entradas. Soong (1990). W(t) representan las perturbaciones dinámicas, U(t) representan las señales de control. A representa el sistema matricial y encapsulamiento del ciclo abierto de las propiedades dinámicas del sistema, ésta define la respuesta dinámica del sistema estructural. B y D representan la localización de los actuadores y las cargas externas respectivamente.

La matriz A define la estabilidad del sistema, sus valores característicos permiten observar si la respuesta dinámica es inestable o estable. Dicho de otro modo, si los valores caen del lado izquierdo del plano complejo, la respuesta es estable. Sin embargo, si caen del lado derecho se obtienen números con parte real positiva y la respuesta resulta inestable dinámicamente (ver figura 2.3).

Gráficamente, la frecuencia natural y los coeficientes de amortiguamiento permiten identificar cada modo del sistema al localizar los polos del sistema en la figura 2.3. La distancia al origen denota la frecuencia natural del modo ω_n , mientras que el seno del ángulo entre el polo del sistema y el eje imaginario indica el amortiguamiento del modo.

La intención de introducir las fuerzas es mejorar la respuesta del sistema ante disturbios externos. Como resultado del control los polos del sistema se mueven a localizaciones más deseables en el plano complejo. En general LQR es una técnica que trata de mover el polo de manera que permita regular la respuesta del control y el esfuerzo del mismo (Stegel 1994). También se puede ver como un método que proporciona una solución del control óptimo con la minimización de la función de costo, los cuales siguen los objetivos del sistema. Los objetivos de dicha función de costo (J) son, minimizar la respuesta del control de entrada U(t) para la ecuación J

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DEL CONTROL ESTRUCTURAL



Figura 2.3 Comportamiento de las soluciones del control. Polos y zeros en el espacio real e imaginario (Nadiu, 2003)

2.6 REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA SIN CONTROL

Las estructuras sin control se pueden representar matemáticamente como un filtro donde existe una entrada, dicha entrada lleva a cabo un proceso dentro del filtro y finalmente se obtiene una salida. Este proceso se puede ver como un ciclo o lazo abierto (Open-Loop). En la figura 2.4 se presenta un diagrama de este tipo; sin embargo, se presenta en términos aplicados a las estructuras. Es decir, en la sección sombreada se observa una excitación que se aplica a una estructura y finalmente se obtiene una respuesta.



Figura 2.4 Esquema de control pasivo. Ciclo abierto. (Housner, 1997)

La estructura se puede modelar como un sistema con ciertas características, como masa, rigidez y amortiguamiento, a la cual se le aplica una señal, que puede ser un sismo, y finalmente, se pueden obtener las respuestas de la estructura como desplazamientos, velocidades y aceleraciones. El arreglo de la representación de estados se define a partir de la ecuación 2.5. Esta expresión es definida como la ecuación de movimiento, en la cual se observan las fuerzas dinámicas debidas al producto de la masa, amortiguamiento y rigidez con la aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente.

2.7 REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA CON CONTROL PASIVO

La estructura con control pasivo se puede modelar del mismo modo que la estructura sin control; es decir, como ciclo o lazo abierto (Figura 2.4) y basados en la ecuación de movimiento (Ec. 2.15). Esto se debe a que no proporciona fuerzas a la estructura, sino que sólo se modifican las propiedades dinámicas para reducir fuerzas y concentrar daño en puntos estratégicos. Dicho de otro modo, el control pasivo prepara la estructura para ser dañada ante eventos extraordinarios. Este control radica en saber donde existirá daño y repararlo.

2.8 REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA CON CONTROL ACTIVO

El control activo se modela del mismo modo que una estructura con comportamiento lineal pero incluyendo fuerzas en lugares estratégicos. Dichos valores de las fuerzas se determinan a base del índice de desempeño óptimo del que se comenta en este capítulo. La modificación principal se da en la ecuación de movimiento, debido a que existe una variable más en la ecuación 2.5. Dicha variable es la fuerza aplicada al sistema, representada por u(t) en la ecuación 2.16.

$$m^*\ddot{x}+c^*\dot{x}+k^*x=f(t)+u(t)$$
 Ec. 2.15

La determinación del valor u(t) es definido por la función LQR. Por otro lado, el control activo se define como un ciclo cerrado presentado en la figura 2.5. En esta figura, se puede observar el ciclo abierto con el que se modela una estructura sin control; sin embargo, el control presenta el ciclo o lazo cerrado. La excitación es una señal adelantada registrada por un sensor que es proporcionada a un controlador. También recibe información de los sensores que registran la respuesta de la estructura, pero esta señal tiene un cierto retraso. Con la información de ambos sensores se lleva a cabo una solución óptima descrita en este capítulo y finalmente se le comunica al actuador las fuerzas que se deben aplicar a la estructura para mejorar su desempeño.



Figura 2.5 Esquema de control activo. Ciclo cerrado. (Housner, 1997)

2.9 REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA CON CONTROL SEMIACTIVO

Es sabido que el control pasivo sólo es una modificación a la estructura que cambia las características dinámicas de la misma desde su concepción. Por otro lado, el control semiactivo es uno de los controles más atractivos por la poca energía que requiere para funcionar. De hecho puede operar con baterías, lo cual es crítico durante la parte intensa de un evento sísmico, cuando la fuente de energía puede fallar. Estudios preliminares indican que los sistemas semiactivos implementados apropiadamente tienen un mejor desempeño que los pasivos y, en comparación con los activos, el mejor desempeño se da durante un amplio arreglo de condiciones de carga dinámica, según Dyke *et al.* (1996). Además, tienen el potencial para realizar la mayoría del desempeño de sistemas

Finalmente, el control semiactivo se puede ver como un control activo, pero con restricciones. Esto se debe a que sólo puede utilizar la fuerza que es proporcionada por el mismo sistema. Y, por lo tanto, se puede definir matemáticamente con la ecuación 2.16.

$$M_{s}^{*}\ddot{x}+C_{s}^{*}\dot{x}+K_{s}^{*}x=Af-M_{s}^{*}\Gamma^{*}\ddot{x}_{e}$$
 Ec. 2.16

Donde el subíndice "*s*" denota a la estructura y "*g*" al suelo, " Λ " la posición de los dispositivos y " Γ " denota todo los niveles o todas las masas. Con ello se puede definir que la respuesta de la estructura se puede modificar por las fuerzas de los dispositivos que dependen de las aceleraciones relativas.

Por otro lado, el esquema de control para la estructura con dispositivos semiactivos se presenta en la figura 2.6. En general presenta casi la misma configuración que el control activo (ciclo cerrado); sin embargo existe una etapa distinta entre los actuadores y la estructura. Esta etapa es denominada "dispositivo semiactivo" (DSA) y decide si la fuerza

es aplicada a la estructura, es decir si el dispositivo es capaz de proporcionar dicha fuerza o no. La fuerza aplicada depende de la dirección de la velocidad y de la fuerza que el dispositivo aplique.



Figura 2.6 Esquema de control semiactivo. Ciclo cerrado. (Housner, 1997)

2.10 CONCEPTO GENERAL DEL CONTROL CENTRALIZADO

El control estructural desarrollado en los últimos años presenta un buen desempeño según varios autores como Lynch (2002), Dyke (1997), Kurata (1999), entre otros. Sin embargo, dicho control ha funcionado en estructuras relativamente bajas. Se atribuye a que resulta difícil y costoso concentrar toda la información del edificio para obtener una solución óptima. Además, debe ser problemático lidiar con escenarios como el de la figura 2.7, donde resultaría complicado encontrar alguna falla en una conexión o cable dañado.



Figura 2.7 Escenario usual de adquisición de datos con control centralizado

Aparte del problema físico mostrado en la figura 2.7 se encuentra el problema teórico, el cual se muestra en la figura 2.8. Ésta muestra el modelado de una estructura con control activo, también es una forma simple de ver lo que en realidad ocurre en el control estructural.



Controlador

Figura 2.8 Diagrama de flujo para control activo. (Housner, 1997)

En el diagrama se puede observar al centro una estructura dinámica representada por una ecuación matemática. Ésta recibe fuerzas de un actuador dinámico definidas por un controlador; sin embargo este controlador necesita la respuesta de la estructura medida con un sensor dinámico.

El esquema que define el control activo parece ser simple; sin embargo en el diagrama

aparece un parámetro importante, este es el retraso $\left(\frac{1}{\varepsilon s+1}\right)$. Si observamos el diagrama,

se distinguen dos retrasos. El primero se presenta en la respuesta de la estructura; es decir, el tiempo perdido mientras el sensor mide la respuesta de la estructura y la manda al controlador. El segundo se da cuando el controlador manda la fuerza óptima hacia la estructura. Este proceso no toma en cuenta el tiempo de ejecución de la función; pero el tiempo para recopilar toda la información de una estructura muy grande, así como para enviarla a los actuadores, pueden desestabilizar el sistema.

Por otro lado, cuando existe una gran cantidad de información los recursos computacionales podrían resultar insuficientes. Hoy en día, investigadores se han dado a la tarea de solucionar estos problemas, tanto el físico como el teórico. Para el problema físico se han sustituido sensores alámbricos por inalámbricos, con lo que se evitan problemas como los de la figura 2.7. Con todo, aún se trabaja en la comunicación entre ellos así como en su capacidad de procesamiento y radio. Para los problemas teóricos, además de las mejoras computaciones se han propuesto diversos algoritmos que descentralizan las soluciones.

En capítulos posteriores de este estudio se presentará la respuesta de las estructuras con diferentes excitaciones y diferentes niveles de descentralización, comparadas con las mejores (control activo centralizado) y las no tan alentadoras (control activo descentralizado), sin olvidar la solución propuesta.

CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN DE MODELOS ADOPTADOS

3.1 GENERALIDADES

En este capítulo se describen los modelos usados en esta investigación; se mencionan las propiedades geométricas y dinámicas, así como las simplificaciones realizadas.

A partir de una búsqueda bibliográfica acerca del control estructural, se observó un amplio estudio de estructuras tanto de pequeña como de gran altura. La división de este estudio se presenta ya que para el diseño de estructuras relativamente bajas, el periodo dominante en excitaciones dinámicas, es el correspondiente a la primera forma modal. Sin embargo, para estructuras altas, el diseño es dominado por combinaciones modales. Por ello se decidió tomar dos estructuras que representarán cada una de estas.

Para la estructura de baja altura, se seleccionó la utilizada por Kurata *et al.* (1999) de cinco niveles. Esta estructura tiene implementado un sistema de control semiactivo centralizado. Por otro lado, se seleccionó el proyecto de una estructura de acero con 20 niveles para representar las estructuras altas. Esta estructura fue diseñada por la "Structural Engineers Association of California" (SAC) y ha sido utilizada por varios investigadores, entre ellos Lynch (2002).

A continuación se presentan las características de las dos estructuras utilizadas y las simplificaciones hechas en cada una de ellas.

3.2 MODELO DE CINCO NIVELES

Kurata *et al.* (1999) implementó un sistema de amortiguadores semiactivos en un edificio ubicado en Shizuoka, Japón; el cual consiste en un edificio de oficinas de cinco niveles, mostrado en la figura 3.1. Este edificio tiene 19.75 m de altura, un área de 1685.36 m² y una masa total de 1102300 Kg. Se diseñó de acuerdo a los estándares de diseño sísmico de Japón como una estructura de marcos de acero. El edificio cuenta con ocho dispositivos colocados con el arreglo de contravientos, mostrado en la figura 3.2 en los primeros cuatro niveles.

El sistema semiactivo se instaló para trabajar en la dirección transversal del edificio. La conexión entre el sistema y la estructura se hace mediante el arreglo que se muestra en la figura 3.3, y se modela como arreglo de resortes en serie.



Figura 3.1 Estructura con sistema de control semiactivo (Kurata et al. 1999)



Figura 3.2 Ubicación de los dispositivos en planta y elevación. (Kurata et al. 1999)



Figura 3.3 Instalación y modelado de dispositivo, y su conexión a partir de su configuración. (Kurata et al. 1999)

Con la finalidad de crear el modelo analítico se utilizan las propiedades reales de la estructura presentadas en la tabla 3.1. El modelo dinámico se creó como un arreglo de masas unidas con resortes en serie y un amortiguamiento equivalente mostrado en la tabla 3.1.

Propiedades del modelo analítico de 5 Niveles				
Nivel	Masa	Rigidez		
		Marco	Contraviento	Dispositivo
	(Kg.)	kN/mm	kN/mm	kN/mm
5	266100	84	-	-
4	204800	89	565x2	400x2
3	207000	99	565x2	400x2
2	209200	113	565x2	400x2
1	215200	147	565x2	400x2

Tabla 3.1 Propiedades del modelo analítico

Con las propiedades mecánicas del edificio, se elabora el modelo analítico representado por marcos planos (ver figura 3.4 (a)), y el modelo de masas, resortes y amortiguadores mostrado en la figura 3.4 (b).



Figura 3.4 Modelo estructural y su representación esquemática

A partir de las propiedades geométricas se determinan las propiedades dinámicas, como las frecuencias de vibrar, así como la consideración del amortiguamiento que se muestran en la tabla 3.2.

Modelo analítico 5 niveles				
Modos	Frecuencia Hz	Amortiguamiento %		
1	1.0087			
2	2.826			
3	4.4951	2		
4	5.8002			
5	6.777			

Tabla 3.2 Propiedades dinámicas del modelo anali	íticc
--	-------

Finalmente, para modelar el control estructural se simplifican los modelos a marcos planos con dispositivos como se muestra en la figura 3.5 (a). También se hace la simplificación de los dispositivos por fuerzas que se proporcionan al sistema en el nivel donde se encuentra el dispositivo, como se observa en la figura 3.5 (b).



Figura 3.5 Modelo con control estructural y su representación esquemática simplificada

3.3 MODELO DE 20 NIVELES

La estructura utilizada en esta investigación fue diseñada por la SAC, conforme al código actual que rige la región del sur de California. El comportamiento de estructuras de este tipo (donde no domina la primera forma modal) puede ser observado en esta estructura, es decir, se puede verificar la efectividad del control propuesto en estructuras que van de mediana a gran altura.

La estructura de 20 niveles está constituida a base de marcos de acero. Tiene 36 dispositivos colocados en las posiciones que se observan en la figura 3.6, con variaciones conforme la altura. Se instalan y modelan de la misma manera que el edificio de cinco niveles, con el arreglo mostrado en la figura 3.3.

El modelo analítico elaborado para este trabajo se fundamenta en las propiedades estructurales del edificio. Dichas propiedades se presentan en la tabla 3.3. Se destacan los niveles 1, 6, 11 y 16, donde no hay dispositivos y existen cambios considerables de rigidez.

Es importante recordar que para fines de investigación, las características de la estructura fueron limitadas a un modelo de marco de cortante, mostrado en la figura 3.7(a). El modelo dinámico se creó como un arreglo de masas unidas con resortes en serie y un amortiguamiento equivalente, mostrado en la tabla 3.4. Sin embargo, solamente se consideran deformaciones elásticas.



Figura 3.6 Estructura Benchmark y la ubicación de los dispositivos (Lynch 2002)

Tabla 3.3 Propiedades de estructura SAC de 20 Niveles					
	Estructura 20 Niveles				
Nivel	Masa	Rigidez kN/mm			Numero de
	kg	Marco	Contraviento	Dispositivo	dispositivos
1	1126000	862.07	-	-	-
2	1100000	862.07	438	400	4
3	1100000	862.07	438	400	4
4	1100000	862.07	438	400	4
5	1100000	862.07	438	400	4
6	1100000	554.17	-	-	-
7	1100000	554.17	565	400	2
8	1100000	554.17	565	400	2
9	1100000	554.17	565	400	2
10	1100000	554.17	565	400	2
11	1100000	554.17	-	-	-
12	1100000	453.51	565	400	2
13	1100000	453.51	565	400	2
14	1100000	453.51	565	400	2
15	1100000	291.23	565	400	2
16	1100000	291.23	-	-	-
17	1100000	291.23	565	400	1
18	1100000	291.23	565	400	1
19	1100000	291.23	565	400	1
20	1170000	171.7	565	400	1

onio do do a da 0.4.0.1.0.0.1.

MANUNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO

El modelo dinámico se representa por masas conectadas por resortes con un amortiguamiento equivalente, mostrado en la figura 3.7 (b). Por otro parte, para la representación de los dispositivos en el modelo simplificado de la estructura de 20 niveles mostrada en la figura 3.8 (a), se incluyen fuerzas que se aplican en las posiciones donde se encuentran los amortiguadores semiactivos, de manera que el modelo dinámico queda representado como la figura 3.8 (b).

A partir de las propiedades geométricas se determinaron las propiedades dinámicas, como las frecuencias de vibrar de cada uno de los modos. Estos datos se presentan en la tabla 3.4. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Lynch (2002) en sus primeras cinco formas modales.



Figura 3.7 Modelo sin control estructural y su representación esquemática



Figura 3.8 Modelo con control estructural y su representación esquemática

Estructura 20 niveles				
Modos	Frecuencia Hz	Amortiguamiento %		
1	0.28214			
2	0.73293			
3	1.218			
4	1.6464			
5	2.0733			
6	2.5322			
7	2.9164	-		
8	3.3851	-		
9	3.7361	-		
10	4.1214	5		
11	4.3875	, v		
12	4.7396	-		
13	4.9526	-		
14	5.4362	-		
15	5.8821	-		
16	6.1962	4		
17	6.5576	-		
18	6.9197	4		
19	7.603	4		
20	8.5019			

Tabla 3.4 Propledades dinamicas de estructura SAC de 20 niveles

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO

La determinación de los modelos es parte muy importante de esta investigación, ya que básicamente apunta hacia el objetivo de este estudio. En este caso, se comienza el estudio en una estructura sencilla, real y de baja altura. Posteriormente, se estudia una estructura más compleja. Cabe mencionar que como en toda investigación, se obvian muchos detalles que orillan a simplificar los modelos.

3.4 SISMOS UTILIZADOS

Se emplean tres sismos, los cuales son Centro (1940 NS), Taft (1952 NS) y Hachihone (1968 NS), (Lynch 2002). Dichos registros se utilizan con la finalidad de tener un punto de comparación con los modelos desarrollados y usados por otros autores. Los sismos tienen duraciones de 53, 54 y 119 segundos, respectivamente, con una paso de 0.02 segundos. Además, se llevo a cabo la normalización de los sismos a 50 m/s como lo desarrolló Kurata (1999).

También se presentan las señales de los tres sismos con las respectivas normalizaciones a 50 m/s en la figura 3.9. Note que la señal en color azul es la original mientras que la roja es la normalizada, por lo que todas las señales son mayores.



Figura 3.9 Sismos seleccionados y normalizados a una velocidad espectral de 50 m/s

3.5 DISPOSITIVOS UTILIZADOS

Existen muchos dispositivos semiactivos presentados brevemente en la introducción. Pero los aparatos que resultan más atractivos para el control estructural son los amortiguadores magnetoreológicos. Esto se debe a que el tiempo de respuesta se da en milésimas de segundo (Housner G.W *et al.* 1997).

Los amortiguadores magnetoreológicos, son dispositivos que usan fluidos magnéticos que pueden cambiar sus propiedades mediante un estímulo magnético, lo cual puede ser aprovechado para proveer una respuesta rápida en el control de vibraciones. Estos fluidos son materiales que responden a la aplicación de un campo magnético con un cambio en su comportamiento reológico. Además se forman por partículas magnetizables finamente divididas suspendidas en un líquido portador como un aceite mineral. (Cuprich 1998)

Los fluidos magnéticos se clasifican por el tamaño de sus partículas, destacan el ferrofluido con dimensiones del orden de 3 a 15 nm., y los magnetoreológicos que tienen partículas del orden de 0.05 a 8 micrones. Este último tiene muchas ventajas y por ello se aplica en los amortiguadores que llevan el mismo nombre (Cuprich 1998).

Se han desarrollado modelos a escala completa en pruebas experimentales en el Laboratorio de la Universidad de Notre Dame (ver figura 3.10), lo que muestra la adaptabilidad en problemas de ingeniería civil. Se han desarrollado dispositivos capaces de desarrollar fuerzas de hasta 20 toneladas. En la figura 1.20 del capítulo 1 se presentó el prototipo y dispositivo con dicha característica desarrollados por Lord Corporation.



Figura 3.10 Configuración de las pruebas con amortiguadores MR (Dyke et al. 1996)

En esta investigación el dispositivo usado es el conocido como "Semi-active Hydraulic Damping" (SHD), que se instala como se muestra en la figura 3.3(a) y se modela como la figura 3.3 (b). Este dispositivo pertenece a los amortiguadores de orificio variable, desarrollado por Kajima Corporation y mostrado en el capítulo 1 en la figura 1.15.

Se decide utilizar las propiedades de este amortiguador ya que existen aplicaciones de estos dispositivos. Las propiedades de los dispositivos se presentan en la tabla 3.5. Dichas especificaciones son los valores que restringen las fuerzas de amortiguamiento que se pueden proporcionar al sistema. Sin embargo, la rapidez de respuesta de los dispositivos magnetoreológicos proporciona otras ventajas.

Los valores mostrados en la tabla, corresponden a las especificaciones de un solo dispositivo. Esto significa que para cada nivel los valores de fuerzas de amortiguamiento posibles se multiplican por el número de aparatos en cada nivel.

DISPOSITIVOS (SHM)			
Máxima fuerza de Amortiguamiento	1000 kN		
Fuerza de relevación	800-900 kN		
Máxima presión	30 Mpa		
Máximo desplazamiento	+-60mm		
Rigidez (con arreglo)	>400 kN/mm		
Máximo coeficiente de amortiguamiento	>200 kN*sec/mm		
Mínimo coeficiente de amortiguamiento	< 1kNsec/mm		
Máxima velocidad	250mm/sec		
Diámetro	390 mm		
Peso	1300 kg		

Tabla 3.5 Especificaciones de los dispositivos SHM

CAPÍTULO 4 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO

4.1 GENERALIDADES

El control estructural descrito en el capítulo 2 es una forma viable de cuidar el comportamiento de una estructura ante eventos sísmicos; sin embargo, para tener un punto de referencia se llevó a cabo la determinación de los modelos mencionados en el capítulo 3 sin control alguno. En este capítulo se presenta el modelado de las estructuras sin control, con control pasivo y con control activo centralizado. También se muestran las respuestas de cada uno de los modelos.

Cabe mencionar que el modelado de estas estructuras se lleva a cabo por medio de la representación de estados presentada en el capítulo 2 y se implementó con la ayuda del Simulink, que es una herramienta de Matlab para llevar a acabo la solución de las ecuaciones de estado.

4.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SIN CONTROL

Las estructuras se pueden representar por un ciclo abierto y modelado por estados, en donde a un sistema se le aplica una señal, se resuelve y se obtiene una respuesta, como se muestra en la figura 4.1. Se observa la entrada del sismo, una ganancia que hace una conversión de unidades, y posteriormente se encuentra el sistema donde se definen las matrices A, B, C Y D, es decir, donde se definen las propiedades de la estructura (A), las entradas (B), las salidas que debe obtener (C) y finalmente las matrices de transferencia (D). Por ultimo, se encuentran las salidas definidas en el sistema, que para fines de esta investigación son los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de cada GDL.



Figura 4.1 Modelo para estructura sin control estructural.

Resulta difícil almacenar todos los datos resultantes de la simulación, por lo que se decidió obtener sólo aquellos valores más representativos, como los son desplazamientos, velocidades y aceleraciones máximos. Y, con una función simple, también se obtienen los desplazamientos de entrepiso máximos. Estos últimos son utilizados como medidas de daño estructural y como parámetros de diseño en el método conocido como "diseño por desempeño". Otro parámetro importante es la cantidad de fuerza aplicada al sistema por parte de los dispositivos; sin embargo en el modelo sin control y en el control pasivo, las fuerzas aplicadas son inexistentes.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 4: CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO.

En la figura 4.2 se presentan los valores representativos máximos de la estructura de cinco niveles, sin control, para los registros del Centro (C), Taft (T) y Hachihone (H), respectivamente. Se observan diferencias en los parámetros comparados en los tres sismos utilizados, a pesar de escalarlos a una misma velocidad (50 m/s), como se indicó en el capítulo 3. Se puede ver que la mayor demanda se debe a los sismos del Centro y Hachihone. También se observa que como no existe control alguno, las fuerzas aplicadas al sistema son nulas.



Figura 4.2 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepiso y fuerzas máximos de la estructura de 5 niveles ante los 3 sismos seleccionados.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 4: CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO.

No sólo se midió la respuesta con la estructura de cinco niveles si no que se hizo lo propio con la estructura de 20 niveles tal como se presentó en el capítulo 3. La figura 4.3 muestra el comportamiento de la estructura de 20 niveles ante los tres registros. Se observa que la mayor demanda es producida por el registro Taft y difiere de la respuesta obtenida con la estructura de cinco niveles. A partir de esta observación se puede destacar la importancia de implementar el control en estructuras con diferentes características, es decir, en estructuras bajas y altas. Los cambios de rigidez de la estructura en ciertos pisos se manifiestan en los desplazamientos de entrepiso mostrados en la figura. Finalmente, las fuerzas aplicadas al sistema son nulas debido a que no existe control.



Figura 4.3 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepiso y fuerzas máximos de la estructura de 20 niveles ante los tres sismos seleccionados

Los modelos de las estructuras son desarrollados matricialmente y se presentan de la siguiente manera:

- Se definen las rigideces para los modelos de 5 y 20 Grados de Libertad (GDL).
- Se definen las masas para dichos modelos.
- Se calcula el amortiguamiento proporcional.
- Se arman las matrices A, B, C y D.
- Se aplica el sismo y se lleva a cabo la simulación.

4.3 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL PASIVO

Por otro lado, se elabora el modelo de las estructuras con control pasivo; éste consiste sólo en la inclusión de contravientos. Las matrices se desarrollaron con la finalidad de incluir posteriormente los dispositivos en el sistema. Por esta razón, se consideró un mayor número de GDL que el número de masas. Cada dispositivo se toma como un nuevo GDL. Por lo anterior, la estructura de cinco niveles se modeló como un sistema de nueve GDL, mientras que la de 20 niveles se definió como un sistema de 36 GDL. Sin embargo, el modelo es representado como la figura 4.1

Finalmente, las dimensiones de las matrices resultaron de la manera que se muestra en la tabla 4.1 para cada uno de los modelos seleccionados. Cabe mencionar que en este modelo se toma en cuenta la ubicación de los contravientos, así como las propiedades que le proporciona a la estructura.

MATRIZ	MODELO 9 GDL	MODELO 36 GDL
A	18x18	72x72
В	18x5	72x17
С	27x18	108x72
D	27x5	108x17

TABLA 4.1 Dimensiones de las matrices para cada modelo

En la figura 4.4 se presenta la respuesta de la estructura de cinco niveles con control pasivo ante los registros de estudio. Se destaca la notable mejoría en desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso; aunque la aceleración aumentó. Esto se debe al incremento de rigidez. Sin duda la mayor demanda es propiciada por el registro del Centro, debido a las características del registro y de la estructura. Al igual que en la estructura sin control las fuerzas máximas son nulas, ya que sólo se modifica la estructura para mejorar su comportamiento dinámico. Cabe mencionar que este estudio está acotado sólo a comportamiento lineal y no se observan todas las ventajas del control pasivo; sin embargo se presentan las mismas condiciones para todos los modelos.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 4: CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO.



Figura 4.4 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepiso y fuerzas máximos de la estructura con control pasivo de cinco niveles ante los tres sismos seleccionados.

La figura 4.5 presenta la respuesta de la estructura de 20 niveles con control pasivo, es decir, sólo se modifican sus propiedades para mejorar su comportamiento dinámico. Se revelan las reducciones en los desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso considerables. Los cambios de rigidez se contrastan en la gráfica de desplazamientos de entrepiso. Las aceleraciones son atenuadas en los pisos superiores, sin embargo en el primer nivel existe un incremento de aceleración significativo, que quizá pueda generar un "piso débil", por ende, se tendría que cuidar el diseño en estos puntos críticos.

El patrón de comportamiento de la estructura ante los tres registros, resulta similar a pesar de que se observó una gran diferencia en la estructura de cinco niveles. Existen variaciones, pero se distinguen puntos importantes como los desplazamientos de entrepiso que podrían concentrar el daño estructural en algunos niveles.





4.4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CON CONTROL ACTIVO

El control estructural responde a las demandas de estabilidad y seguridad, tanto de las estructuras como de los contenidos, por parte de la sociedad. Así que en respuesta a esas demandas se implementa el control activo. Éste consiste en aplicar fuerzas determinadas por medio de una función LQR, tal como está descrito en el Capítulo 2.

Dicho control trata de minimizar alguno de los parámetros con una cierta fuerza controlada. En este caso, las fuerzas son determinadas por la importancia del control de los desplazamientos y de las velocidades. Al igual se determinan en base al valor dado por el parámetro "R", presentado más adelante.

El modelo del control activo desarrollado se muestra en la figura 4.6. Este control se modela básicamente del mismo modo que la estructura sin control. La principal diferencia radica en que existe la entrada de fuerzas determinadas por la función LQR. Dichas fuerzas dependen de la minimización de desplazamientos y velocidades; no obstante la influencia de los desplazamientos es casi nula, como menciona Kurata (1999). Por esta razón, la aportación de la ganancia debida a la minimización de desplazamientos se propone nula.

Por otro lado, la función LQR se lleva a cabo con la sintaxis de la ecuación 4.1.

$$[K,S,e] = lqr(A,B,Q,R)$$
 Ec. 4.1

Donde, *K* es el valor de la ganancia que se asigna a cada uno de los GDL y que es la fuerza asignada al sistema, *S* es la solución de la ecuación de Ricatti, *e* representa los eigenvalores del ciclo cerrado, A es la matriz que representa la estructura del mismo modo que en la representación de estados, B es la matriz que señala la ubicación de los dispositivos de manera matricial, Q es la matriz que permite representar la importancia de las entradas en desplazamientos y velocidades y R es la matriz que proporciona la cantidad de fuerza disponible para el sistema.

El modelado de este control estructural se realiza con la representación de estados, de la misma manera que en el modelo sin control; es decir, las matrices A, B, C y D, tienen las mismas dimensiones que se presentan en la tabla 4.1. El efecto del control activo se presenta en la solución de la función LQR, debido a que requiere las matrices A, B, Q y R. Dichas matrices tienen las dimensiones mostradas en la tabla 4.2.

Matrices necesarias para la función LQR				
MATRIZ MODELO 9 GDL MODELO 36 GI				
A	18x18	72x72		
В	18x5	72x17		
Q	18x18	72x72		
R	4x4	16x16		

TABLA 4.2 Dimensiones de las matrices necesarias para LQR para cada modelo

Finalmente, a partir de estas entradas se pueden obtener: las ganancias (K), soluciones a la ecuación de Ricatti (S) y los eigenvalores (e) de forma matricial. A partir de estas salidas se determinan las fuerzas óptimas, basadas en K. En la tabla 4.3 se presentan todas las dimensiones de las matrices de salidas.

Matrices obtenidas de la función LQR				
MATRIZ	MODELO 9 GDL	MODELO 36 GDL		
К	4x18	16x72		
S	18x18	72x72		
e	18x1	72x1		

TABLA 4.3 Dimensiones de las matrices obtenidas del LQR para cada modelo



Figura 4.6 Esquema básico de control activo centralizado.

A partir de las investigaciones realizadas por Kurata *et al.* (1999) se implementó el control activo con diferentes valores de "R", pero con valores constante de Q. Se compara la efectividad del control activo versus el comportamiento de la estructura sin control y la del control pasivo. Se logró determinar que para un mejor desempeño se necesitan fuerzas mayores. Éstas se pueden proporcionar reduciendo el peso de la matriz R. Cabe mencionar que para un valor muy pequeño no existe solución óptima y se desestabiliza el sistema. Además, resultaría difícil proporcionar fuerzas muy grandes en estructuras reales.

En la figura 4.7 se muestra el comportamiento de la estructura de cinco niveles ante el sismo del Centro con tres diferentes pesos de R. Los valores para la matriz R son $r = \{0.1 \quad 0.03 \quad 0.01\}$ (ver ecuación 4.2) presentados de menor a mayor fuerza aplicada a la estructura. También se muestra que la aportación de la ganancia debida a la minimización de desplazamientos es nula (ver ecuación 4.3).

$$R = [I_{4x4}]^* r$$
 Ec. 4.2

$$Q = \begin{bmatrix} 0_{9x9} & 0_{9x9} \\ 0_{9x9} & I_{9x9} \end{bmatrix}$$
 Ec 4.3

Se distingue la respuesta de la estructura sin control, así como con control pasivo. También se observa un mejor comportamiento de la estructura con control con los tres diferentes pesos de R para desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso. Las aceleraciones en los niveles inferiores se incrementan de manera considerable. Además se observan las fuerzas máximas aplicadas al sistema con diferentes valores de R.



Figura 4.7 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones fuerzas y desplazamientos de entrepisos máximos, debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01

En la figura 4.8 se presentan las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura durante el sismo, lo cual se puede ver como una medida de disipación de energía. Las fuerzas son medidas para los tres diferentes pesos de R y se resalta la cantidad de energía aplicada en los primeros 15 segundos. Es decir, responde de manera adecuada a las demandas sísmicas. También es notable el incremento de fuerzas conforme el valor de R disminuye y, como se observa en la figura 4.7, la estructura obtiene una mejor respuesta.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 4: CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO.



Figura 4.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01

Se lleva a cabo el mismo procedimiento para la estructura con los sismos Taft y Hachihone en las figura 4.10, 4.11 y 4.12, respectivamente.



Figura 4.9 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas, debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01

En la figura 4.9 se observa que hay mejoras realizadas a base del control activo centralizado y que las fuerzas máximas se incrementan. Por otro lado, en la figura 4.10 las demandas de energía se incrementan respecto al sismo del Centro; aunque el comportamiento sigue la misma tendencia que el anterior.

MUNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 4: CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO.



Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01

La figura 4.11 muestra la respuesta de la estructura ante el registro del Hachi-NS. El comportamiento de la estructura continúa con la misma tendencia. Mejoran desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso, pero se incrementan las aceleraciones en niveles inferiores.

En la figura 4.12 se puede observar la misma tendencia mostrada anteriormente. Esta gráfica también permite observar los efectos de las partes más intensas del sismo. Se puede ver que cuando la pendiente es pequeña existen movimientos ligeros y que cuando existen sacudidas intensas la pendiente de la acumulación de fuerzas se incrementa considerablemente, lo cual se puede verificar al observar las zonas críticas de los sismos de la figura 3.9.
En resumen, la reducción en desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso son cuantiosos; sin embargo las aceleraciones se incrementan ampliamente. Se observa una mejoría en las respuestas, pero cabe mencionar que las fuerzas aplicadas consumen una gran cantidad de energía y resulta difícil suministrar tales cantidades. Con lo anterior se puede afirmar que el control activo centralizado aplicado en estructuras bajas (estructura de cinco niveles) ayuda a disminuir el daño estructural, así como a mejorar el confort debido a que también reduce velocidades, aunque las demandas de diseño se pueden ver afectadas.



Figura 4.11 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas, debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01, con control pasivo y sin control

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 4: CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO.



Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01

A continuación, se verifica el comportamiento de las estructuras altas. Se llevó a cabo el mismo procedimiento para la estructura de 20 niveles. Se compara el comportamiento de esta estructura ante los tres registros con variaciones en la matriz pesada R. Debido a que es una estructura de mayor altura se necesitan valores menores de R para poder aplicar más energía al sistema. Los valores propuestos son $r = \{0.1 \ 0.03 \ 0.01 \ 0.005\}$ (ver ecuación 4.4). En este modelo tampoco se toma en cuenta la minimización de los desplazamientos, por lo que Q para la estructura de 20 niveles es la ecuación 4.5.

$$R = [I_{16x16}] * r$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0_{36x36} & 0_{36x36} \\ 0_{36x36} & I_{36x36} \end{bmatrix}$$
Ec. 4.4
Ec. 4.5

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 4: CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO.

En la figura 4.13 se presenta la respuesta de la estructura de 20 niveles ante el registro del Centro. Se observa la notable mejoría en desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso de la estructura con control pasivo respecto a la estructura sin control alguno. Las aceleraciones y los desplazamientos de entrepiso se ven marcados por los cambios de rigidez en los diferentes niveles. Además se destaca la mejoría del control activo conforme la energía aplicada al sistema incrementa (disminución de R). Los incrementos de aceleraciones son considerables en ciertos niveles donde existen dispositivos de control. Dichas aceleraciones toman un papel muy importante en el diseño estructural y la no consideración de estos podría causar problemas como el colapso.



Figura 4.13 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas en la estructura de 20 niveles, debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005, con control pasivo y sin control.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 4: CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO.

La figura 4.14 presenta las fuerzas acumuladas que se aplican a la estructura durante el sismo, es decir, las fuerzas que dependen del valor de R. Las fuerzas aplicadas en la estructura de 20 niveles son mucho más grandes que las de la estructura baja, del orden de diez veces más. El comportamiento de la aplicación de fuerzas a la estructura de 20 niveles sigue la misma forma que se observó en la de cinco niveles; así, es posible afirmar que la aplicación de fuerzas con la función LQR depende de la demanda, es decir, de la intensidad del sismo.



Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005

La figura 4.15 presenta la respuesta de la estructura de 20 niveles ante el registro Taft-NS. Se observan reducciones en desplazamiento, velocidades y desplazamiento de entrepiso, pero no tan significativas como con el registro del Centro-NS. Las mejoras se presentan principalmente en los pisos superiores, mientras que en los pisos inferiores el comportamiento resulta muy similar para los distintos niveles de control. Las fuerzas máximas requeridas para los distintos niveles de control se incrementan de manera notoria. Lo que significaría necesitar grandes cantidades de energía, lo cual quizá, sería imposible de proporcionar. Mientras tanto en la figura 4.16 se presentan las fuerzas acumuladas que se aplican a la estructura durante el sismo. Se muestra el mismo comportamiento que el de cinco niveles, pero con magnitudes superiores.

La figura 4.17 presenta la respuesta de la estructura de 20 niveles para el sismo Hachi-NS, con el mismo comportamiento; sin embargo, contrario al sismo Taft-NS, el comportamiento se mejora de manera significativa. Se reducen los desplazamientos velocidades y desplazamientos de entrepiso, con incrementos en las aceleraciones. También se observan incrementos importantes donde se presentan cambios de rigidez. Además existen puntos críticos en las zonas donde no hay dispositivos.

Finalmente en la figura 4.18 se presenta la energía acumulada aplicada al sistema ante el sismo Hachi-NS, con un comportamiento similar a los otros mencionados.



Figura 4.15 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas, debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005



Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01y 0.005

En resumen, la implementación del control activo centralizado trae consigo la reducción de los desplazamientos lo cual permite disminuir las distorsiones de entrepiso y, por ende, el daño estructural se ve reducido de manera importante según el diseño por desempeño estudiado en los últimos años. Al igual, es notorio que las velocidades también se ven reducidas, por tanto, es posible tener un buen control de los contenidos. Lo anterior representa otra ventaja del control activo centralizado.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 4: CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO.



Figura 4.17 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas, debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005

Cabe señalar que las aceleraciones se incrementan de manera considerable, principalmente en los niveles donde hay dispositivos instalados. De alguna manera, esto resulta obvio, ya que en cierto modo, la estructura se hace rígida cuando el dispositivo proporciona fuerzas.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 4: CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO.



Figura 4.18 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005

Una desventaja que presenta este tipo de control es que la cantidad de energía que se aplica al sistema es muy grande y, resulta difícil proporcionarla. Además, sería muy peligroso, ya que si fallara en algún instante, se podría desestabilizar el sistema por completo y se provocaría el colapso.

CAPÍTULO 5 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CON CONTROL SEMIACTIVO

5.1 GENERALIDADES

El costo de instalación y mantenimiento del control activo despertó la necesidad de considerar el control semiactivo. Y los problemas de escalamiento estimularon la idea de la descentralización. El comportamiento de una estructura con control activo responde de manera adecuada a los requerimientos de seguridad y confort; sin embargo, el mantenimiento y los requerimientos de energía para estabilizar el sistema resultan muy costosos; además de que puede tener problemas de comportamiento si llega a desestabilizarse. En este capitulo se presenta la implementación del control semiactivo centralizado para las dos estructuras y se compara con las respuestas obtenidas con el control activo, para valores similares de R ante los tres diferentes registros de sismo.

5.2 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL SEMIACTIVO

Algunos autores, como Dyke (2000), presentan un esquema de control semiactivo, en el cual plantean la solución óptima denominada "Clipped optimal". La solución se basa en transformadas de Laplace con variaciones de los métodos de síntesis, como H_2/LQG , que son estrategias dirigidas a problemas estocásticos con aplicaciones idóneas en el control estructural en ingeniería civil.

La implementación de este sistema de control estructural se lleva a cabo del mismo modo que el modelo de control activo; es decir, el control semiactivo es el control determinado por la función LQR sólo si la estructura está capacitada para proporcionar dicha fuerza, por lo que ahora depende de parámetros como la velocidad de cada nivel y la fuerza óptima. La manera de modelarlo igual; en otras palabras, las matrices tienen las mismas dimensiones para ambas estructuras.

La figura 5.1 describe el esquema básico de control semiactivo centralizado, el cual es similar al activo centralizado. La diferencia radica en restringir la aplicación de fuerzas. Esta etapa se lleva a cabo en el subsistema denominado "sistema semiactivo" (ver figura 5.2).



Figura 5.1 Esquema básico de control semiactivo centralizado

En el subsistema entran las fuerzas óptimas obtenidas de la función LQR y las velocidades relativas del nivel donde se encuentra cada dispositivo. Con dicha información se determina la fuerza permitida aplicada al sistema por medio de una función que cumple con las restricciones que propone Kurata y, que se presentan más adelante. Sólo se aplican las fuerzas que son limitadas por el control semiactivo. Las restricciones para aplicar las fuerzas de control son propias de sistema semiactivo



Figura 5.2 Subsistema "Control semiactivo" para edificio de 20 niveles

En este estudio se plantea el uso de la función LQR tal como lo hace Kurata *et al.* (1999). Se proporcionan fuerzas óptimas al sistema sólo si esto es posible; es decir, si la fuerza que es deseable para el sistema puede ser proporcionada por el dispositivo se aplica y si no la fuerza es nula. En general, la función cumple las condiciones propuestas por Kurata (1999) presentadas en las ecuaciones 5.1 a 5.4.

$$f_{vi} = \begin{cases} f_{\max} \times sign(v_i) \to u_i \times v_i > 0, |u_i| > f_{\max} \\ c_{\max} \times v_i \to u_i \times v_i > 0, |u_i/v_i| > c_{\max}, |u_i| \le f_{\max} \\ c_i(t) \times v_i = u_i \to u_i \times v_i > 0, |u_i/v_i| > c_{\max}, |u_i| \le f_{\max} \\ 0 \to u_i \times v_i < 0 \end{cases}$$
 Ecs. 5.1 a 5.4

donde u_i es la fuerza de amortiguamiento calculada por la función LQR, v_i es la velocidad relativa de entrepiso, f_{max} es el valor máximo de la fuerza que puede proporcionar y c_{max} es el valor máximo del coeficiente de amortiguamiento.

La ecuación 5.1 define la posibilidad de aplicar alguna fuerza y no exceder la capacidad máxima que el dispositivo puede ejercer. La 5.2 permite asignar una fuerza en función de la velocidad después de saber que el valor de la fuerza es menor al máximo. La ecuación 5.3 limita la fuerza de amortiguamiento máxima que se puede aplicar al sistema. Finalmente la ecuación 5.4 define la facultad de restringir las fuerzas aplicadas.

A continuación se presenta la comparación entre el comportamiento de las dos estructuras para control activo y semiactivo centralizado, con lo cual se puede averiguar la efectividad de este último. Como se observó en el capítulo anterior, el control activo presenta un buen desempeño; sin embargo para fines comparativos sólo se estudian los casos con valores $r = \{0.03\}$ para la estructura de cinco niveles, ya que las mejoras no son muy significativas con respecto a $r = \{0.01\}$. Además, resulta más difícil proporcionar las fuerzas requeridas con $r = \{0.01\}$. Por otro lado, para la estructura de 20 niveles el valor utilizado es $r = \{0.01\}$. La decisión de comparar las respuesta de la estructura con $r = \{0.01\}$ se toma debido a las exigencias máximas del control, es decir, que las fuerzas que se necesita aplicar no sean imposibles de suministrar.

La figura 5.3 presenta la respuesta de la estructura de cinco niveles sin control, con control pasivo, control activo centralizado y con control semiactivo centralizado, para el registro del Centro-NS. La respuesta obtenida para el control semiactivo resulta menos efectiva que el control activo y el costo de energía necesaria es mínimo. Los desplazamientos y las velocidades se reducen de manera considerable, y la respuesta del control semiactivo es cercana al activo. Las aceleraciones se incrementan pero son menores a las del control activo. Los desplazamientos de entrepiso se reducen significativamente y las fuerzas máximas están restringidas por su capacidad.



Figura 5.3 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Control Semiactivo.Centro-NS. R de 0.03

La figura 5.4 presenta las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de cinco niveles con control activo y semiactivo, ambos con $r = \{0.03\}$, para el registro Centro-NS. Se distingue que la fuerza del control semiactivo aplicada al sistema es menor al control activo; esto se debe a que en muchas ocasiones no se puede aplicar fuerzas óptimas. En esta simulación se observa que el control semiactivo puede aplicar casi el 70% de la fuerza activa a la estructura. Además sigue la misma tendencia de aplicar fuerzas mayores en las etapas mas intensas.



Figura 5.4 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Centro-NS R de 0.03

La figura inmediata posterior (5.5), presenta la respuesta de la estructura de cinco niveles ante el registro Taft-NS. La estructura tiene una respuesta menor que con el registro anterior; pero las aceleraciones no se disparan tanto. De igual forma, los desplazamientos son reducidos y las fuerzas máximas se incrementan sin exceder la capacidad de los dispositivos.



Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de cinco niveles con control semiactivo ante el registro Taft-NS con R de 0.03

En la figura 5.6 se presenta el comportamiento de las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de cinco niveles ante el registro Taft-NS. Se observa que más del 70% de las fuerzas que aplicaría el control activo pueden ser proporcionadas por el control semiactivo. A partir de ello, se puede ver su efectividad sin tener que proporcionar grandes cantidades de energía.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 5: CONTROL SEMIACTIVO.



Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Taft-NS R de 0.03

La figura 5.7 muestra la respuesta estructural del modelo de cinco niveles ante el registro Hachi-NS. La respuesta estructural se ve favorecida y las aceleraciones se controlan un poco más que el control activo. Para este registro la respuesta del sistema con ambos controles resulta muy similar.



Figura 5.7 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Control Semiactivo. Hachi-NS. R de 0.03

Finalmente para la estructura de cinco niveles, la figura 5.8 presenta las fuerzas acumuladas para el registro Hachi-NS, el cual denota un comportamiento similar al de los dos últimos registros.



Figura 5.8 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Hachi-NS R de 0.03

En resumen, con el modelado llevado a cabo se puede observar la efectividad del control semiactivo con respecto al control activo para la estructura de cinco niveles. Esto se debe a que más del 70% de la fuerza acumulada proporcionada por el control activo se puede inyectar por medio del control semiactivo. Las optimizaciones dependen del sismo que se le aplique a la estructura.

Las mejoras se dan principalmente en desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso. La respuesta del control semiactivo se asemeja más al control activo para el sismo Hachi-NS. Sin embargo, en los otros dos registros las mejoras también son aceptables.

Por otro lado, se intenta identificar el comportamiento de las estructuras altas y se elabora el modelo con control semiactivo centralizado para la estructura de 20 niveles. Como se mencionó, se lleva a cabo con un valor de $r = \{0.01\}$ por los incrementos en la energía requerida por el sistema.

En las figuras 5.9, 5.11 y 5.13 se comparan las respuestas máximas de la estructura de 20 niveles ante los registros del Centro, Taft y Hachi, respectivamente. Se observa que la respuesta obtenida con el control semiactivo centralizado es parecida a la lograda con el control activo; pero no lo suficiente.

Por otro lado, en las figuras 5.10, 5.12 y 5.14 se comparan las fuerzas acumuladas que se aplican en el control activo y semiactivo centralizado con un valor de $r = \{0.01\}$ para los sismos del Centro-NS, Taft-NS y Hachi-NS, respectivamente.

En la figura 5.9 se pueden identificar las mejoras en la respuesta estructural con la implementación del control semiactivo, con reducción en desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso. Además las aceleraciones no se disparan como con el control activo; de hecho, se suavizan. Y las fuerzas máximas son las que pueden aportar los dispositivos al sistema.



Figura 5.9 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Estructura de 20 Niveles. Centro-NS. R=0.01

La figura 5.10 muestra las fuerzas acumuladas aplicadas al sistema durante el registro Centro–NS. Se observa que la energía aplicada al sistema con control semiactivo (curva verde) apenas alcanza la mitad del control activo (curva azul) y por lo tanto, la mejora en la respuesta mostrada en la figura 5.9 resulta poco perceptible.



Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Centro-NS R=0.01

La figura 5.11 presenta la comparación de la respuesta del control activo y semiactivo, ambos centralizados, para la estructura de 20 niveles ante el registro Taft-NS. La respuesta es similar a la obtenida con el sismo del Centro. Las mejoras son menores; pero constantes.



Figura 5.11 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Estructura de 20 Niveles. Taft-NS. R=0.01

La figura 5.12 muestra, la comparación de las fuerzas acumuladas para la estructura de 20 niveles con control activo y semiactivo aplicado durante el registro Taft–NS. Las fuerzas que requiere proporcionar el control semiactivo apenas alcanzan el 50 % de las que demanda el control activo, de manera similar a lo que ocurrió con el registro anterior.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 5: CONTROL SEMIACTIVO.



Figura 5.12 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Taft-NS R=0.01

Finalmente, la figura 5.13 presenta la respuesta de la estructura de 20 niveles ante el registro Hachi-NS. La mejora no es tan significativa como para alcanzar los valores del control activo (curva roja), a pesar de que presenta mejoras en relación con el control pasivo (curva magenta).



Figura 5.13 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Estructura de 20 Niveles. Hachi-NS. R=0.01

Las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles se muestran en la figura 5.14. Se observa que las fuerzas aplicadas por el control semiactivo apenas alcanzan la mitad de las que proporciona el control activo. Es por ello que las mejoras no alcanzan la respuesta del control activo.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 5: CONTROL SEMIACTIVO.



Figura 5.14 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Hachi-NS R=0.01

En resumen, el control semiactivo mejora la respuesta estructural de las estructuras altas. Las fuerzas acumuladas proporcionadas por el control semiactivo para estructuras altas apenas alcanzan el 50% de las que se proporcionarían por el control activo, razón por la cual la respuesta no alcanza los valores del control activo.

El control semiactivo, tanto para estructuras bajas (cinco niveles) como para altas (20 niveles), permite mejorar la respuesta; es decir, reduce desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso. Las mejorías en la respuesta son más marcadas en la estructura de cinco niveles. Esto se puede atribuir a que las fuerzas acumuladas que puede proporcionar el control semiactivo en la estructura baja son más cercanas a las que puede aportar el control activo que en las estructuras altas.

CAPÍTULO 6 DETERMINACIÓN, JUSTIFICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ACTIVO DESCENTRALIZADO PARCIALMENTE

6.1 GENERALIDADES

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el control centralizado resulta efectivo, pero es muy difícil de implementar en estructuras reales por problemas como la transmisión y procesamiento de información. A partir de este hecho surge la idea de la descentralización. Pareciera ser que si se divide el problema de control estructural con mucha información, en pequeños problemas con poca información se podría dar solución al problema de escalamiento del control estructural. Talvez la solución no sería óptima, pero se deberían obtener mejorías notables.

En este capitulo se presenta la respuesta estructural del control activo con diferentes niveles de descentralización para los tres diferentes registros. Esta acción se lleva a cabo para un mismo valor de r. Además, resulta interesante ver el comportamiento del control totalmente descentralizado y ver su posible implementación.

6.2 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ACTIVO PARCIALMENTE DESCENTRALIZADO

El control activo pretende dar una solución óptima a un sistema global, pero si no se tiene la información suficiente resulta imposible lograrlo. El modelado de una estructura con control parcialmente descentralizado se puede plantear como sistemas independientes a los que sólo llega la información disponible. Este tema se ha desarrollado por investigadores como Lynch, quien pretende aplicar esta metodología en diversas estructuras con la ayuda de sensores inalámbricos y algoritmos desarrollados por el mismo (basados en las leyes del mercado oferta -demanda).

En esta investigación se ha propuesto un modelo para simular dicha acción. En la figura 6.1 se presenta el modelado general de la estructura de cinco niveles. Se distingue el modelo general de la estructura con la entrada para la aplicación de las fuerzas. Dichas fuerzas son obtenidas a partir de la solución de la función LQR que se obtiene dentro de cada "agente" (mostrado en diferentes colores).

Un "agente" es un subsistema que interconecta toda la información del sistema y permite obtener la fuerza de los dispositivos, ya que dentro de cada agente se obtiene una solución óptima. En la figura 6.1 se muestra que cada "agente" recibe toda la información de todos los dispositivos; además de que se decide la intercomunicación entre ellos. En la figura 6.2 se presenta el interior de cada agente, en el cual entra toda la información. Cabe mencionar que la matriz de ganancia permite restringir dicha comunicación; por tanto, con la información permitida se obtiene la solución óptima por medio de la función LQR y se logra una fuerza del "agente", la cual es aplicada a la estructura.

Con este modelo se optó por revisar el comportamiento de diferentes niveles de descentralización; sin embargo, en este caso, por las dimensiones de la estructura, sólo

se llevan a cabo tres distintas restricciones o formas de comunicación. Dichas restricciones se mencionan como C1, C2 y C3 (ver figura 6.3).

C1 representa la comunicación entre todos los niveles y, por lo tanto se obtiene la misma respuesta que el control activo centralizado (figura 6.3 (a)). C2 representa la formación de dos subsistemas, el primero por los niveles 1 y 2, y el segundo por los niveles 3, 4 y 5 (figura 6.3 (b)). Finalmente C3 representa la formación de cuatro subsistemas donde cada uno toma su propia decisión; es decir, son completamente descentralizado (figura 6.3 (c)).



Figura 6.1 Modelo con control activo descentralizado (cinco niveles)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 6: CONTROL DESCENTRALIZADO



Figura 6.2 Agente del control descentralizado de cada dispositivo No 4 (5 niveles)



Figura 6.3 Niveles de descentralización

En este capítulo se presentan las comparaciones de las respuestas de la estructura de cinco niveles, con la de peor comportamiento, que es la estructura sin control, la de el mejor comportamiento, que es el control activo con r = 0.03 y, el control pasivo versus los tres niveles de descentralización C1, C2 y C3.

Las figuras 6.4, 6.6 y 6.8 presentan las respuestas de la estructura máximas para los sismos del Centro-NS. Taft-NS y Hachi-NS, respectivamente. Mientras que las figuras 6.5, 6.7 y 6.9, muestran las fuerzas acumuladas para los tres registros antes mencionados.

Las respuestas estructurales máximas que se producen en la estructura de cinco niveles ante el registro Centro-NS son presentadas en la figura 6.4. Es destacable observar que el nivel de descentralización C1 está sobre encimado del control activo con lo que comprueba la certeza del modelado propuesto. Los desplazamientos y velocidades máximas presentan el mismo comportamiento. C2 presenta un comportamiento mejor que el control pasivo pero no alcanza los valores del activo o ideal. También se presentan aceleraciones extremas en el nivel dos y requerimientos de fuerzas elevados en el nivel cuatro. En general presenta un comportamiento estable e incluso muestra mejoras respecto al control pasivo.

Finalmente C3 presenta un comportamiento poco alentador para el sistema, ya que se obtienen respuestas peores a las que se obtienen sin control alguno. A partir de esto, se puede decir que el control activo descentralizado con la función LQR resulta inapropiado para ser implementado.

La figura 6.5 muestra el comportamiento de las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de cinco niveles ante el sismo Centro-NS, para los distintos niveles de descentralización versus el control activo centralizado. En esta figura se observa que las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura no dependen de los niveles de descentralización. Por consiguiente, cuando existe centralización completa, las fuerzas aplicadas son las mismas; sin embargo, cuando existen dos subsistemas se necesita la mayor cantidad de fuerzas acumuladas y no alcanza los valores óptimos requeridos.

Por ultimo se puede observar que la descentralización completa no requiere tanta aplicación de fuerzas, pero logra desestabilizar la estructura ya que produce respuestas poco alentadoras.



Figura 6.4 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Centro-NS. (Descentralizado)

La figura 6.6 muestra el comportamiento máximo de la estructura para el sismo Taft-NS. Las respuestas son similares a las obtenidas con el Centro-NS. Con la diferencia, en este caso para C2, de que las mejoras en los desplazamientos máximos y de entrepisos no son muy marcadas e incluso son inferiores a las obtenidas con el control pasivo. C3 no cambia su comportamiento respecto al registro anterior. La respuesta obtenida es inferior al control pasivo.



Figura 6.5 Fuerzas acumuladas aplicadas ante distintos niveles de descentralización para estructura de cinco niveles (Centro).

En esta simulación, las mejoras proporcionadas con la descentralización parcial son escasas; sin embargo existen, lo cual permite suponer que la descentralización es una idea conveniente si se logra implementar adecuadamente.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 6: CONTROL DESCENTRALIZADO



Figura 6.6 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Taft-NS. (Descentralizado)

La figura 6.7 exhibe las fuerzas acumuladas aplicadas al sistema ante el sismo Taft-NS con los tres niveles de descentralización presentados en la figura 6.3. El comportamiento es muy similar al anterior. El control activo centralizado no requiere tantas fuerzas para mejorar el comportamiento; sin embargo cuando dividimos el problema en subsistemas, en primera no se alcanzan los niveles de C1, además de que se requiere más de un 50% de fuerzas.

Las fuerzas acumuladas requeridas con C3 son superiores a las óptimas pero inferiores a las de C2, lo cual mantiene la idea de que las fuerzas aplicadas no dependen del nivel de descentralización. También confirma que la descentralización completa del control activo no es factible.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 6: CONTROL DESCENTRALIZADO



Figura 6.7 Fuerzas acumuladas aplicadas ante distintos niveles de descentralización para estructura de cinco niveles (Taft).

La figura 6.8 muestra la respuesta estructural máxima para el registro Hachi-NS, con respuesta similar. C1 igual que el control activo centralizado, C2 mejora al control pasivo e incluso obtiene respuestas cercanas al C1. Mientras que C3 apenas alcanza los valores de la estructura sin control.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 6: CONTROL DESCENTRALIZADO



Figura 6.8 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Hachi-NS. (Descentralizado)

Finalmente, la figura 6.9 presenta el comportamiento de las fuerzas acumuladas ante el registro Hachi-NS, donde C1 requiere menos de la mitad de fuerzas para obtener respuestas estructurales mejores.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 6: CONTROL DESCENTRALIZADO



Figura 6.9 Fuerzas acumuladas aplicadas ante distintos niveles de descentralización para estructura de cinco niveles (Hachi).

En resumen, a partir de los resultados obtenidos del modelado de estructuras con control descentralizado se puede decir que el control parcialmente descentralizado puede ser una idea razonable, ya que no desestabiliza la estructura y mejora la respuesta estructural obtenida ante los tres registros utilizados. Sin embargo, tiene un costo relativamente alto, pues requiere mayores cantidades de fuerzas sin poder alcanzar las mejoras del control ideal, a saber las del control activo centralizado.

Al parecer el control activo descentralizado desestabiliza por completo a la estructura; es decir, no mejora la respuesta estructural con respecto al control pasivo e incluso tiene una respuesta más desfavorable que la misma estructura sin control. Esto se puede atribuir a que posiblemente cuando intenta proporcionar una solución óptima para una condición local, ésta puede ser la más desfavorable para el sistema global.

CAPÍTULO 7 IMPLEMENTACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL SEMIACTIVO DESCENTRALIZADO

7.1 GENERALIDADES

Los controles activo y semiactivo, centralizados e incluso, descentralizados parcialmente, son adecuados y mejoran el comportamiento estructural, como se ha señalado en capítulos anteriores. En este capítulo se propone una nueva manera de controlar la estructura a base de control semiactivo totalmente descentralizado.

La finalidad de esta propuesta es evitar los problemas que presenta el control activo, a saber, altos requerimientos de energía y problemas de escalamiento. Para ello se propone un algoritmo más efectivo que el pasivo, con la posibilidad de cambiar su comportamiento durante un evento sísmico y obtener un mejor desempeño.

7.2 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

Las ventajas que presenta el control semiactivo han despertado el interés de algunos investigadores, tanto para desarrollar nuevos dispositivos como para implementarlos. Tal es el caso de Kurino *et al.* (2003), quien desarrolló un dispositivo de aceite que permite controlar el coeficiente de amortiguamiento. Dicho dispositivo basa su funcionamiento en la apertura de válvulas, y está constituido por un sistema de compartimientos y resortes llamado "HiDAX"; este sistema es de nueva generación y se caracteriza por tener alto amortiguamiento. Debido a las características que presenta el dispositivo, este resulta más económico y funcional que el utilizado en el control activo.

El trabajo de Kurino *et al.* consistió en la aplicación de dichos dispositivos en modelos teóricos así como la implementación real de un edificio en 2003, y resulta muy importante, debido a que presenta todo el desarrollo teórico y práctico del funcionamiento de los dispositivos "HiDAX". Es decir, permite determinar las ventajas que en la actualidad presentan estos dispositivos para los requerimientos del control estructural. El sistema HiDAX permite disipar hasta dos veces más energía que un sistema pasivo ordinario y su algoritmo funciona sólo de dos modos, ya sea encendido o apagado.

La figura 7.1 presenta el modelo de Kurino *et al.*, llamado "bang bang", el cual sólo presenta dos niveles de fuerza de amortiguamiento (*Cmin y Cmax*); sin embargo, sus valores están en función de las características del dispositivo.

La ecuación 7.1 presenta la fórmula del control.

$$F\dot{x} \ge 0 \circ |F| \le F_o \Longrightarrow C(t) = C_{\max}$$

$$F\dot{x} \prec 0 \circ |F| \succ F_o \Longrightarrow C(t) = C_{\min}$$

Ec. 7.1 y 7.2

donde F_o representa la fuerza mínima que aplica el dispositivo, C(t) el coeficiente de amortiguamiento, k la rigidez y Fx expresa el control de energía del amortiguador de Maxwell.

En la figura 7.1 se grafica el proceso de absorción de energía definido por la ecuación 7.1.

- Cuando la fuerza del amortiguador va en la misma dirección el control es positivo, (A-B), y aplica el valor C_{max}, donde acumula energía potencial.
- Cuando cambia de dirección (B-C), o la fuerza de control llega a ser negativa, minimiza el coeficiente de amortiguamiento C_{\min} .
- Finalmente, cuando la fuerza del amortiguador es removida y llega a ser menor que *F_o* se aplica *C_{max}* en la otra dirección.



Figura 7.1 Modelo de Kurino et al. (2003)

El trabajo de Kurino se ha implementado de manera satisfactoria en un edificio que tiene como uso hotel y oficinas, y en el que se montaron 72 HiDAX con la finalidad de controlar los fuertes vientos. Así se puede ver, con esta aplicación, que este dispositivo no sólo es útil en zonas sísmicas, sino que tiene diversas finalidades.

El sistema HiDAX tiene como punto central la creación de un sistema descentralizado en donde la acción de cada dispositivo no tenga que depender de información que se encuentre en otro dispositivo o sensor, sino que al suscitarse algún evento, cada aparato tenga lo necesario para cambiar sus propiedades. Así cada dispositivo será capaz de responder de manera más rápida y eficiente, sin necesidad de una computadora central que tenga problemas de cables, conexiones o capacidad de procesamiento. Estas características resultan interesantes ya que en este trabajo se busca el mismo objetivo.

Debido a que la eficacia del sistema de control se puede incrementar, con la modificación de las propiedades del dispositivo, surgió la tarea de determinar cuándo y cómo hay que cambiar dichas propiedades, con el propósito de lograr un mejor comportamiento de las estructuras. Apoyados en esa investigación se procedió a determinar un algoritmo más complejo y eficaz, que no sólo encienda y apague el dispositivo, si no que proporcione mejores rendimientos. Esto se puede lograr con la explotación de las ventajas que presentan los nuevos amortiguadores como los MR.

Existen varias ideas con el mismo concepto que podrían aplicarse en la búsqueda de una solución simple y efectiva para la definición del algoritmo. A continuación se presentan dos ejemplos.
La primera idea del control surge de lo que se conoce en charrería como "Píales" (ver figura 7.2) y consiste en lazar únicamente las patas traseras de un equino que va a toda carrera con el fin de detenerlo; esta faena no lastima al animal lazado y es muy educativa para el caballo del lazador, al mismo tiempo que resulta bastante difícil, entretenido, divertido y riesgoso (http://www.prodigyweb.net.mx/perezdia/jaripeo/jaripeo-jaripeo.html). Esta acción no es tan sencilla como parece, el lazador debe tener cierta habilidad y entrenamiento, ya que la reata se puede romper si se detiene muy rápido al caballo, y si no detienes al equino a determinada distancia, se puede escapar debido a que se acaba la cuerda.



Figura 7.2 Píales en el Lienzo. Ejemplo 1

Si se aplica este concepto de la charrería a las estructuras, se observa que la intención es detener el movimiento de la misma sin dañarla, es decir, incrementar de manera gradual y no súbitamente la fuerza aplicada con el fin de disminuir los desplazamientos de los edificios. Sin embargo, se deben tomar en cuenta las limitaciones del control semiactivo mencionadas en capítulos anteriores. Por último, cabe mencionar que el sistema no se desestabiliza debido a que la única fuerza aplicada es aquella proporcionada por el amortiguador.

La segunda idea es otra manera de identificar los fundamentos físicos del algoritmo propuesto y se puede explicar con otro ejemplo simple. Imagine dos huevos (figuras 7.3 (a) y (b)) que se arrojan hacia arriba a tres metros de altura (figuras 7.3 (c) y (d)); el primero se recibe con un recipiente estático (figura 7.3 (e)) colocado a la misma altura desde donde se arrojó. Mientras que el segundo cae en otro recipiente que lo recibe con un movimiento en la misma dirección (figura 7.3 (f)), con la finalidad de amortiguar su caída. Como se puede ver, el segundo huevo se encuentra integro (figura 7.3 (h)), a diferencia del primero (figura 7.3 (g)). Ahora imagine que el huevo es una estructura, ¿En cuál de los dos huevos le gustaría estar? La respuesta resulta obvia; ahora sólo falta especificar como se llevará a cabo dicha acción.

Los fines de este algoritmo se basan en la idea de que las fuerzas de control son independientes. Con ello se cumple el objetivo del control descentralizado. Las fuerzas proporcionadas sólo dependen de la fuerza viscosa. Debido a esta característica, la determinación de la fuerza de control que se aplica al sistema es proporcional a la velocidad y únicamente depende de la dirección de la velocidad. Cabe mencionar que esto es posible pues, como mencionan Kurino (2003), Kurata (1999) y Dyke (1996), se puede controlar la fuerza modificando el coeficiente de amortiguamiento. De hecho, los

dos últimos autores han realizado pruebas ante requerimientos aleatorios con resultados aceptables.



Figura 7.3 Descripción física del fundamento del algoritmo. Ejemplo 2

Es sabido que lo peor que puede ocurrir con el control semiactivo es que este no funcione y se comporte como un simple control pasivo; esto no es malo, pero no es lo que se pretende con dicho control. En concreto, la intención es minimizar los desplazamientos. Esto se hace al incrementar las fuerzas de manera gradual, con la finalidad de evitar daños en la estructura, como ocurre en los dos ejemplos mostrados al principio de este capítulo.

Básicamente, el comportamiento ideal sería comenzar a incrementar las fuerzas con una cierta pendiente, partiendo de cero hasta alcanzar el valor máximo que puede proporcionar el dispositivo. Es claro que no se puede tener el valor de cero en la fuerza, porque existe una fuerza mínima que proporciona el dispositivo; es decir, siempre existirá un coeficiente de amortiguamiento mínimo, que en este caso se desecha.

En el algoritmo se utilizan únicamente las velocidades de cada uno de los niveles (es completamente descentralizado). Con la velocidad se determinan las fuerzas que se aplican a la estructura. La magnitud de estas se incrementa gradualmente de acuerdo a una pendiente preestablecida. Este incremento gradual es posible, ya que el coeficiente

de amortiguamiento puede ser modificado, dentro de ciertos límites, de acuerdo a las especificaciones de los dispositivos.

De acuerdo con el principio de los sistemas semiactivos, las fuerzas se aplican si la velocidad va en la misma dirección que la aplicación de la fuerza. Basados en esto, se propone incrementar la fuerza aplicada al sistema mientras la velocidad vaya en la misma dirección; sin embargo, cuando la velocidad cambia, el valor de la fuerza disminuye al mínimo y se repite el mismo proceso pero en sentido inverso. En general, el algoritmo propuesto esta definido por las ecuaciones 7.3 a 7.8:

$$Fr = \begin{cases} N^{*} \operatorname{contpl} \to vi > 0 \mid vi = 0 \mid N^{*} \operatorname{contpl} < 1000 \\ - N^{*} \operatorname{contpl} \to vi < 0 \mid -N^{*} \operatorname{contpl} < -1000 \\ 1000 \to N^{*} \operatorname{contpl} > 1000 \\ -1000 \to -N^{*} \operatorname{contpl} < -1000 \end{cases}$$

$$F = \begin{cases} Fr \to \operatorname{Fr} \leq |(vi^{*} C \max)| \\ vi^{*} C \max_{i} \to |\operatorname{Fr}| > |(vi^{*} C \max)| \\ |vi^{*} C \max_{i} \to |\operatorname{Fr}| > |(vi^{*} C \max)| \end{cases}$$

donde vi es la velocidad de cada nivel donde se encuentra un dispositivo, Fr es la fuerza propuesta para el sistema, F es la fuerza definitiva para el sistema limitada por las características del dispositivo, C max es el coeficiente de amortiguamiento máximo según especificaciones, N, *contp y contn* son los parámetros que definen la pendiente con que se incrementa la fuerza. Estos últimos se reinician en uno cuando cambian de signo. A partir de dichas reglas, las fuerzas aplicadas al sistema tienen el comportamiento que se observa en la figura 7.4.



Figura 7.4 Comportamiento del algoritmo propuesto.

Las fuerzas aplicadas son básicamente las que puede proporcionar el dispositivo y se encuentran limitadas por las especificaciones de los mismos (mostrados en la tabla 3.5 del capítulo 3). Con dichas especificaciones se elabora un modelo completamente descentralizado, que pueda tomar una decisión propia para un mejor comportamiento dinámico. La idea principal es que a partir de la velocidad del nivel donde se encuentra el dispositivo, éste responda de la mejor manera posible.

En la figura 7.5 se muestra el esquema del modelo para la estructura de cinco niveles. El modelado de este control es básicamente el mismo del control activo. La diferencia se presenta en la determinación de las fuerzas y en que sólo utiliza la información de cada nivel, en este caso únicamente la velocidad correspondiente. Se presenta la estructura determinada por el espacio de estados, la cual recibe la entrada del sismo y de las fuerzas de los dispositivos; a partir de ello se obtiene la respuesta estructural y, posteriormente, se determinan los valores máximos.



Figura 7.5 Diagrama de modelado para algoritmo propuesto (cinco niveles).

Las fuerzas aplicadas son determinadas por el algoritmo propuesto de manera autónoma en cada uno de los agentes que representan a cada dispositivo (marcados de verde en la figura anterior). Dentro de cada agente se calcula el algoritmo (ver figura 7.6). Por ello se observa sólo la entrada de la velocidad y se obtiene una fuerza determinada. En cada uno de los agentes se ejecuta el algoritmo propuesto para obtener las fuerzas de amortiguamiento producidas por los dispositivos.



Figura 7.6 Proceso llevado a cabo en cada agente de manera descentralizada.

7.3 IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PROPUESTO

Basados en el algoritmo propuesto se implementan los modelos descritos con diferentes pendientes; es decir, se define la rapidez con que se incrementan las fuerzas de amortiguamiento. Las pendientes utilizadas en esta investigación se muestran en la tabla 7.1, en la cual se presentan los resultados ante cuatro diferentes pendientes, para los sismos definidos en el capítulo 3.

Paso (s)	N (kN)	Pendiente (kN/s)
0.001	1	1000
0.001	0.1	100
0.001	0.01	10
0.001	0.001	1

Tabla 7.1 Pendientes implementadas en el algoritmo de control semiactivo descentralizado propuesto

Las figuras 7.7, 7.9 y 7.11 presentan las comparaciones de las respuestas de la estructura de cinco niveles obtenidas ante los tres registros a lo largo de esta investigación. Como base se presenta la respuesta del modelo con control activo con r=0.03 y con control pasivo. Posteriormente se presentan las respuestas ante las cuatro diferentes pendientes implementadas ordenadas de menor a mayor.

Por otro lado las figuras 7.8, 7.10 y 7.12 presentan las fuerzas acumuladas aplicadas al sistema con diferentes pendientes (P). Se comparan con las que proporciona el control activo con r=0.03 para los tres registros mostrados en el capítulo 3.

La figura 7.7 presenta la respuesta de la estructura ante el sismo de Centro-NS. Se reducen desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso; sin embargo las aceleraciones se incrementan. Estas últimas no superan los valores del control activo, pero los demás parámetros con pendientes grandes mejoran dicho control. Cabe mencionar, que modificando la variable r, la respuesta del control activo puede mejorar. Las fuerzas máximas aplicadas se incrementan conforme a las pendientes, debido a que alcanzan su fuerza máxima más rápidamente.

Al parecer, el sistema semiactivo nunca se desestabiliza, ya que con las diferentes pendientes la respuesta estructural es mejor. Además, las fuerzas máximas se encuentran limitadas por las características de los dispositivos.



Figura 7.7 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Centro-NS. Con control semiactivo descentralizado (propuesta)

La figura 7.8 presenta las fuerzas acumuladas para diferentes valores de P. Cuando la pendiente es pequeña, la cantidad de fuerza lo es también y las mejoras son apenas perceptibles. Cabe señalar que la energía aplicada al sistema es desperdiciada, ya que con la misma energía aplicada el control activo da mejores resultados.



Figura 7.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de cinco niveles Centro-NS. Con control semiactivo descentralizado (propuesta)

La figura 7.9 presenta las respuestas estructurales máximas ante el sismo Taft-NS. Muestra un comportamiento similar al registro Centro-NS, es decir, las mejoras son menores con pendientes pequeñas, y son mayores con pendientes grandes. Asimismo, en los primeros tres niveles se presentan incrementos en las aceleraciones, pero en los últimos la aceleración se reduce. Cuando la pendiente es muy grande la reducción en la respuesta supera la del control activo, sin olvidar que este último puede mejorar con valores diferentes de r.

El sistema tampoco se desestabiliza, presenta mejoras en todos los casos. Como se puede observar lo peor que puede suceder es que no funcione y quede como control pasivo.



Figura 7.9 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Taft-NS. Con control semiactivo descentralizado (propuesta)

En la figura 7.10 se presentan las fuerzas acumuladas aplicadas al sistema ante diferentes pendientes con el registro Taft-NS. Se observa que a pesar de que la energía aplicada por el control propuesto con P=100, es mayor que la utilizada por el control activo la respuesta no es mejorada a los niveles de dicho control. A partir de ello se puede observar un desperdicio de energía aplicada al sistema; sin embargo, permite mejorar el comportamiento.

Se observa que el comportamiento ideal (control activo centralizado) puede ser alcanzado con pendientes muy altas; sin embargo, se requiere más del doble de energía. Posiblemente este sea el precio de la descentralización. Es decir, se tienen que introducir fuerzas innecesarias para alcanzar respuestas favorables.



Figura 7.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de cinco niveles. Con control semiactivo descentralizado (propuesta)

Finalmente, la figura 7.11 muestra la respuesta ante el registro Hachi-NS, con un comportamiento muy similar al de los anteriores registros. La respuesta es mejorada y con una pendiente muy alta puede alcanzar e incluso superar con gran facilidad a la respuesta del control activo. En dicha figura se puede observar que las demandas a la estructura son menores; por lo tanto, con las mismas pendientes las mejoras relativas son superiores. Sin embargo, las aceleraciones propuestas superan las máximas determinadas con el control ideal.



Figura 7.11 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Hachi-NS. Con control semiactivo descentralizado (propuesta)

La figura 7.12 presenta el comportamiento de las fuerzas acumuladas aplicadas al sistema ante el registro Hachi-NS con diferentes valores de P. El comportamiento resultó similar a los otros dos registros anteriores.



Figura 7.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de cinco niveles (Hachi). Con control semiactivo descentralizado (propuesta)

En general, para la estructura de cinco niveles se observan mejoras ante los tres distintos registros. Las pendientes pequeñas muestran claramente la estabilidad del sistema. Las mejoras son pequeñas, pero constantes. Cuando la pendiente se incrementa, la reducción de desplazamiento, velocidades y desplazamientos de entrepiso es mejorada, alcanzando casi los valores del control activo (r=0.03).

Definitivamente, este control no afecta al sistema. Sin embargo, conforme el incremento de fuerzas es más grande, la efectividad del algoritmo se ve mejorada. Las velocidades

presentan un comportamiento muy similar a los desplazamientos. Si la pendiente se incrementa las velocidades máximas se reducen, con lo que los contenidos en la estructura estarán más seguros.

Las aceleraciones de los entrepisos resultan afectadas por el incremento de la pendiente, pero algún costo se tiene que pagar por la simplificación del proceso. No obstante, como se observa en las gráficas, esta acción se puede controlar. El diseño de las estructuras depende de las aceleraciones y, por lo tanto, para un diseño completo es ideal equilibrar dichos parámetros.

Una vez verificada la efectividad del algoritmo para estructuras bajas, se procedió a implementar el algoritmo en la estructura representativa para estructuras altas, es decir, en la estructura de 20 niveles. El modelado se realiza conforme a la figura 7.13, donde cada subsistema (cuadro verde) representa un dispositivo. Por ello existen 16 subsistemas, mientras que la estructura se representa del mismo modo.



Figura 7.13 Diagrama de modelado para algoritmo propuesto (20 Niveles).

En este caso fue necesario reducir el paso a 0.0001 segundos para tener la simulación con pasos fijos. A partir de dicho paso se implementaron las pendientes que se presentan en la tabla 7.2.

Paso (s)	N (kN)	Pendiente (kN/s)
0.0001	1	10000
0.0001	0.1	1000
0.0001	0.01	100
0.0001	0.001	10
0.0001	0.0001	1

Tabla 7.2 Pendientes implementadas en el algoritmo de control semiactivo descentralizado propuesto para 20 niveles

Al implementar el sistema para la estructura de 20 niveles, se obtiene sus respuestas ante los tres diferentes registros. Las figuras 7.14, 7.16 y 7.18 muestran los resultados de la estructura ante los sismos del Centro-NS, Taft-NS y Hachi-NS, respectivamente. Las respuestas comparadas toman como referencia la estructura, tanto con control activo centralizado con r= 0.01, como con el control pasivo.

Por otro lado las figuras 7.15, 7.17 y 7.19 presentan las fuerzas acumuladas aplicadas al sistema para los tres distintos registros señalados y se comparan con las fuerzas acumuladas del control ideal.

La figura 7.14 expone la respuesta obtenida del la simulación ante el registro Centro-NS. Ante este registro las pendientes grandes permiten reducir las respuestas, sin alcanzar los valores del control ideal. A pesar de que las fuerzas máximas son inferiores a las que necesita el control activo.



Figura 7.14 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Centro-NS. 20 Niveles. Con control activo descentralizado (propuesta)

La figura 7.15 muestra las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para la estructura en estudio. Las pendientes pequeñas proporcionan muy pocas fuerzas al sistema y, por lo tanto, las mejoras son poco perceptibles, mientras que las pendientes altas exigen una gran cantidad de energía que no alcanzan los niveles del control ideal. Las pendientes altas parecen lineales debido a que la aplicación de fuerzas es casi la misma en cada dirección y la diferencia de energía no es considerable.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 7: CONTROL SEMIACTIVO DESCENTRALIZADO (PROPUESTA)

Figura 7.15 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de 20 niveles (Centro).

La figura 7.16 revela las respuestas máximas de la estructura ante el registro Taft-NS. La reducción en la respuesta es menor a la del Centro-NS y, en este caso, el hecho de tener pendientes demasiado altas no produce mejoras notables, ya que éstas podrían afectar el comportamiento, lo cual se puede ver en los desplazamientos de entrepiso. Pero es sabido, que el control activo requiere niveles elevados de fuerzas máximas, lo cual si no es imposible de proporcionar, resultaría muy difícil.



Figura 7.16 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Taft-NS. 20 Niveles (Propuesta)

El comportamiento de las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles ante el registro Taft-NS, mostrado en la figura 7.17, es similar al del Centro-NS. Las pendientes pequeñas apenas son perceptibles y, por lo tanto, no afectan al sistema, pero tampoco lo ayudan. Las pendientes altas pueden llegar a afectarlo sin lograr desestabilizarlo completamente, aunque los requerimientos de energía son cuantiosos.

Las fuerzas del control óptimo, como ya se mencionó, se incrementan considerablemente con la demanda; sin embargo, el algoritmo propuesto continúa agregando fuerzas aunque no sean necesarias, razón por la cual los requerimientos de energía son extraordinarios.



Figura 7.17 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de 20 niveles (Taft).

Finalmente, la figura 7.18 presenta la respuesta estructural máxima de la estructura ante el sismo Hachi–NS. En general, tiene un comportamiento similar al anterior. Sin embargo, las mejoras resultan más marcadas. Es importante señalar que existe una mejora sin alcanzar la respuesta del control ideal.

Como ya se había explicado, la inclusión del control trae consigo que las aceleraciones máximas se incrementen, pese a que se pueden controlar con las pendientes del algoritmo. También es notable que las fuerzas máximas requeridas son mucho más grandes que las que puede proporcionar el sistema. Quizá ésta sea la razón por la cual no se alcanzan lo valores del control ideal.

Los desplazamientos de entrepiso mantienen la forma del control pasivo cuando la pendiente es pequeña; pero cuando esta última crece comienza a modificar la forma general sin desestabilizar el sistema por completo. Por otro lado, es importante distinguir las fuerzas aplicadas al sistema.



Figura 7.18 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Hachi-NS. 20 Niveles (Propuesta)

Por último, la figura 7.19 presenta el comportamiento de las fuerzas acumuladas aplicadas al sistema ante el registro Hachi-NS. Como era de esperarse, presenta el mismo comportamiento que los dos anteriores. Pendientes pequeñas aplican fuerzas bajas al sistema y grandes tienden a ser lineales.

VINº FUERZAS ACUMULADAS EN ESTRUCTURA DE 20 NIVELES CON ALGORITMO PROPUESTO(HACHI) P=10000 1.8 Fuerza (kN) P=1000 P=100 ΠP C ACTIVO R=0.0 0.4 0.2 P=10 80 40 60 P=1 120 Tiempo (s)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-AZCAPOTZALCO CAPÍTULO 7: CONTROL SEMIACTIVO DESCENTRALIZADO (PROPUESTA)

Figura 7.19 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de 20 niveles (Hachi).

Es importante comentar que las fuerzas aplicadas a la estructura son proporcionadas por el mismo sistema. Por ende, esas fuerzas se pueden considerar como energía disipada. Las pendientes son capaces de regular la disipación de energía.

En resumen, se puede afirmar que el algoritmo propuesto, tiene un buen comportamiento para estructuras bajas donde domina el primer modo de vibrar. Mientras que para estructuras altas, dicho algoritmo presenta limitaciones considerables. Lo rescatable de esta implementación son las grandes cantidades de disipación de energía.

Las ventajas presentadas en cuestión de desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso, para la estructura baja, son suficientes para afirmar la efectividad del algoritmo. Sin embargo, no se deben de descuidar los incrementos en aceleraciones, lo cual podría ser un punto crítico en el diseño.

Las cualidades del algoritmo en estructuras altas resultan escasas para aventurarse a proponer su uso; pero la posibilidad de implementarlo no es mala. Hay que recordar que dichos dispositivos pueden variar sus características y, después de un evento sísmico, no necesitan sustituirse como muchos otros disipadores.

En conclusión, para estructuras altas, el algoritmo permite controlar los niveles de energía disipada sin desestabilizar el sistema, mientras que para estructuras bajas, además de controlar la energía disipada, permite reducir considerablemente la respuesta estructural.

CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES

Los terremotos pueden dañar de manera considerable a las estructuras civiles. Por tal motivo, la ingeniería estructural mediante diversas técnicas se ha dado a la tarea de mejorar el comportamiento de las estructuras ante dichos desastres naturales. En México se aplica el control pasivo, pero en cuanto a control semiactivo, la investigación y aplicación es escasa. Esta tesis desarrolla un algoritmo de control semiactivo descentralizado, donde se encontró lo siguiente.

- La simulación de modelos sin control, al ser sometidos a diferentes excitaciones sísmicas, presentan distintas características y, por lo tanto, la respuesta es diferente a pesar de estar escalados a una misma velocidad. Los registros del Centro-NS y Hachi-NS demandan más a la estructura de cinco niveles, pero para la estructura de 20 niveles las demandas no son muy significativas. El sismo Taft demanda más a la estructura de 20 niveles y menos a la de cinco. A partir de esto se puede apreciar las que los sismos elegidos cubren un espectro amplio de periodos dominantes.
- Ante los tres diferentes sismos, el implementar el control pasivo permite reducir los desplazamientos en las dos estructuras estudiadas. La principal razón por la cual los desplazamientos son reducidos se debe al incremento de rigidez y amortiguamiento, este último definido a partir de los modos de vibrar. En este tipo de control, las fuerzas aplicadas a la estructura son nulas debido a que los dispositivos son simples contravientos que sólo aportan rigidez.
- La implementación del control activo centralizado, en ambas estructuras ante los tres registros sísmicos, produce mejoras considerables en la respuesta; la cual depende de la energía o fuerzas aplicadas, es decir, del valor de la matriz R. Resultaría incomparable seleccionar varios valores de r, razón por la cual se optó por definir un valor que produjera mejoras visibles y requerimientos de energía alcanzables. En este caso, r=0.03 para la estructura de cinco niveles y r=0.01 para la de 20. El estudio muestra que las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura dependen del valor de r. Cuanto menor sea dicho valor, las fuerzas acumuladas aplicadas son mayores. Dicha acción trae consigo una reducción en la respuesta estructural, sin embargo dotar a una estructura con tales fuerzas resultaría muy costoso.
- En el control semiactivo descentralizado la respuesta de la estructura es mejor que del control pasivo, pero inferior a la del control activo. El control semiactivo tiene la ventaja de no desestabilizar el sistema y, además, alcanza valores cercanos a los obtenidos con el control activo. La respuesta se mejora considerablemente en el edificio de cinco niveles, ya que, como se observa en las gráficas de fuerzas acumuladas, el control semiactivo es capaz de proporcionar más del 70% de las fuerzas óptimas. Mientras tanto las mejoras del control semiactivo en el modelo de 20 niveles son más limitadas, ya que apenas puede proporcionar el 50% de dichas fuerzas. Con este tipo de control se demuestra que las mejoras están presentes y quizá pueda alcanzar dichos niveles incrementando la energía proporcionada al sistema, es decir, incrementando el valor de r.

- De acuerdo con los resultados mostrados en la investigación, el control descentralizado parcialmente es una opción viable para la reducción de la respuesta máxima en las estructuras y la solución a los problemas de escalamiento. Sin embargo, la creación de subsistemas trae como consecuencia el requerimiento de mayor cantidad de fuerzas y no permite obtener las respuestas que se alcanzarían con el control centralizado. Al igual se observó que cuando existe comunicación entre algunos dispositivos se pueden obtener mejoras, sin embargo, cuando existe comunicación nula el sistema tiende a desestabilizarse obteniendo respuestas peores que la de la estructura sin control.
- La investigación permitió determinar un algoritmo de control de desplazamientos. Permite reducir, de manera considerable, la respuesta estructural máxima en edificios bajos. En edificios altos las mejoras no son tan visibles; sin embargo, una ventaja es que en estos el sistema nunca se desestabiliza y la cantidad de energía que se puede disipar es alta. Esto último es útil para el buen comportamiento de la estructura.
- En la estructura de cinco niveles la efectividad del algoritmo es notable; aún cuando "desperdicie" grandes cantidades de fuerzas acumuladas. En otras palabras, cuando se aplica, casi la misma cantidad de energía, el control activo centralizado mejora significativamente la respuesta respecto al algoritmo propuesto.
- El algoritmo desarrollado mejora su desempeño cuando se incrementan las pendientes, sin embargo, se encuentra una desventaja, a saber, el incremento en las aceleraciones, lo cual puede ser fundamental para el diseño.
- Finalmente, se puede concluir que la implementación del algoritmo propuesto es viable y eficiente, ya que resulta sencillo y fácil de aplicar. El estudio realizado sirve como base para estudios posteriores, pues se abre la posibilidad de verificar si la variación de las pendientes, en diferentes etapas del registro puede producir mejoras significativas para estructuras grandes y, encontrar parámetros que definan dichas variaciones. La investigación presentada en esta tesis da la pauta para que se pueda llevar a cabo la implementación a escala de dicho algoritmo.

REFERENCIAS

- Cundumi, O. S. "A Variable Damping Semiactive Device for Control of the Seismic Response of Buildings". Doctoral thesis of Philosophy in Civil Engineering: University of Puerto Rico Mayagüez Campus, 2005.
- Cupich, R. M. y Elizondo, G. F. J. "Amortiguadores Magnetoreológicos". En *Ingenierías*. Monterrey, Nuevo León: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, vol. I, no. 2, julio-diciembre, 1998. pp.50-54.
- Datta T.K. "A state-of-the-art review on active control of structures". In *ISET Journal of Earthquake Technology*, paper no. 430, vol. 40, no. 1, march 2003. pp. 1-17.
- Dyke, S.J., Spencer Jr. B.F., Quast, P., Kaspari, D.C., and Sain, M.K. "Implementation of an active mass driver using acceleration feedback control". In *Microcomputers in Civil Engineering*, vol.11, no.5, 1996. pp.305-323.
- Dike, S.J., Spencer Jr, F.B., Sain, M.K. and Carlson, J.D. "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction". In *Smart Materials and Structures*. Bristol, England: Institute of Physics, Bristol, vol. 5, no. 5, 1996. pp 565-575.
- Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A. G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, T.E., Soong, T.T., Spencer, B.F. and Yao, J.T.P. "Structural Control: Past, Present and Future". In *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, vol. 123, no.9, september 1997. pp. 897-971.
- Jansen, L. M. and Dike, S. J. "Semi-Active Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study". In *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, vol. 126, no. 8, august 2000. pp.795-803.
- Kobori, T. Kurino, H., Tagami, J. and Shimizu, K. "Switching Oil Damper with Built-in Controller for Structural Control". In *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, vol. 129, no.7, july 2003, pp. 895-904.
- Kurata, N., Kobori, T., Takahashi M., Ishibashi, T., Niwa, N., Tagami, J. and Midorikawa, H. "Forced vibration test of a building with semi-active damper system". In *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol.29, no.5, april 2000. pp. 629-645.
- Kurata, N., Kobori, T., Takahashi, M., Niwa, N. and Midorikawa, H. "Actual seismic response controlled building with semi-active damper system", In *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 28, no.11, october 1999. pp. 1427-1447.
- Kurino, H., Yamada, T., Matsugada, Y. and Tagami, J. "Switching oil damper with automatic valve operation system for structural control". In *Memories of 4th World Conference on Structural Control and Monitoring*, San Diego, California: University of California, july 2006. 4WCSCM-217.

- Loh, Chin-Hsiung y Chang, Chia-ming. "Decentralized versus centralized control study for large civil infrastructural systems". In *Memories of 4th World Conference on Structural Control and Monitoring*. San Diego, California: University of California, july 2006. 4WCSCM-121.
- Lynch, J. P. "Decentralization of wireless monitoring and control technologies for smart civil structures." Doctoral thesis of Philosophy: Stanford University, august 2002.
- MATLAB. The MathWorks, Inc.
- Naidu, D. S. *Optimal control systems*. Electrical engineering textbook series. Boca Raton, Fla. : CRC Press, 2002.
- Oviedo, A. J. A. y Duque, U. M. P. "Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones". En *Revista ElA*. Medellín, Colombia: Escuela de Ingeniería de Antioquia, no. 6, enero 2007. pp. 105-120.
- Peterka František. "More Detail View on the Dynamics of the Impact Damper". In *Mechanics, Automatic Control and Robotics.* Serbia, University of Niš, vol.3, no. 14, 2003. pp. 907 920.
- Shimizu, K., Orui, S. and Kurino, H. "Observed response of high-rise building with semiactive swiching oil dampers to earthquake and typhoon". In Memories of 4th World Conference on Structural Control and Monitoring. San Diego, California: University of California, july 2006. 4WCSCM-214.
- Soong, T. T. Active Structural Control: Theory and Practice (Hardcover). Longman Scientific and technical, Great Britain: Addison-Wesley Pub (Sd), 1990.
- Spencer Jr. B.F., Dyke, S.J. and Sain, M.K. "Phenomenological Model for Magnetorheological Damper". In In *Journal of Engineering Mechanics*, American Society of Civil Engineers, vol. 123, no.3, march 1997. pp. 230-238.
- Tena, C. A. *Notas clases: Control de la respuesta sísmica.* Trimestre 07-I. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Postgrado en Ingeniería Estructural, 2007.
- Tena, C. A. Disipación pasiva de energía en México: Un estado del arte. En VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Venezuela, 2003.
- Yalla, S.K. and Kareem, A. "Semiactive Tuned Liquid Column Dampers: Experimental Study". In *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, vol. 129, no. 7, july 2003. pp. 960-971.

http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Taipei101_damper.jpg

http://www.taylordevices.com