



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 2007

ALGORITMO DE CONTROL DE DESPLAZAMIENTOS DE EDIFICIOS SEMIACTIVO DE MANERA DESCENTRALIZADA

RESUMEN

POR

ERNESTO MORALES FRANCO

La ocurrencia de eventos sísmicos puede causar daños en las estructuras que conlleven a pérdidas humanas y materiales importantes. En algunos casos los daños en los contenidos de la estructura, o en elementos no estructurales, pueden ser más costosos que la estructura misma. El objetivo de este trabajo desarrollar un algoritmo de control que permita que las estructuras se encuentren en condiciones óptimas de servicio antes, durante y después de un evento sísmico.

Existen diversas alternativas para lograr disminución de daños. Estos se basan principalmente en la disipación de energía o en el control de desplazamientos y/o velocidades. Ahondando en el control estructural, este se ha desarrollado en los últimos años de manera significativa. Principalmente se identifican cuatro formas de control: pasivo, activo, semiactivo e híbrido. La mayor parte del control se ha aplicado de manera centralizada. Esto significa que toda la información es enviada a un nodo central donde la respuesta del algoritmo de control es calculado. Sin embargo, el problema de este paradigma es la dificultad para escalar su uso por los costos de instalación que esto implicaría. Algunos autores han investigado soluciones con sistemas parcialmente descentralizados, donde el algoritmo control se calcula con la información de sensores. Esta alternativa disminuye costos y proporciona desempeños similares a los centralizados.

Este artículo tiene como alcance la implementación analítica de un algoritmo de control totalmente descentralizado. El algoritmo considera que cada uno de los dispositivos de control toma la mejor decisión basados sólo en la información que tiene dicho dispositivo. El control semiactivo ha tenido un mayor desarrollo debido sus grandes ventajas como, el mínimo consumo de energía, la pequeña o nula posibilidad de desestabilización, la disminución en el riesgo de saturación de datos y la reducción en el tiempo de respuesta en comparación con el control centralizado.

La metodología del algoritmo propuesto se enfoca en el control de desplazamientos y en la utilización de amortiguadores semiactivos. Sin embargo se toman puntos de referencia para poder determinar la efectividad del algoritmo propuesto. Por tal motivo en este trabajo se implementan diversos modelos que incluyen estructuras sin control, con control pasivo, activo y semiactivo y se obtienen sus respuestas máximas. También se presta atención en los problemas de descentralización con la verificación de la efectividad del control estructural ante esta situación.

En el control centralizado la solución óptima se basa en el regulador lineal cuadrático (LQR), función que permite minimizar parámetros con restricciones establecidas. Se emplean dos estructuras de 5 y 20 niveles que han sido estudiadas anteriormente por otros autores. Los resultados muestran que el control completamente descentralizado en comparación con el parcialmente descentralizado tiene comportamiento aceptable y con la ventaja de ser más económico y robusto.

***Para mis padres y mi hermana,
Quienes me han apoyado incondicionalmente.***

CONTENIDO.....	
TABLAS.....	v
FIGURAS.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. GENERALIDADES.....	1
1.2. ANTECEDENTES.....	2
1.3. CLASIFICACIÓN DEL CONTROL.....	3
1.4. CONTROL PASIVO.....	3
1.5. OTROS DISIPADORES.....	12
1.6. CONTROL ACTIVO.....	13
1.7. CONTROL HÍBRIDO.....	15
1.8. CONTROL SEMIACTIVO.....	16
1.9. DISIPACIÓN DE ENERGÍA PASIVA.....	19
1.10. CONTROL ESTRUCTURAL.....	19
1.11. CONTROL ESTRUCTURAL CENTRALIZADO.....	20
1.12. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	23
2. FUNDAMENTOS DEL CONTROL ACTIVO, PASIVO Y SEMIACTIVO...	24
2.1. GENERALIDADES.....	24
2.2. REPRESENTACIÓN DE ESTADOS.....	24
2.3. CONTROL ESTRUCTURAL MODERNO.....	24
2.4. CONTROL ÓPTIMO LINEAL CLÁSICO.....	26
2.5. SOLUCIÓN DEL CONTROL (LQR).....	29
2.6. REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA SIN CONTROL.....	30
2.7. REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA CON CONTROL PASIVO.....	31

2.8. REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA CON CONTROL ACTIVO.....	31
2.9. REPRESENTACIÓN DE ESTADOS PARA ESTRUCTURA CON CONTROL SEMIACTIVO.....	32
2.10. CONCEPTO GENERAL DEL CONTROL CENTRALIZADO.....	33
3. MODELOS ADOPTADOS.....	35
3.1. GENERALIDADES.....	35
3.2. MODELO DE 5 NIVELES.....	35
3.3. MODELO DE 20 NIVELES.....	39
3.4. SISMAS UTILIZADOS.....	44
3.5. DISPOSITIVOS UTILIZADOS.....	45
4. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO.....	47
4.1. GENERALIDADES.....	47
4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SIN CONTROL.....	47
4.3. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CON CONTROL PASIVO.....	49
4.4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CON CONTROL ACTIVO.....	51
5. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL SEMIACTIVO CENTRALIZADO...	63
5.1. GENERALIDADES.....	63
5.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CON CONTROL SEMIACTIVO.....	63
6. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ACTIVO DESCENTRALIZADO...	74
6.1. GENERALIDADES.....	74
6.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO CON CONTROL ACTIVO DESCENTRALIZADO PARCIALMENTE.....	74
7. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL SEMIACTIVO CENTRALIZADO...	82
7.1. GENERALIDADES.....	82
7.2. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO.....	82
7.3. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO PROPUESTO.....	88
8. CONCLUSIONES.....	99
9. REFERENCIAS.....	102

TABLAS

<i>Tabla 3.1 Propiedades del modelo analítico.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3.2 Propiedades dinámicas del modelo analítico.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 3.3 Propiedades de estructura SAC de 20 Niveles.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 3.4 Propiedades dinámicas de estructura SAC de 20 niveles.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 3.5 Especificaciones de los dispositivos SHM.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 4.1 Dimensiones de las matrices para cada modelo.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 4.2 Dimensiones de las matrices necesarias para LQR para cada modelo.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 4.3 Dimensiones de las matrices obtenidas del LQR para cada modelo.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 7.1 Pendientes implementadas en el algoritmo de control semiactivo descentralizado propuesto.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 7.2 Pendientes implementadas en el algoritmo de control semiactivo descentralizado propuesto para 20 niveles.....</i>	<i>93</i>

FIGURAS

<i>Figura 1.1 Anillo de fuego y placas tectónicas, origen de actividad sísmica.....</i>	<i>1</i>
<i>Figura 1.2 TMD instalada en Taipei 101.....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 1.3 Dispositivos disipadores de energía metálicos.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1.4 Dispositivos disipadores de energía por fricción.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 1.5 Dispositivos disipadores de energía viscoelásticos.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 1.6 Dispositivos disipadores de energía con fluidos viscosos.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 1.7 Dispositivos disipadores de energía tipo TLCD.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 1.8 Aisladores de base.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 1.9 Dispositivos disipadores de energía novedosos.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 1.10 Modelado de control activo e híbrido.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1.11 Implementación del control activo</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1.12 Esquema de tendón de control activo.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 1.13 HMD tipo V instalado en la torre Shinsuku Park en Japón.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 1.14 Aislamiento de base activo.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 1.15 Amortiguador de orificio variable implementado en edificio Shizuoka Japón.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 1.16 Amortiguador de fricción controlable.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 1.17 Esquema de amortiguador de impacto.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 1.18 Esquema de amortiguador de liquido controlable (TLCD).....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 1.19 Sección transversal del amortiguador ER.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 1.20 Amortiguador MR.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 1.21 Esquema de control centralizado.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 1.22 Esquema de control parcialmente centralizado.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 1.23 Esquema de control descentralizado.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 2.1 Esquema de configuración Moderna (MIMO).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.2 Sistemas que son regidos por las condiciones de frontera.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.3 Comportamiento de las soluciones del control.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.4 Esquema de control pasivo. Ciclo abierto.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.5 Esquema de control activo. Ciclo cerrado.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 2.6 Esquema de control semiactivo. Ciclo cerrado.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.7 Escenario usual de adquisición de datos con control centralizado.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2.8 Diagrama de flujo para control activo.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.1 Estructura con sistema de control semiactivo.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.2 Ubicación de los dispositivos en planta y elevación.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.3 Instalación y modelado de dispositivo, y su conexión a partir de su configuración</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.4 Modelo estructural y su representación esquemática.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.5 Modelo con control estructural y su representación esquemática simplificada.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.6 Estructura Benchmark y la ubicación de los dispositivos.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.7 Modelo sin control estructural y su representación esquemática.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 3.8 Modelo con control estructural y su representación esquemática.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 3.9 Sismos seleccionados y normalizados a una velocidad espectral de 50m/s.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 3.10 Configuración de las pruebas con Amortiguadores MR.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.1 Modelo para estructura sin control estructural.....</i>	<i>47</i>

<i>Figura 4.2 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles ante los 3 sismos seleccionados.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.3 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles ante los 3 sismos seleccionados.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.4 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control pasivo ante los 3 sismos seleccionados.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 4.5 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control pasivo ante los 3 sismos seleccionados.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.6 Esquema básico de control activo centralizado.....</i>	<i>53</i>
<i>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.....</i>	<i>54</i>
<i>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.....</i>	<i>55</i>
<i>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.....</i>	<i>55</i>
<i>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.....</i>	<i>56</i>
<i>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.....</i>	<i>57</i>
<i>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.....</i>	<i>58</i>
<i>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.....</i>	<i>58</i>
<i>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.....</i>	<i>59</i>
<i>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.....</i>	<i>60</i>
<i>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.....</i>	<i>60</i>
<i>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.....</i>	<i>61</i>
<i>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.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.1 Esquema básico de control semiactivo centralizado.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.2 Subsistema “Control semiactivo” para edificio de 20 niveles.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.3 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control semiactivo ante el registro Centro-NS con R de 0.03.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.4 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado Centro-NS R de 0.03.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.5 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control semiactivo ante el registro Taft-NS con R de 0.03.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Taft-NS R de 0.03.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 5.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control semiactivo ante el registro Hachi-NS con R de 0.03.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.8 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Hachi-NS R de 0.03.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.9 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control semiactivo ante el registro Centro-NS con R de 0.01.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Centro-NS R de 0.01.....</i>	<i>70</i>

<i>Figura 5.11 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control semiactivo ante el registro Taft-NS con R de 0.01.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.12 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Taft-NS R de 0.01.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.13 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control semiactivo ante el registro Hachi-NS con R de 0.01.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.14 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Hachi-NS R de 0.01.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 6.1 Modelo con control activo descentralizado (5 niveles).....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 6.2 Agente del control descentralizado de cada dispositivo (5 niveles).....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 6.3 Niveles de descentralización.....</i>	<i>76</i>
<i>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.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 6.5 Fuerzas acumuladas del control activo descentralizado. Centro-NS R de 0.03</i>	<i>78</i>
<i>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.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 6.7 Fuerzas acumuladas del control activo descentralizado. Taft-NS R de 0.03.....</i>	<i>80</i>
<i>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.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6.9 Fuerzas acumuladas del control activo descentralizado. Hachi-NS R de 0.03.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 7.1 Modelo de Kurino.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 7.2 Pñales en el Lienzo.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 7.3 Descripción física del fundamento del algoritmo.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 7.4 Comportamiento del algoritmo propuesto.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 7.5 Diagrama de modelado para algoritmo propuesto (5 Niveles).....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 7.6 Proceso llevado a cabo en cada agente de manera descentralizada.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 7.7 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control propuesto ante el registro Centro-NS.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 7.8 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 5 niveles. Centro-NS.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 7.9 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control propuesto ante el registro Taft-NS.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 7.10 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 5 niveles. Taft-NS</i>	<i>91</i>
<i>Figura 7.11 Respuestas máximos de la estructura de 5 niveles con control propuesto ante el registro Hachi-NS.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 7.12 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 5 niveles. Hachi-NS.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 7.13 Diagrama de modelado para algoritmo propuesto (20 Niveles).....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 7.14 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control propuesto ante el registro Centro-NS.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 7.15 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 20 niveles. Centro-NS.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 7.16 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control propuesto ante el registro Taft-NS.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 7.17 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 20 niveles. Taft-NS.....</i>	<i>96</i>

<i>Figura 7.18 Respuestas máximos de la estructura de 20 niveles con control propuesto ante el registro Hachi-NS.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 7.19 Fuerzas acumuladas del control propuesto en estructura de 20 niveles. Hachi-NS.....</i>	<i>97</i>

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 todo su apoyo. También a mis familiares por confiar en mí y brindarme su apoyo en momentos difíciles.

A mi Director de Tesis: Dr. Manuel E. Ruiz Sandoval Hernández, por su asesoramiento, personal, técnico y científico, quien me estimuló para seguir creciendo intelectualmente, ya que logró contagiarme de sus ideas y me impulsó a tratar de ponerlas en práctica.

Agradezco a la UAM por la formación que me brindó 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 sería imposible culminar este trabajo.

INTRODUCCIÓN

GENERALIDADES

En diversas partes del mundo entero existen zonas de alto riesgo a causa de desastres naturales, como lo son erupciones volcánicas, huracanes, terremotos etc. En México un problema latente son precisamente los sismos, ya 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 produce daño a las estructuras que se encuentran cimentadas en zonas cercanas a las fallas, (pacífico mexicano) y en otras zonas no tan cercanas pero que se ven afectadas por estos movimientos telúricos (ciudad de México).

No sólo la actividad sísmica daña 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 a la solución de problemas típicos de ingeniería civil.

ANTECEDENTES

La ocurrencia de desastres naturales provoca, en muchos casos, la pérdida de vidas humanas y costos materiales elevados. Es del 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 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, también 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 basados 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 se construye la primera estructura aislada por Frank Lloyd Wriqh que consistía en utilizar una capa de lodo como elemento aislante. En esa década apareció el concepto de “piso suave” que consiste en que en el primer nivel se concentrara el daño. (Notas-Tena 2006)

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

A partir de 1959 la investigación así como implementación creció. Aparecieron aplicaciones en Rusia, Yugoslavia, Ucrania, México, China, Estados Unidos, Nueva Zelanda. Este último 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 Estado Unidos quienes desarrollan investigación e incrementan el número de aplicaciones; sin embargo en la última década Japón se convirtió en el país con mayor número de aplicaciones de aislamiento, seguido por Estados Unidos, pero 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, y sin olvidar a Federico Garza Tamez quien basado en le principio

pendular aísla la prensa de Reforma en 1995 y posteriormente aísla un edificio en Guadalajara 3 años después. También existen aplicaciones en puentes a base de elastómeros laminados con corazón de plomo y otros dispositivos como el utilizado en la presa de infierrillo. 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 EE.UU. los sistemas de aislamiento de base pasiva en edificio 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 de vibraciones 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. No fue si no hasta los 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, han sido empleados amortiguadores de manera satisfactoria. A partir de ello comenzó a aparecer el interés por dispositivos disipadores de energía y fue hasta los 60's cuando comenzó un incremento en la investigación en 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 nuevas tendencias.

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.

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 puedan absorber sus efectos;(Notas Tena-2006). Se caracterizan por que no requiere fuente externa. Las fuerzas que imparte son desarrolladas en respuesta a la estructura.

El control pasivo se puede definir entre los controles como aquel que resulta más sencillo y con un costo inicial mas bajo. Se pueden definir 3 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 de del siglo XX. Consiste en controlar o reducir la respuesta dinámica mediante la inclusión de una masa relativamente pequeña unida mediante 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 amortiguadores 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)). Se ha puesto interés en investigar este ramo que ha conducido a determinar 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).

Debido al buen comportamiento de estos dispositivos surge 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 que 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 y que siguen el mismo principio de concentrar la disipación de energía.

Los dispositivos de fluencia metálicos matemáticamente consisten en 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, Tsai en ese mismo año 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 procedimientos basado 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 etc. 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).

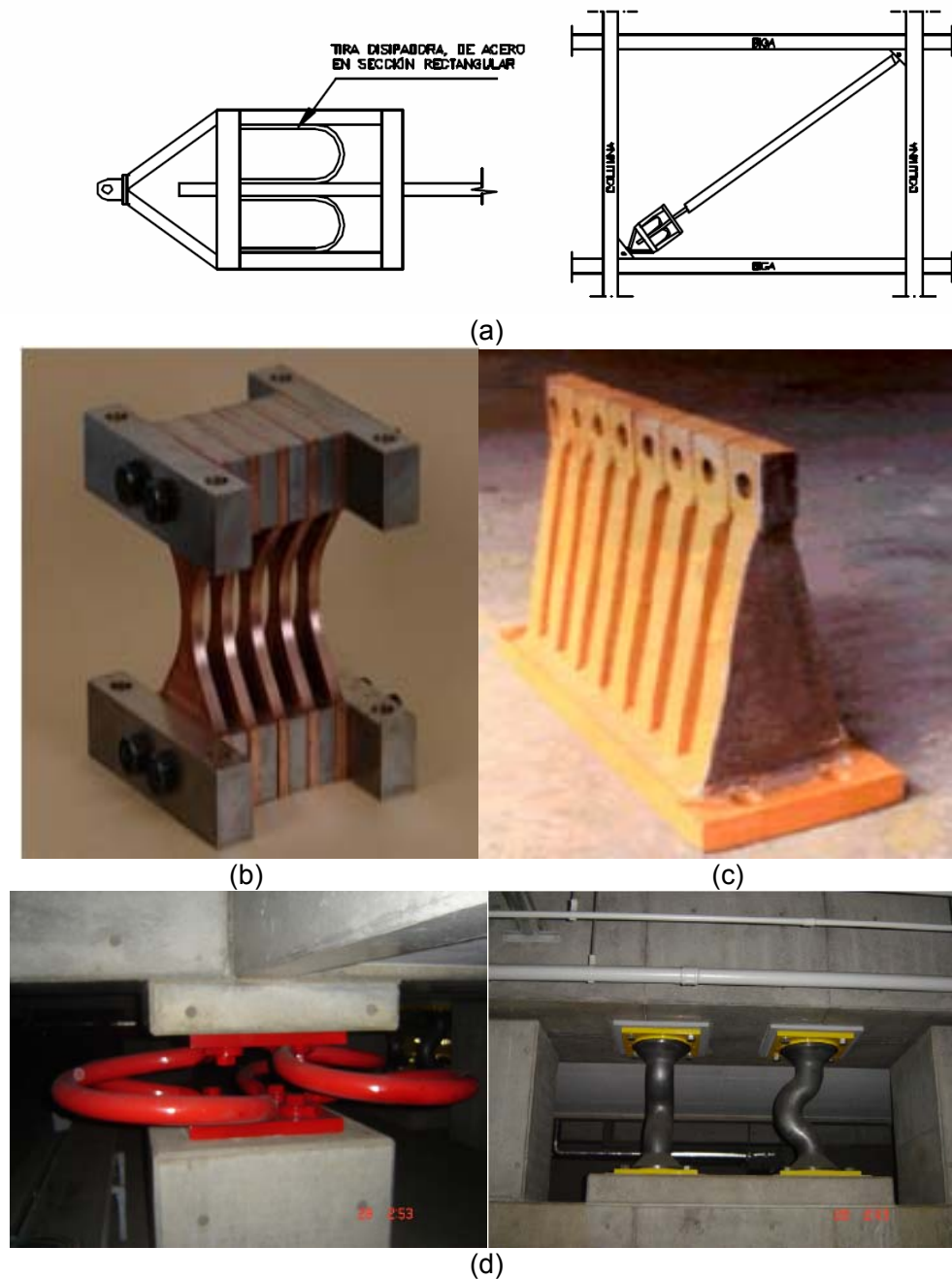


Figura 1.3. Dispositivos disipadores de energía metálicos. (a) Disipador por flexión. (b) ADAS. (c) TADAS. (d) Disipador por torsión. (Oviedo y Duque 2006)

Amortiguadores por fricción: son mecanismos para disipar energía, usado 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 2 cuerpos sólidos y permiten 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 son las 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 resultado, esta idea fue desarrollada por el Profesor Popov en 1989, a partir de ello se desarrollaron otros dispositivos como el DEFD (Disposable Elements Friction Dampers) en Macedonia pero con el mismo principio, hasta llegar a las conexiones pos-tensadas friccionantes conocidas como PFCD (Post-tensioned Friction Damper Connection) las cuales son sistemas auto-centrantes y que son capaces de disipar energía por medio del deslizamiento que existe 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)

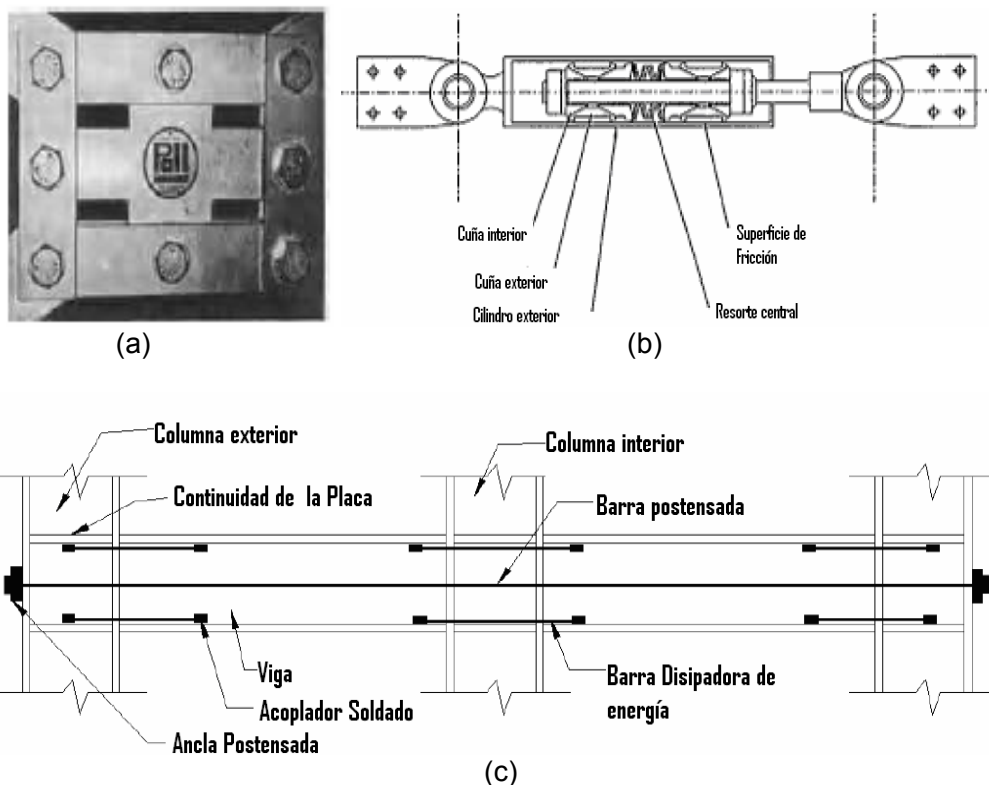


Figura 1.4. Dispositivos disipadores de energía por fricción. (a) Disipador tipo Pall. (b) Amortiguador de fricción. (c) Disipación tipo PFCD

Amortiguadores viscoelásticos: consiste 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 en México ya existen aplicaciones en la ciudad de México y es precisamente un edificio de la compañía transnacional 3M quien 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 surge de 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. En pruebas sísmicas a amortiguadores a escala completa y a otros amortiguadores más pequeños mostraron una deformación mayor al 300%. Estudios muestran 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 uso 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 los 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.

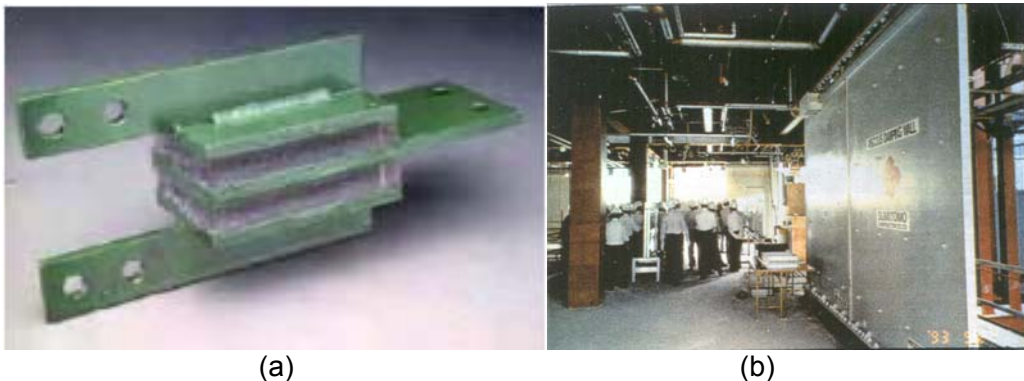


Figura 1.5. Dispositivos disipadores de energía viscoelásticos. (a) Disipador viscoelástico. (b) Muro viscoelástico

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

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 y en países como Japón, EEUU y otros, entre ellos México

Los amortiguadores reducen a 50 – 60 % la respuesta sin amortiguadores. Resultados experimentales muestran que los amortiguadores pueden reducir las demandas de deformación inelástica además reduce la cantidad de daño por un índice de deformación permanente monitoreado. (G.W. Housner et al1997).

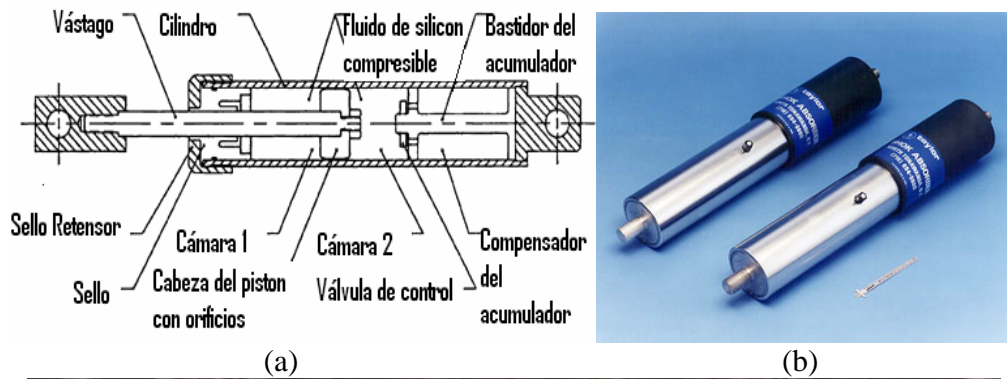


Figura 1.6. Dispositivos disipadores de energía con fluidos viscosos.
 (a) Esquema general. (b) Dispositivo tipo Taylor de baja fuerza de salida
 (c) Dispositivo tipo Taylor para puente de autopista (www.taylordevices.com)

Amortiguadores de líquido controlable (TLD) estos dispositivos proporcionan amortiguamiento de manera indirecta al sistema y mejora el desempeño. Los LTD (Tuned Liquid Damper) absorben energía estructural por medio de las acciones del fluido viscoso y la energía se disipa al pasar líquido a través de los 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 la Torre del Aeropuerto de Nagasaki con 25 amortiguadores. En pruebas se observa que la utilización de este dispositivo aumenta aproximadamente 5 veces el amortiguamiento de la estructura. También se ha implementado en la Torre Yokohama de la marina (G.W. Housner *et al* 1997).

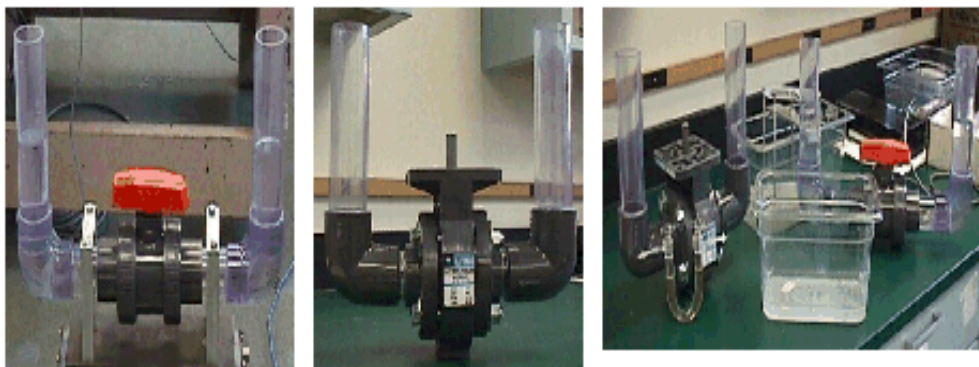


Figura 1.7. Dispositivos disipadores de energía tipo TLCD

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

Entre los principales aisladores de base se encuentran:

Elastoméricos laminados: consisten en placas de acero vulcanizadas con hule, que permiten desplazamientos horizontales y una cierta rigidez vertical (Figura 1.8 (a)).

Elastoméricos laminados con corazón de plomo: son placas de acero vulcanizadas con la diferencia que 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: consiste 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))

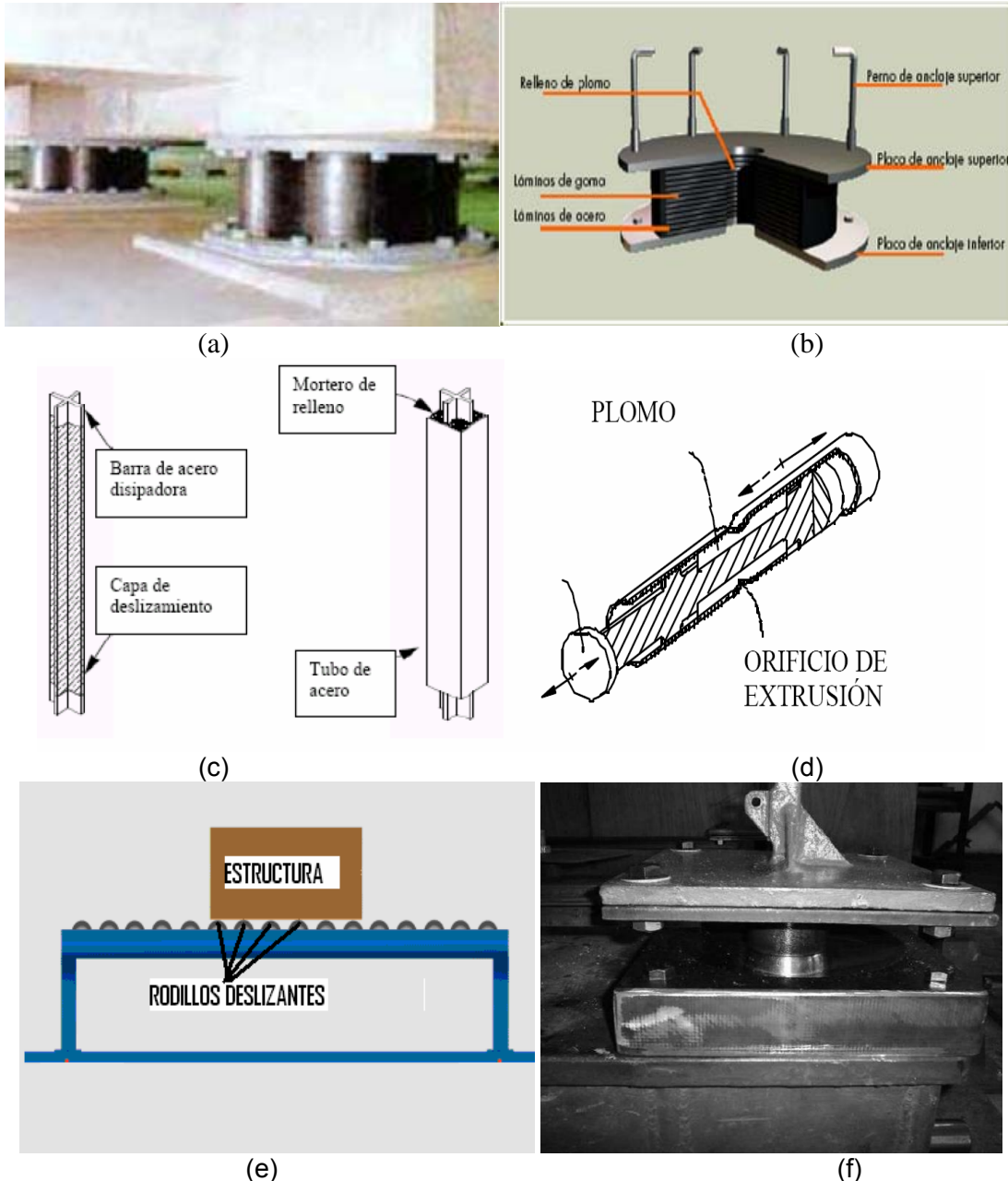


Figura 1.8. Aisladores de base. (a) Aisladores laminados. (b) Esquema de aisladores laminados con corazón de plomo. (c) Aislador histerético de acero con fluencia axial. (d) Disipador por extrusión. (e) Aislador deslizante (concepto) (f) Aislador de fricción

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, llegamos a que el modelo matemático sería la ecuación 1.1:

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

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. También existen límites y condiciones para las idealizaciones como $(k + \Delta k) \geq 0$ y como 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

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 en cables de puentes se propuso proteger los cables 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 podría reducir significativamente las vibraciones aerodinámicas. También se ha intentado colocar amortiguadores entre los techos de edificios altos durante sismos fuertes, (figura 1.9) para acoplar estructuras y hacerlas trabajar en conjunto. De igual forma se ha propuesto un amortiguador de hule con propiedades similares a los de un amortiguador viscoelástico desarrollado por Fujita. Inclusive para los cables de puentes se ha propuesto mejorar su comportamiento y consiste en bañar el cable con hule (G.W. Housner *et al* 1997).

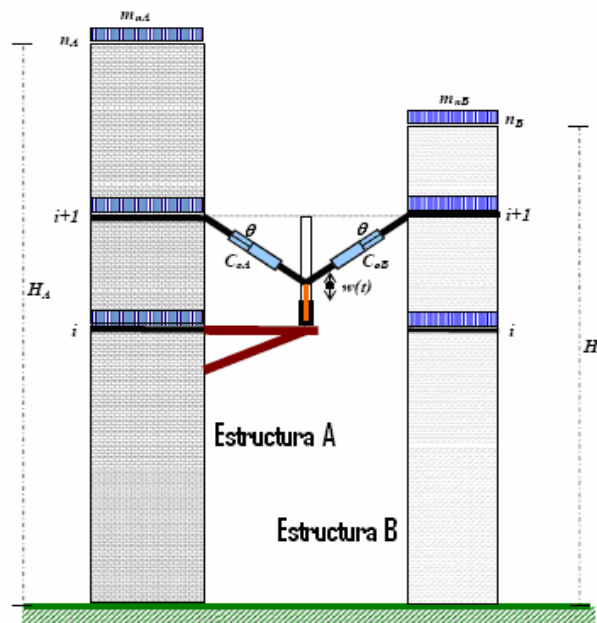


Figura 1.9. Dispositivos disipadores de energía novedosos. Acoplamiento de estructuras.

CONTROL ACTIVO

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

Esta técnica funciona bien en el control de edificios altos pero sólo ante vientos. Sin embargo para sismos resulta muy compleja su aplicación, ya que resulta difícil programar el comportamiento de estructuras y aun más que se lleve a cabo. 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 resulta catastrófico un pequeño error, ya que se puede desestabilizar el sistema por completo. También se debe tener cuidado con evitar desprestigiar 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 característica es 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), 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). Tiene como característica 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)). Tiene instalado un sistema AMD que consiste en 2 masas también conocidas como AMD's. La masa primaria es usada para el movimiento horizontal (4ton) y la secundaria pesa 1 ton y 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 controlado por motores. (Figura 1.12).

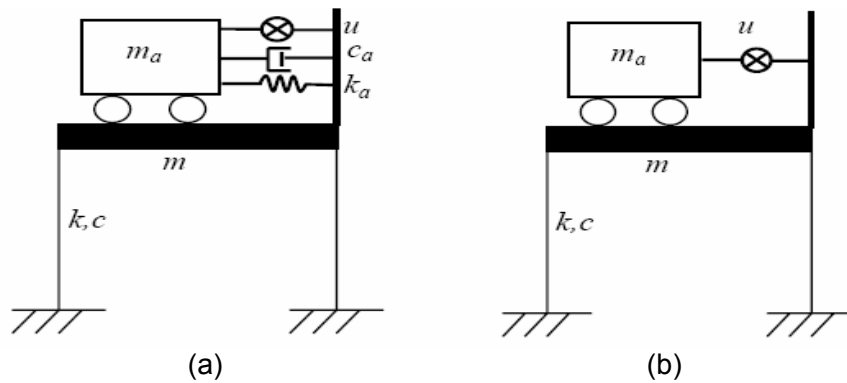


Figura 1.10. Modelado de control activo e híbrido. (a) HMD. (b) AMD

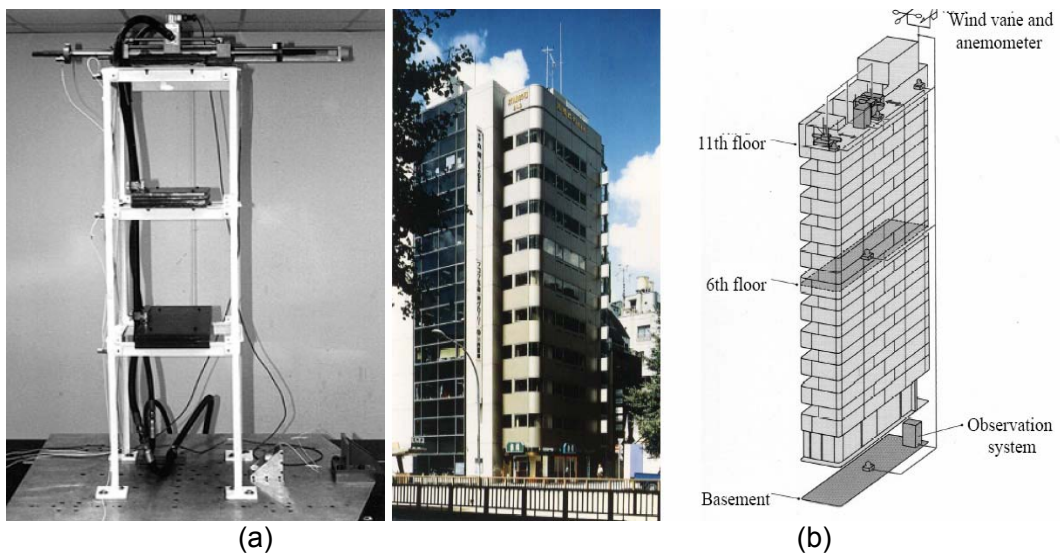


Figura 1.11. Implementación del control activo. (a) experimento AMD. (b) AMD implementado en Kyobashi Sheiwa

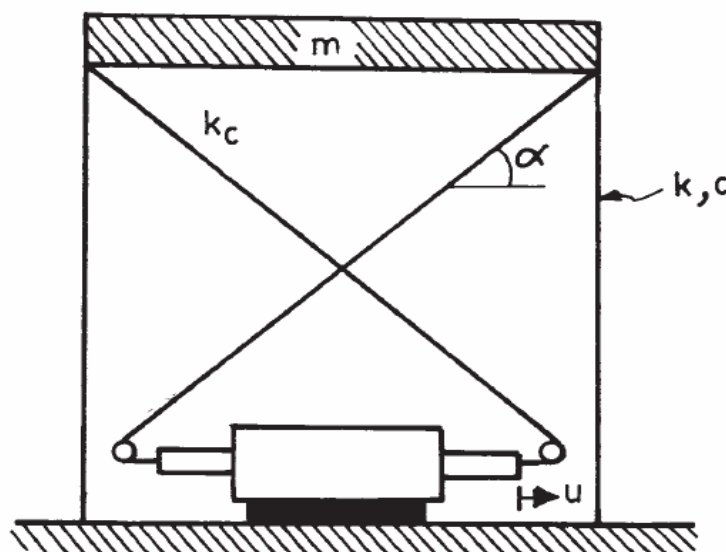


Figura 1.12. Esquema de tendón de control activo

CONTROL HIBRIDO

Técnica que 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, tratan de aliviar algunas restricciones y limitaciones que existen cuando sólo actúa uno; sin embargo esto resulta más complicado por lo general. 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 estudian mejora de 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 en el gasto 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

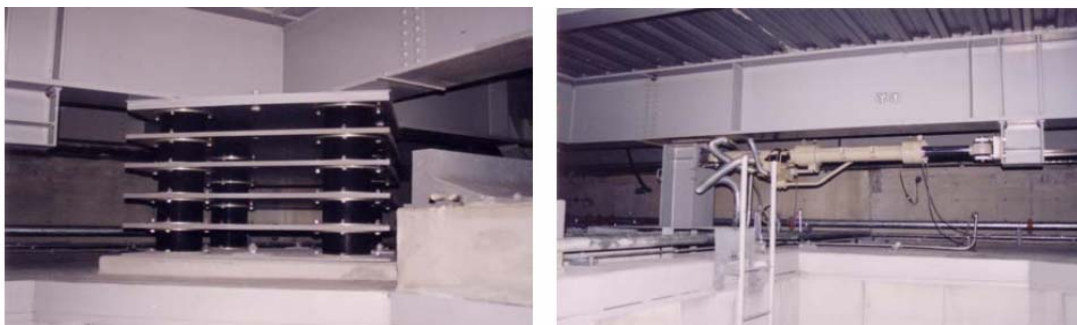


Figura 1.14. Aislamiento de base activo.

CONTROL SEMIACTIVO

Técnica que no puede inyectar energía mecánica dentro del sistema estructural; pero tiene dispositivos especiales que pueden controlar el comportamiento dinámico de la estructura óptimamente para reducir la respuesta del sistema. Es una clase de control activo el cual 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 después fue estudiado 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, y este experimento fue el primero en EEUU que se llevo a cabo 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 en 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 que esta rígidamente conectada con arrojamiento 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.

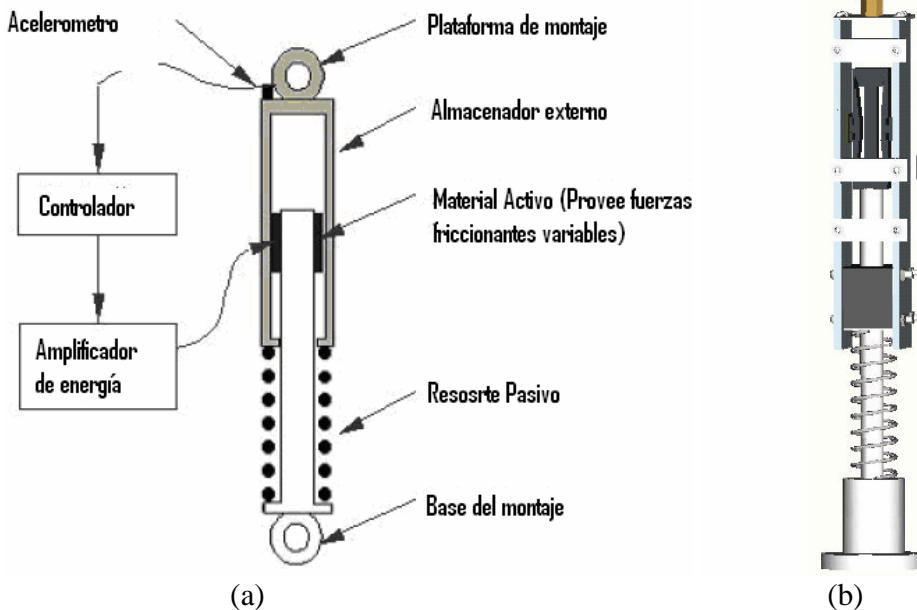


Figura 1.16 Amortiguador de fricción controlable. (a) Modelo. (b) Vista 3D

Dispositivos de rigidez variable

Amortiguadores de impacto semiactivo (Figura 1.17): estos dispositivos se han utilizado para reducir vibraciones y ruido en turbinas. En cuanto a investigación de estos dispositivos Masri y Yang (1973) estudiaron el comportamiento del desempeño de los amortiguadores de impacto ante excitaciones de sismos, de donde se puede afirmar que cuando propiamente es diseñado, aliviana algunas deficiencias de las estructuras y tiene 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

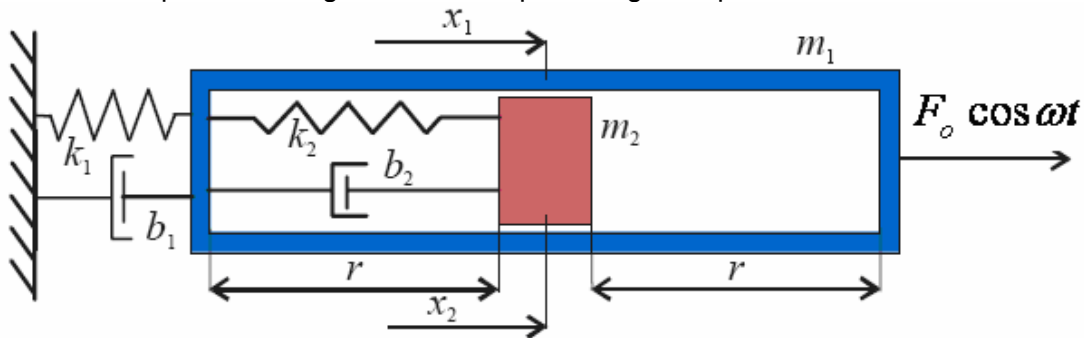


Figura 1.17 Esquema de amortiguador de impacto

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 es controlar las vibraciones del sistema por medio de una columna de líquido o fluido, sin embargo 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. Haroun et al (1994) presenta un aparato basado en TLC pero con orificio variable.

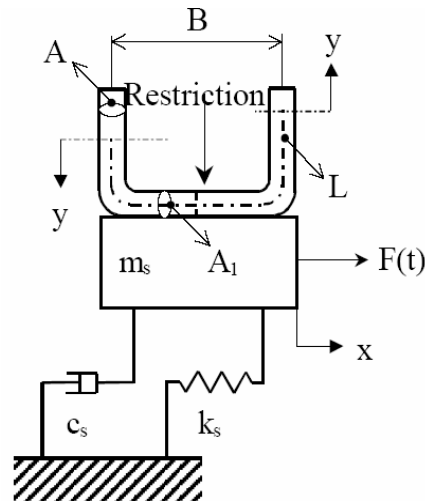


Figura 1.18 Esquema de amortiguador de líquido controlable (TLCD)

Amortiguador de fluido controlable: la ventaja de este aparato de fluido controlable es que solamente se mueve el pistón. Esta característica los hace muy seguros. 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

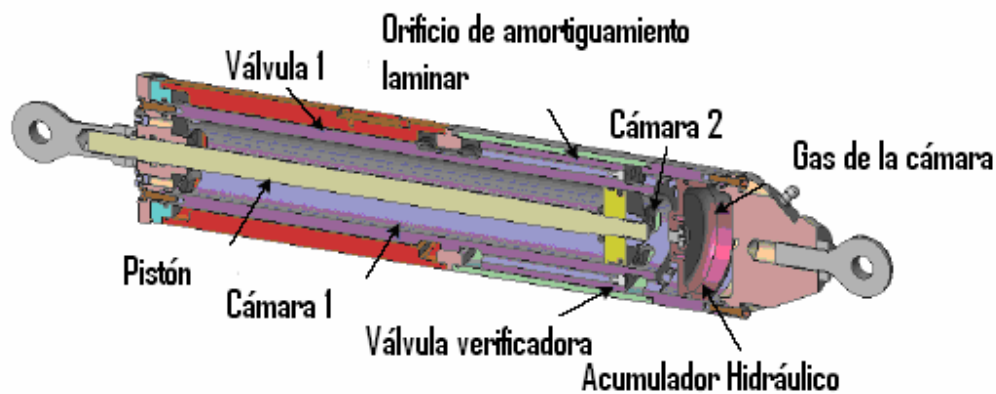


Figura 1.19 Sección transversal del amortiguador ER

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. Dichos reportes muestra que los aparatos son

escalables para aplicaciones en ingeniería civil. A partir de ello el futuro de los aparatos MR para la aplicación en ingeniería civil parece ser brillante.

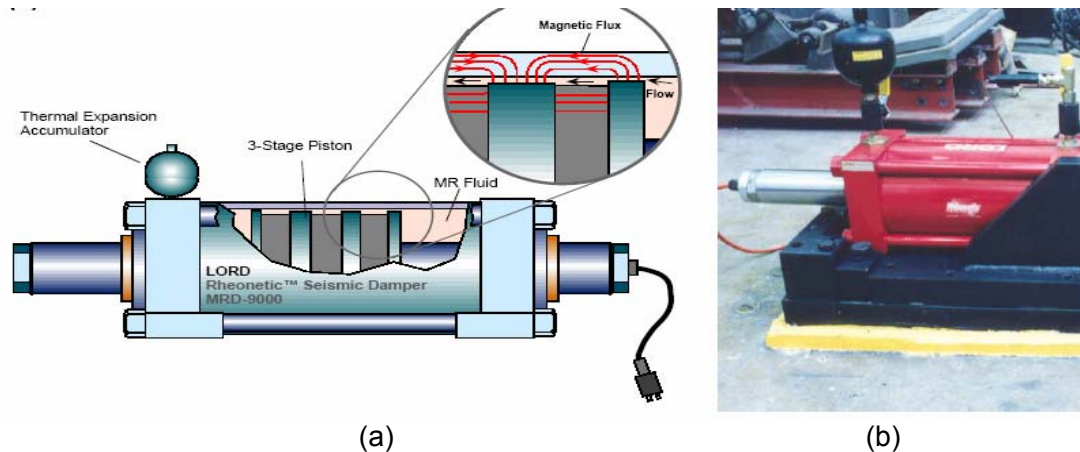


Figura 1.20 Amortiguador MR. (a) Sección transversal. (b) Dispositivo real.

DISIPACIÓN DE ENERGÍA PASIVA

Todas las estructuras disipan energía por esfuerzos, fricción, agrietamiento, deformación plástica, etc. Los métodos para incrementar la disipación de energía son muy efectivos para reducir vibraciones y muchos métodos 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.

CONTROL ESTRUCTURAL

El control estructural se define como aquel sistema mecánico instalado en una estructura para reducir vibraciones estructurales durante perturbaciones externas proporcionando 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) (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.

CONTROL ESTRUCTURAL CENTRALIZADO Y DESCENTRALIZADO

El control estructural resulta efectivo para mejorar el comportamiento de las estructuras civiles. Resulta 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 la clasificación antes mencionada:

CONTROL CENTRALIZADO: control en el cual existe sólo una estación que distribuye las fuerzas de reacción a cada uno de los dispositivos de control de la estructura (Figura 1.21).

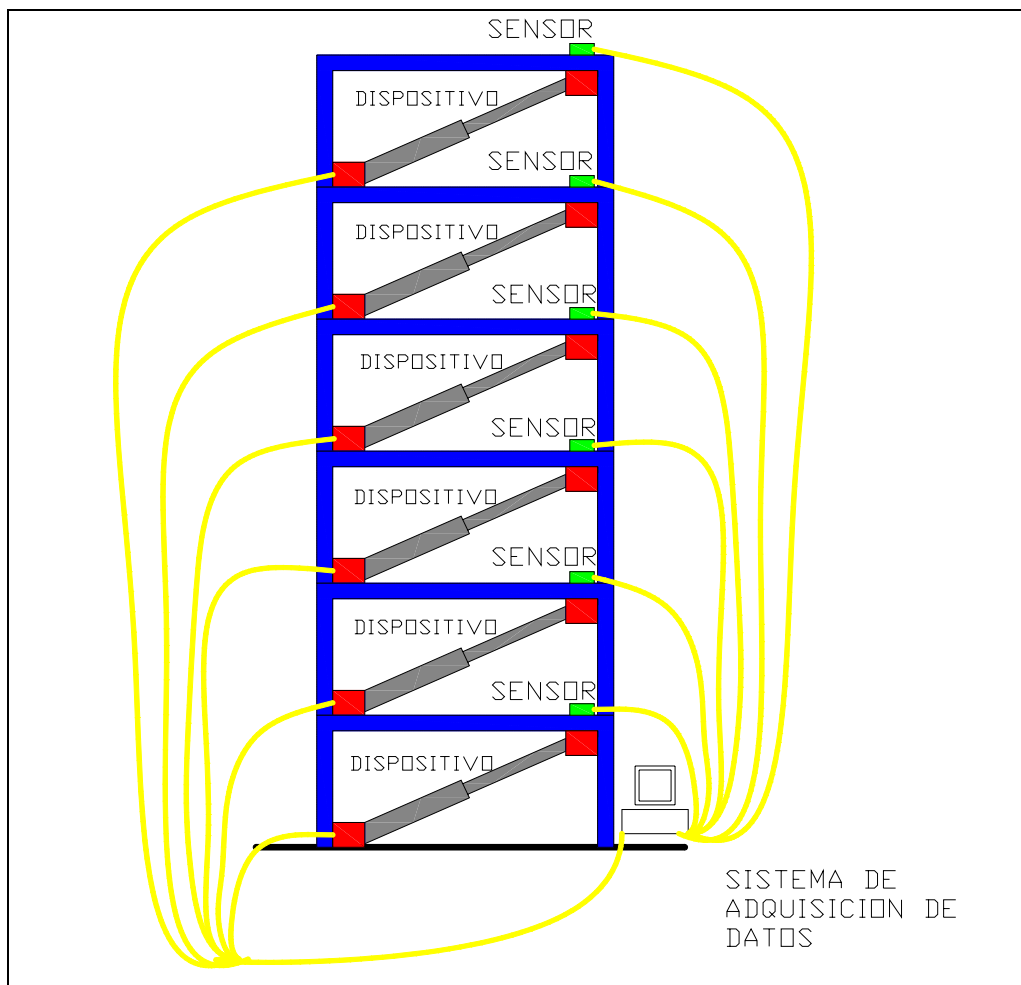


Figura 1.21 Esquema de control centralizado.

CONTROL PARCIALMENTE DESCENTRALIZADO: Control en el cual existen varias estaciones que distribuye las fuerzas de reacción a los dispositivos. La distribución de las fuerzas corresponden a cada arreglo del subsistema de control de la estructura (Figura 1.22).

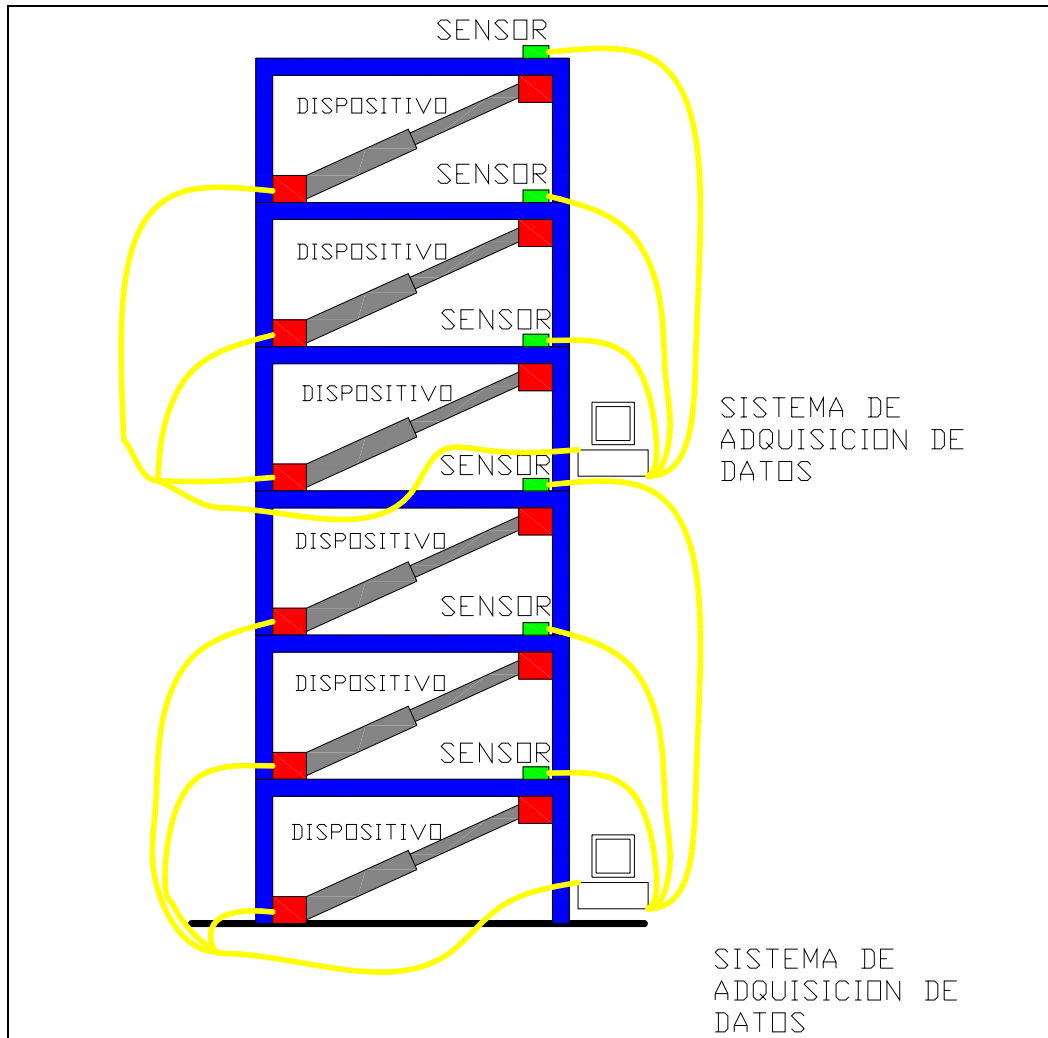


Figura 1.22 Esquema de control parcialmente centralizado

CONTROL DESCENTRALIZADO: 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).

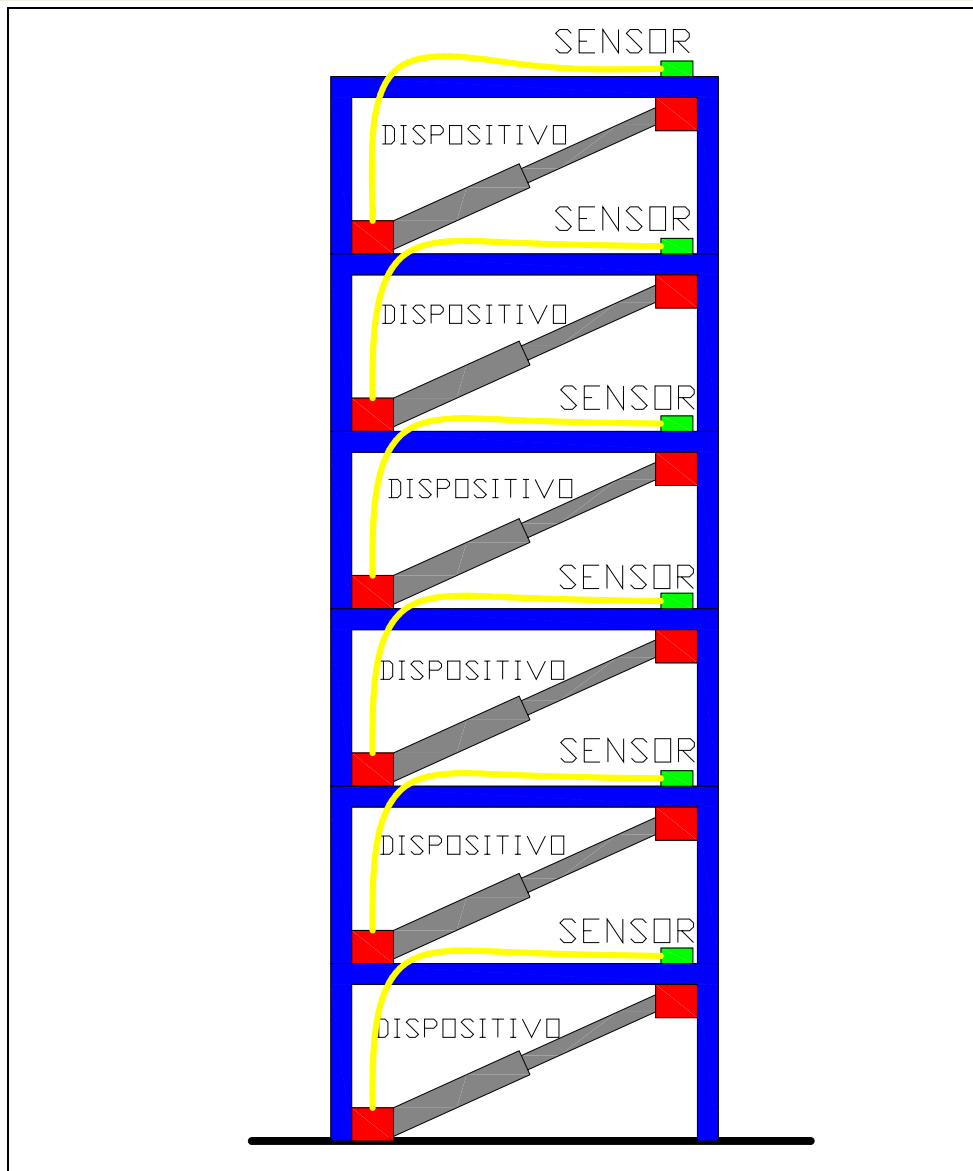


Figura 1.23 Esquema de control descentralizado

ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Esta tesis pretende determinar un algoritmo de control descentralizado para marcos planos. Se retoman conocimientos básicos de la teoría del control mostrados brevemente en los temas de la introducción. En esta, se hace una revisión estado del arte acerca de los avances e intereses por parte de la ingeniería estructural para implementar el control estructural. Esta acción puede disminuir el daño e incrementar el confort de los habitantes.

La tesis se divide en 2 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 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.

En el capítulo 5 se lleva a cabo la implementación del control semiactivo centralizado y se determinan las respuestas máximas en los modelos determinados en el capítulo 3.

En el capítulo 6 se implementa el control 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 el capítulo 8 se concluye a partir de comparar las respuestas máximas de los modelos seleccionados ante distintos controles, y permite describir las ventajas y desventajas de la propuesta presentada en el capítulo 7. Se proponen estudios futuros.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS DEL CONTROL ACTIVO, PASIVO Y SEMIACTIVO.

GENERALIDADES

En este capítulo se explican los fundamentos generales de la teoría del control aplicado a las estructuras, es decir, se presenta 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 conocimientos están basados en el control moderno, el cual utiliza la representación de estados, dicha representación se define más adelante.

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

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

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.

$$\dot{z} = Az + Bu \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde A y B son matrices constantes de dimensiones apropiadas.

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

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

CONTROL ESTRUCTURAL MODERNO

Existen 2 configuraciones para representar el control estructural, como se mencionó en el Capítulo 1, sin embargo, para esta investigación se utiliza en 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 obtiene 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 $2n \times 2n$, B representa las entradas con dimensiones de $2n \times r$, C indica las salidas requeridas en matrices de $m \times 2n$ y finalmente D expresa las matrices de transferencia de $m \times r$. Siendo n el número de grados de libertad (GDL), r el número de fuerzas de control y m el número de salidas

Un sistema no lineal es similar y se presenta en las ecuaciones 2.5 y 2.6. 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. 2.5 y 2.6

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

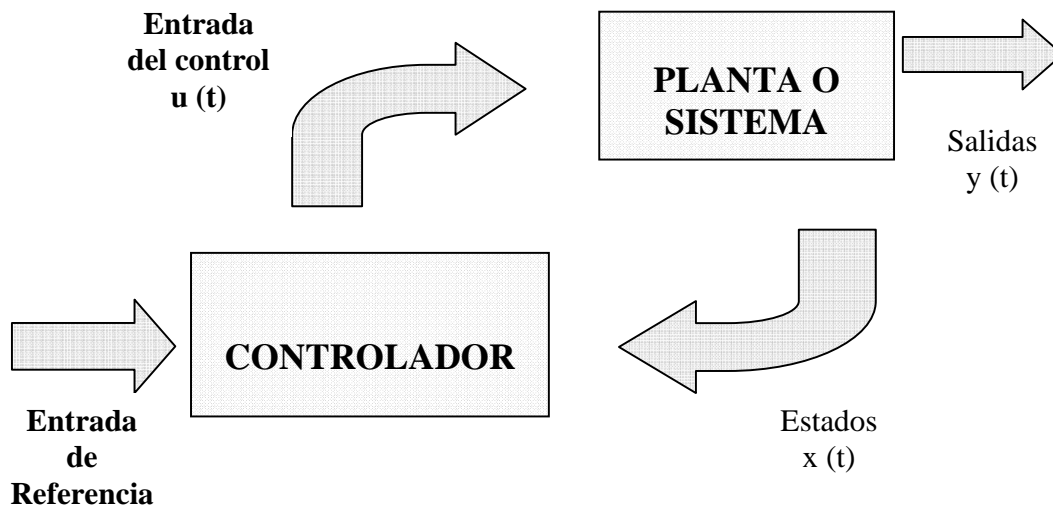


Figura 2.1.- Esquema de configuración Moderna (MIMO)

El objetivo principal del control estructural no sólo es proporcionar fuerzas en una estructura, ya que 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 mas adelante.

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 para una estructura es a base de cumplir ciertas condiciones. Estas se pueden medir con la efectividad del índice de desempeño definida por la ecuación 2.7. En dicha ecuación el índice es dividido en 2 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).

$$J = J_1 * [x(t_0), x(t_f), t_0, t_f] + \int_{t_0}^{t_f} J_2(x, \dot{x}, u, \dot{u}, t) dt \quad \text{Ec. 2.7}$$

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 $t_0 = 0$ con lo que la ecuación 2.7 se reduce a la 2.8.

$$J = \int_0^{t_f} [x^T(t) * Q * x(t) + x^T(t) * R * u(t)] dt \quad \text{Ec. 2.8}$$

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 indican 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 optimo 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 la 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 puede 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.
- Se aplica el principio de Lemma (basado en el cálculo de variaciones)
- Finalmente se encuentra una ecuación diferencial llamada ecuación de Euler-Lagrange.

Entre las opciones que proporcionan las variaciones, son que encontrar los máximos y mínimos a partir de la segunda variación. Sin embargo existen métodos directos que consiste en solucionar las ecuaciones diferenciales conocido como método directo sin embargo para problemas de orden superior la solución no es muy viable.

Para obtener valores extremos óptimos a parte del método directo existe 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 4 sistemas diferentes que consisten en:

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

Los sistemas mencionados se pueden representar en la figura 2.2. 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, sin embargo 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).

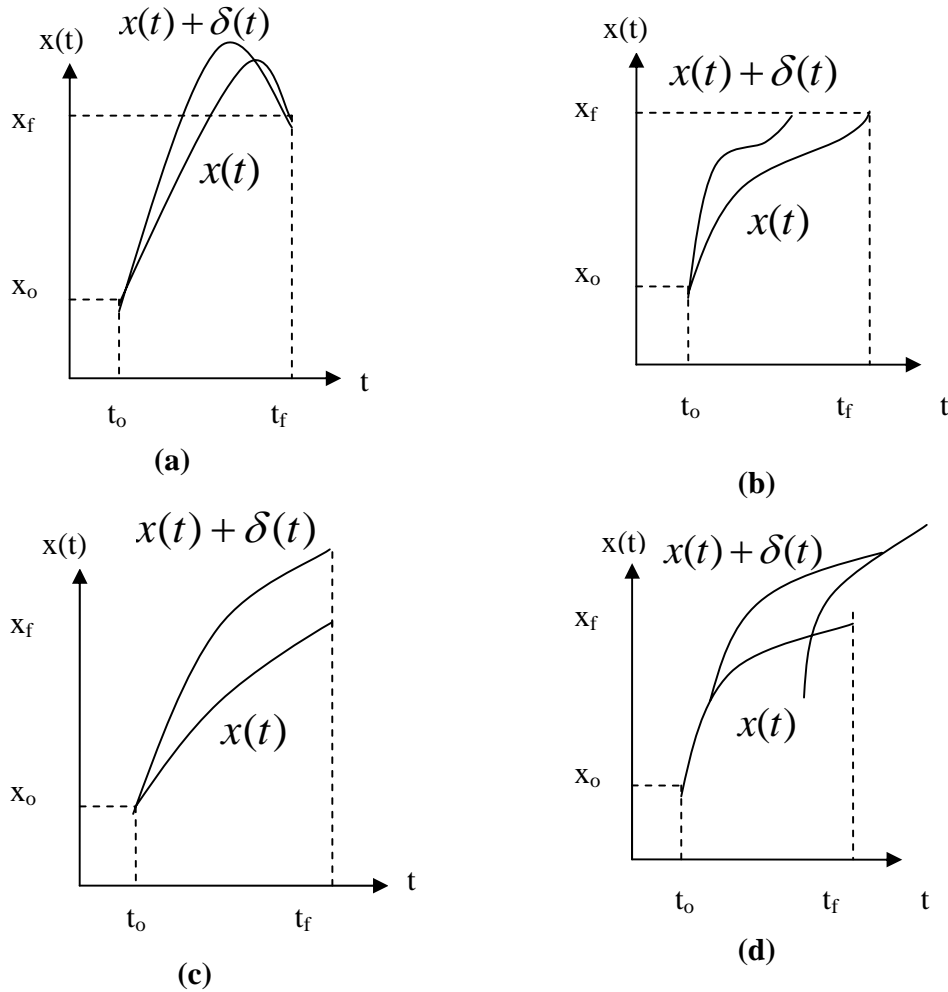


Figura 2.2 Sistemas que son regidos por las condiciones de frontera.

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 2.9 y 2.10. 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. 2.9, 2.10

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.

SOLUCIÓN DEL CONTROL (LQR)

Existen diferentes funciones que permiten dar solución óptima al control, sin embargo el más usado 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 2.11

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + DW(t) \quad \text{Ec. 2.11}$$

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 fuerzas 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 representa la localización de los actuadores y las cargas externas respectivamente.

La matriz A define la estabilidad del sistema, los valores característicos permiten observar si la respuesta dinámica es incontrolada o estable. Dicho de otro modo, si los valores caen del lado izquierdo del plano del sistema dinámico la respuesta es estable, sin embargo si caen del lado derecho se obtienen números complejos y la respuesta resulta incontrolable 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 estructural $Y(t)$ y minimizar la respuesta del control de entrada $U(t)$ para la ecuación J

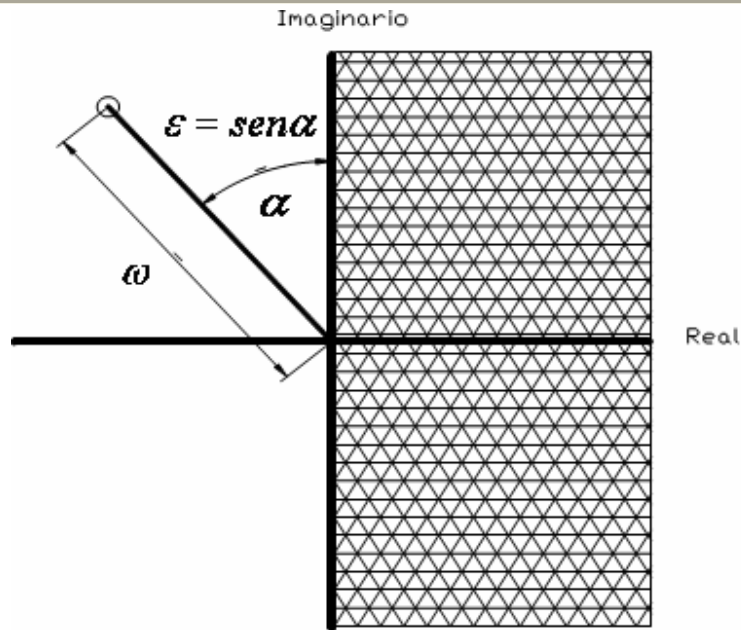


Figura 2.3 Comportamiento de las soluciones del control. Polos y zeros en el espacio real e imaginario

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 abierto (Open-Loop), en la figura 2.4 se presenta un diagrama de este tipo, sin embargo se presentan 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.

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 2.12. 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.

$$m * \ddot{x} + c * \dot{x} + k * x = f(t) \quad \text{Ec. 2.12}$$

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 abierto (Figura 2.4) y basados en la ecuación de movimiento (EC 2.12). 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.

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 2.12. Dicha variable es la fuerza aplicada al sistema, representada por $u(t)$ en la ecuación 2.13.

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = f(t) + u(t) \quad \text{Ec. 2.13}$$

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 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 un solución óptima descrita en este capítulo y finalmente se le comunica al actuador la fuerzas que se le debe aplicar a la estructura para mejorar su desempeño.

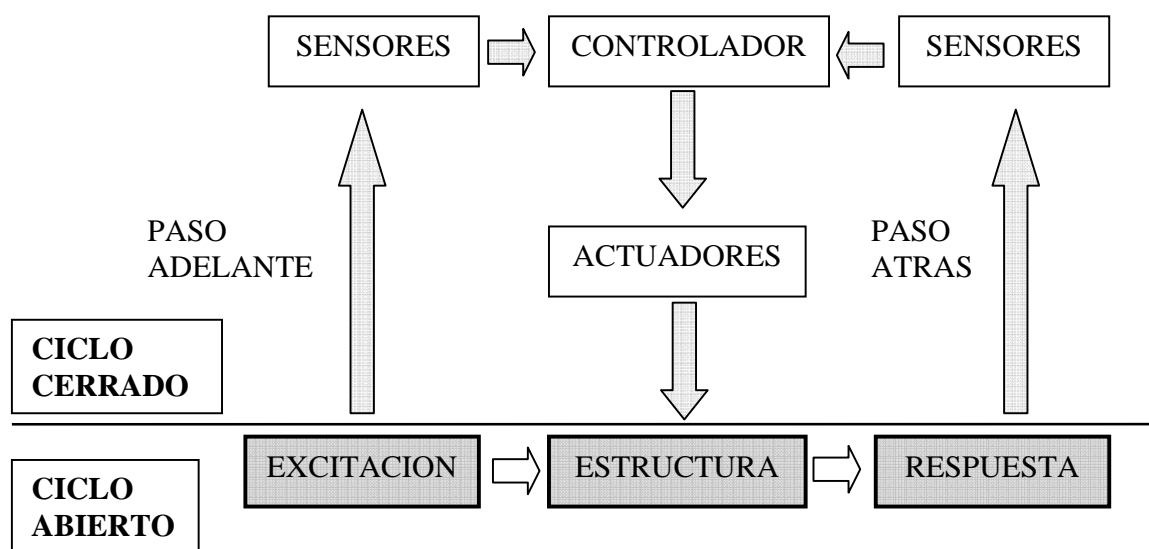


Figura 2.5 Esquema de control activo. Ciclo cerrado.

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 completamente activos. Este aparato no tiene el potencial para desestabilizar el sistema.

Finalmente el control semiactivo se puede ver 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 2.14.

$$M_s * \ddot{x} + C_s * \dot{x} + K_s * x = \Lambda f - M_s * \Gamma * \ddot{x}_g \quad \text{Ec. 2.14}$$

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.

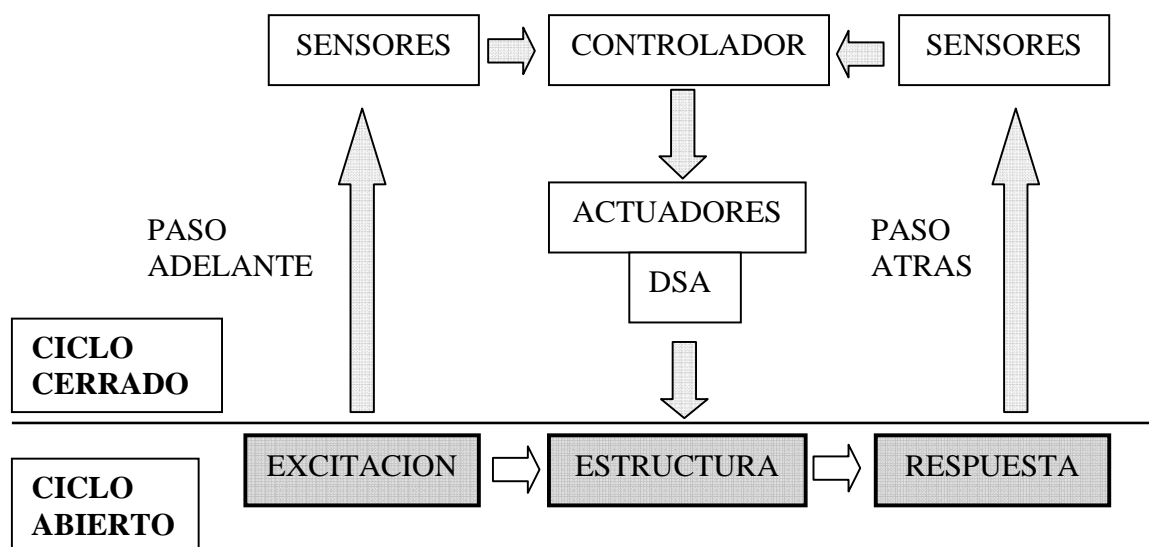


Figura 2.6 Esquema de control semiactivo. Ciclo cerrado.

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.

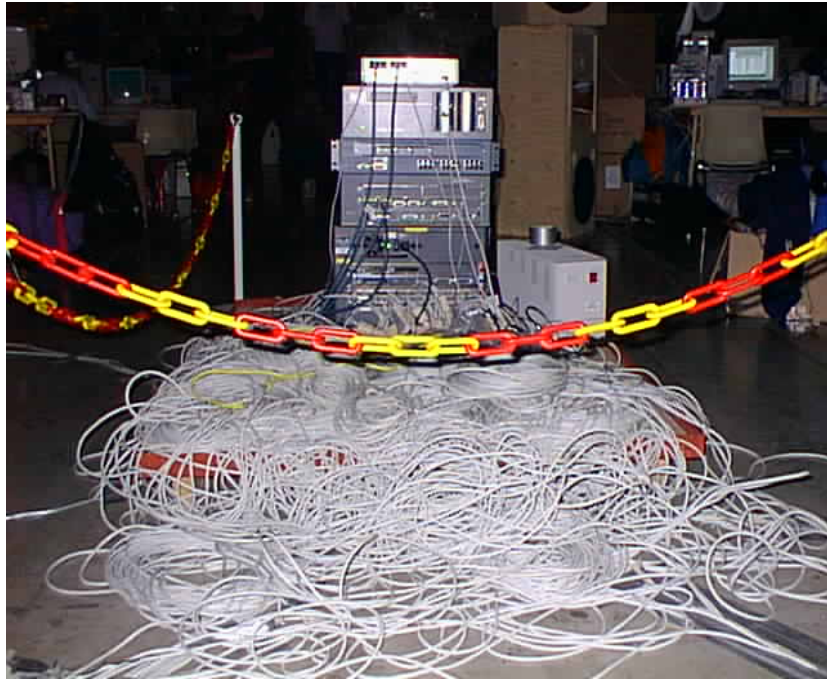


Figura 2.7 Escenario usual de adquisición de datos con control centralizado

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.

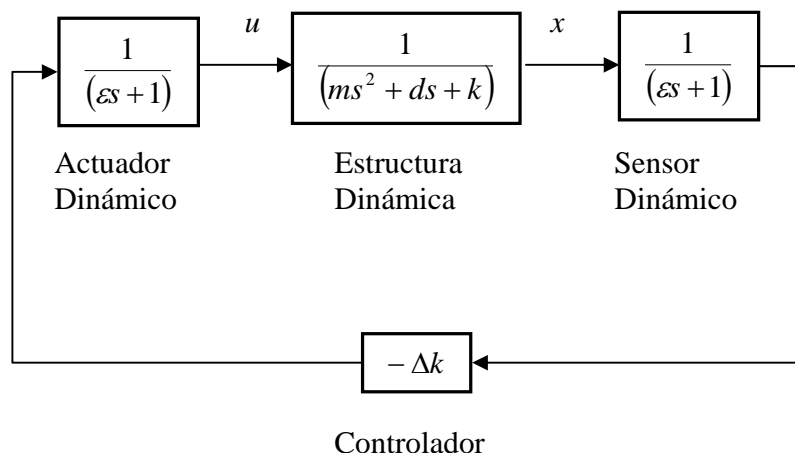


Figura 2.8 Diagrama de flujo para control activo.

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 2 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, sin embargo 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. Sin embargo 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 computacionales 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

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 el estudio constante de estructuras tanto de pequeña como de gran altura. La división de este estudio se presenta porque para el diseño de estructuras relativamente bajas, el periodo dominante en excitaciones dinámicas, es el obtenido por la primera forma modal. Sin embargo para estructuras suficientemente altas el diseño es dominado por combinaciones modales. A partir de esto se decidió tomar 2 estructuras que representaran cada una de estas.

Para la estructura baja altura, se selecciona la utilizada por Kurata et al (1999) de 5 niveles. Esta estructura tiene implementado el sistema de control semiactivo centralizado. Por otro lado se seleccionó el proyecto 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 2 estructuras utilizadas y las simplificaciones hechas en cada una de ellas.

MODELO DE 5 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 5 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 8 dispositivos colocados con el arreglo de contravientos mostrado en la figura 3.2 en los primeros 4 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, es decir, se modela como arreglo de resortes en serie.

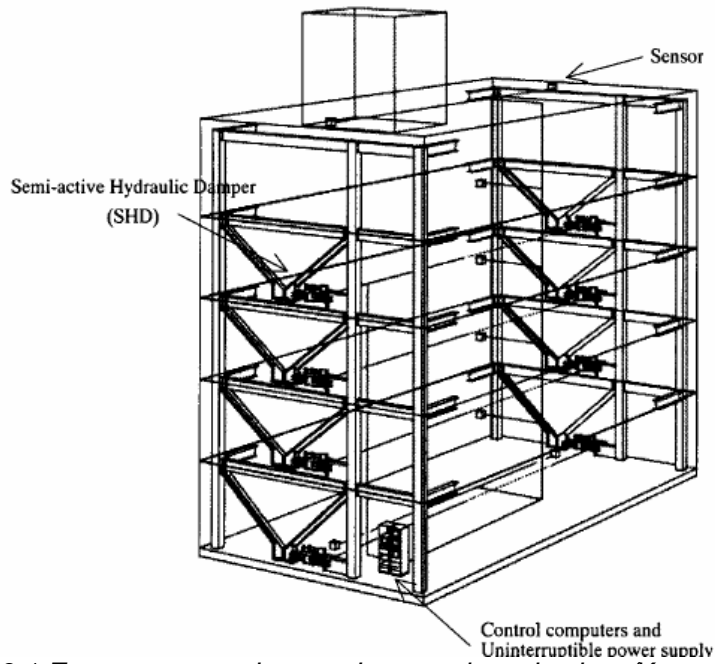
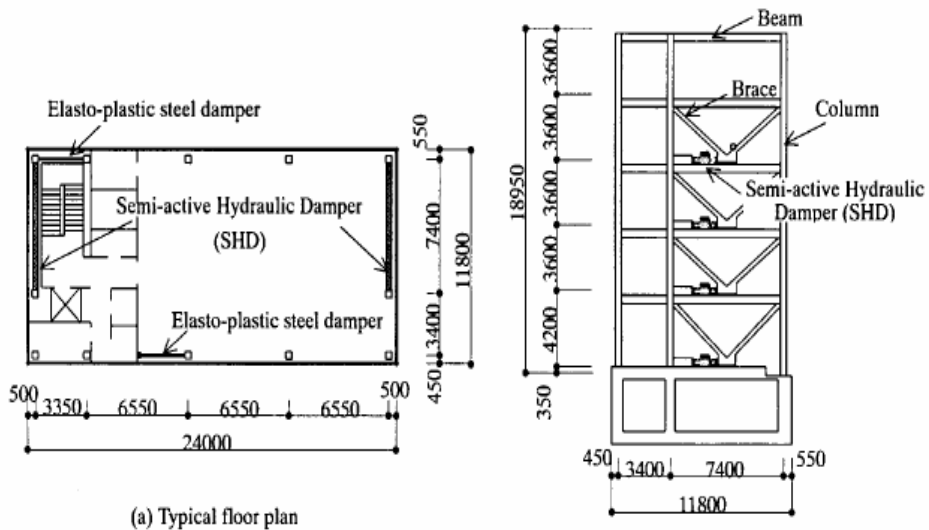
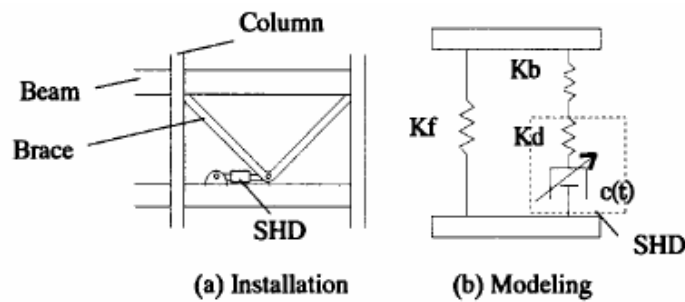


Figura 3.1 Estructura con sistema de control semiactivo (Kurata et al 1999)



(a) Typical floor plan

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



(a) Installation

(b) Modeling

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.

Tabla 3.1 Propiedades del modelo analítico
Propiedades del modelo analítico de 5 Niveles

Nivel	Masa (Kg.)	Rigidez		
		Marco kN/mm	Contraviento kN/mm	Dispositivo 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

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).

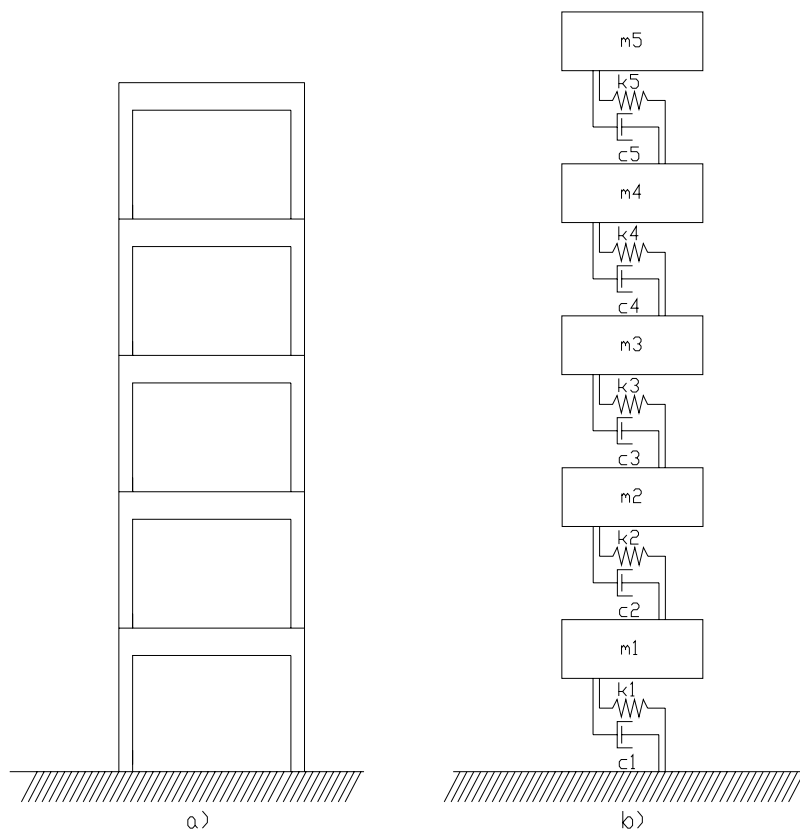


Figura 3.4 Modelo estructural y su representación esquemática

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.

Tabla 3.2 Propiedades dinámicas del modelo analítico

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

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).

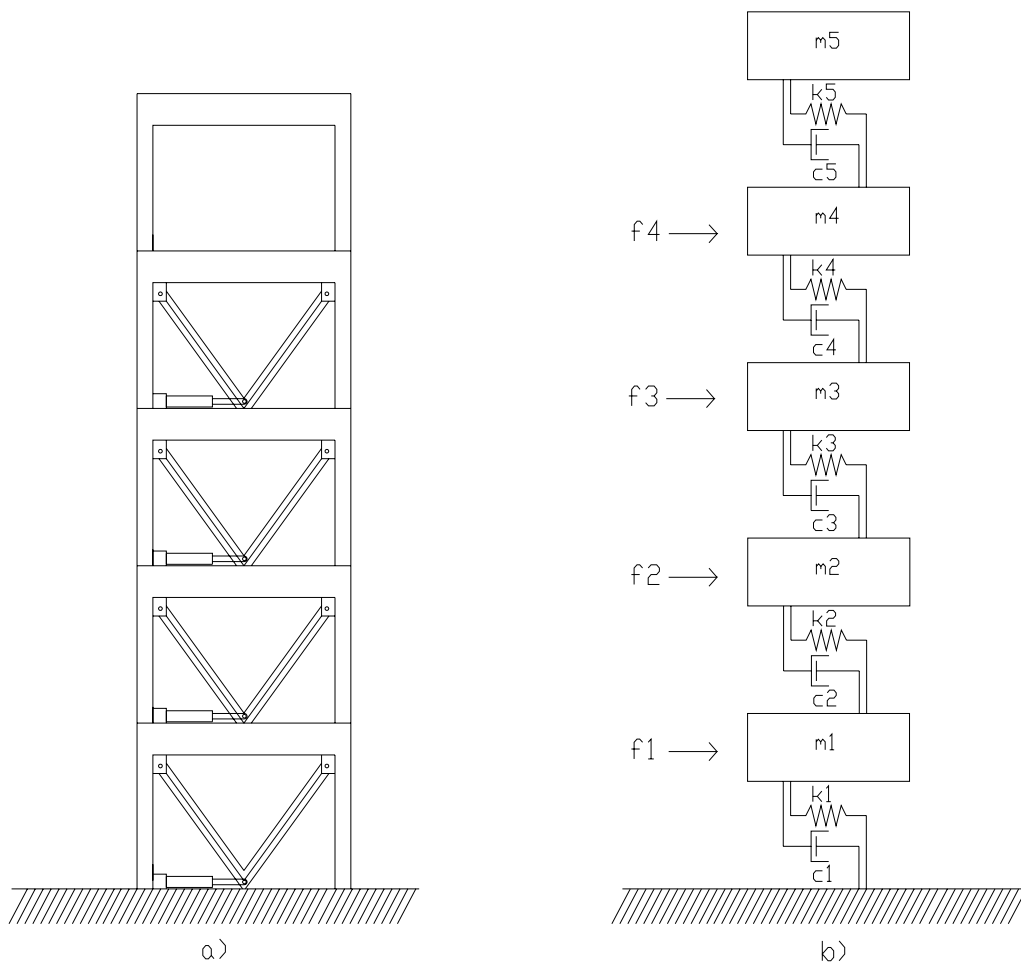


Figura 3.5 Modelo con control estructural y su representación esquemática simplificada

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 seleccionada, es decir, se puede verificar la efectividad del control implementado en estructuras que van de mediana a gran altura.

La estructura de 20 niveles, esta 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 5 niveles, con el arreglo mostrado en la figura 3.3.

El modelo analítico elaborado para este trabajo, se basa 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 las deformaciones que se presentan sólo se toman en cuenta como elásticas.

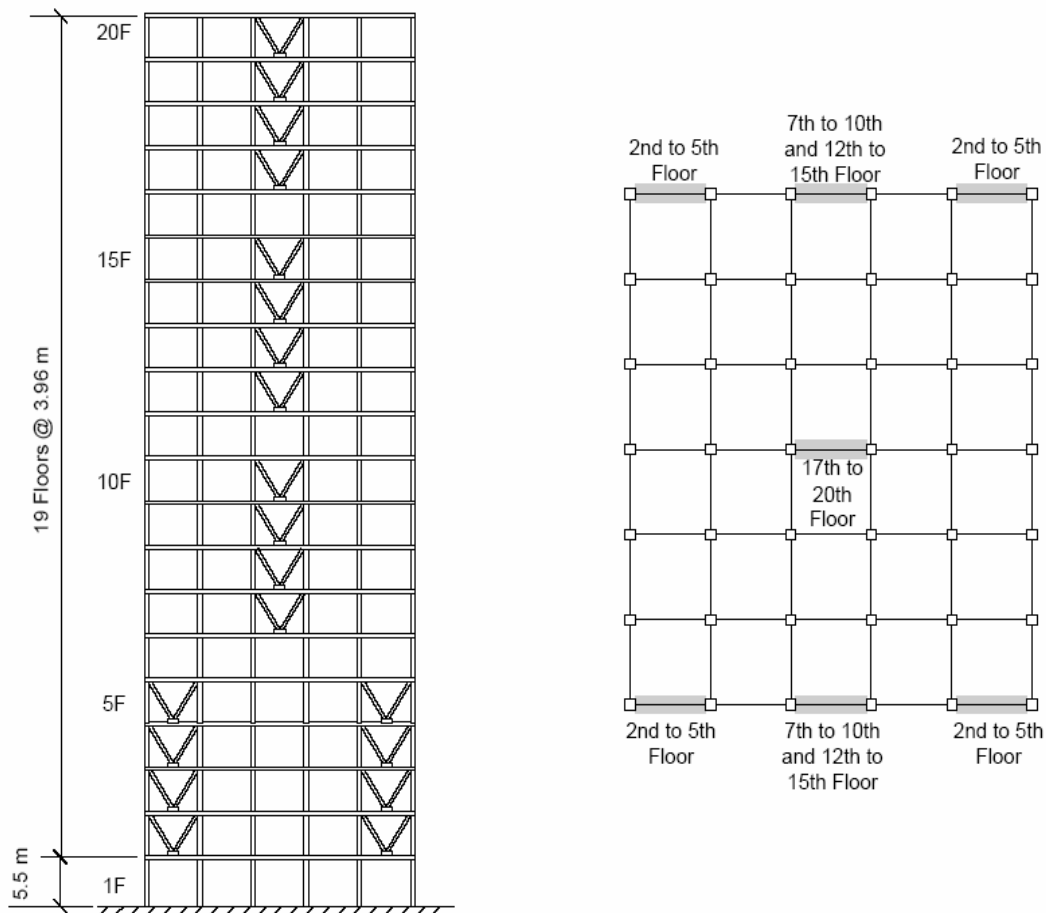


Figura 3.6 Estructura Benchmark y la ubicación de los dispositivos (Lynch 2002)

Tabla 3.3 Propiedades de estructura SAC de 20 Niveles

Estructura 20 Niveles					
Nivel	Masa kg	Rigidez kN/mm			Numero de dispositivos
		Marco	Contraviento	Dispositivo	
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

El modelo dinámico se representa por masas conectadas por resortes con un amortiguamiento equivalente, mostrado en la figura 3.7 (b). Por otro lado 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 se 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 5 formas modales.

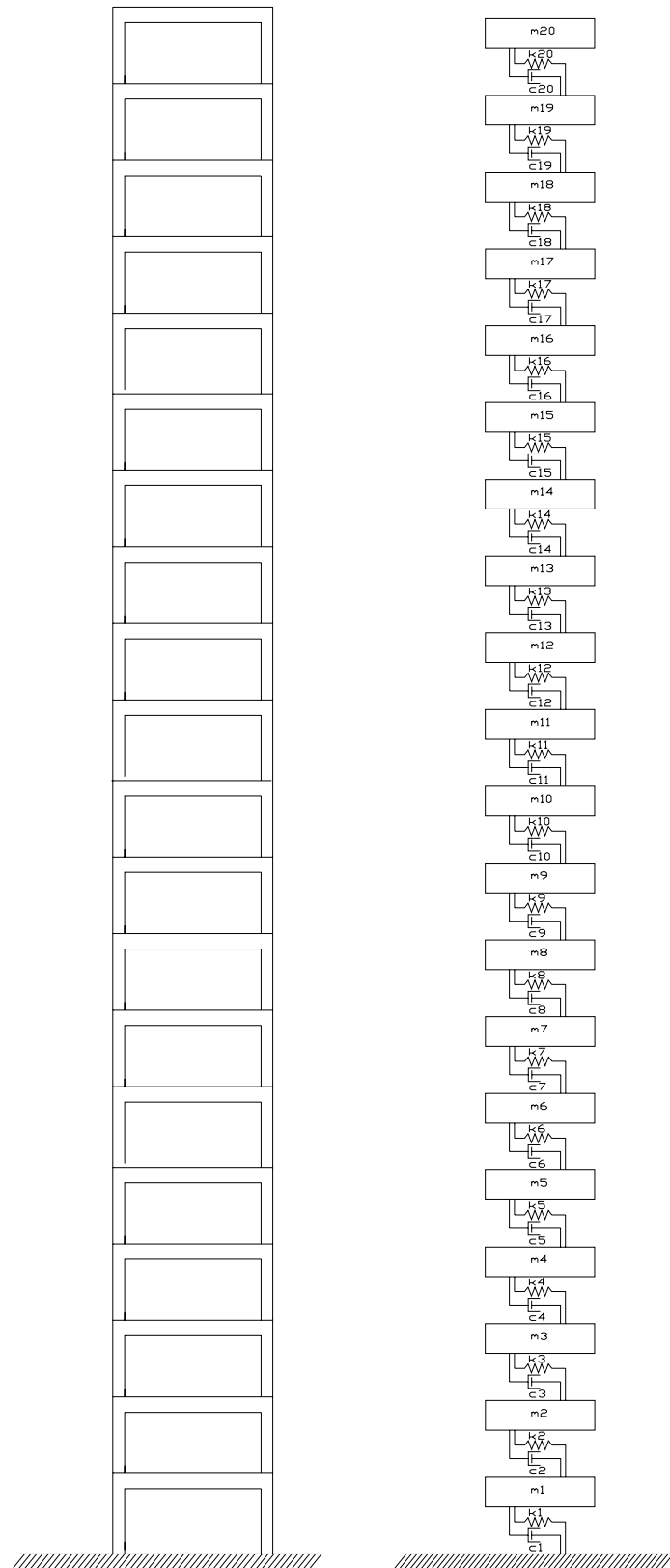


Figura 3.7 Modelo sin control estructural y su representación esquemática

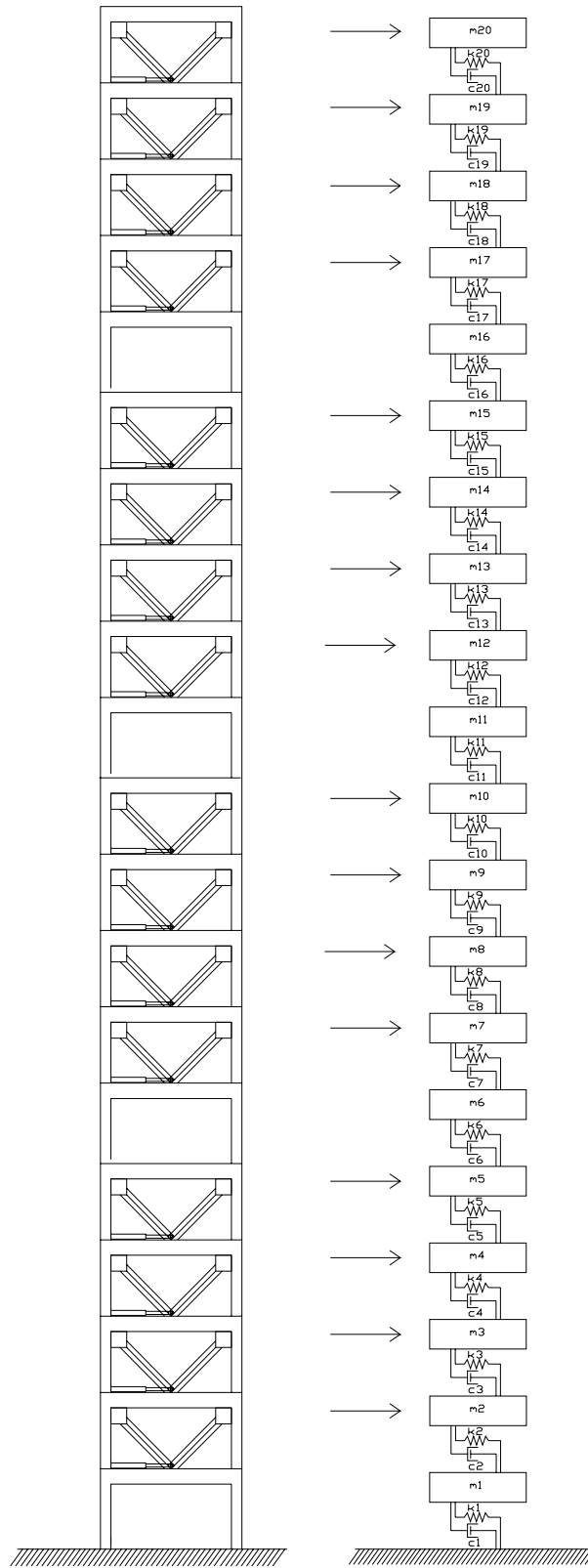


Figura 3.8 Modelo con control estructural y su representación esquemática

Tabla 3.4 Propiedades dinámicas de estructura SAC de 20 niveles

Estructura 20 niveles		
Modos	Frecuencia Hz	Amortiguamiento %
1	0.28214	5
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	
11	4.3875	
12	4.7396	
13	4.9526	
14	5.4362	
15	5.8821	
16	6.1962	
17	6.5576	
18	6.9197	
19	7.603	
20	8.5019	

La determinación de los modelos es parte muy importante en esta investigación ya que básicamente apunta hacia donde va encaminado este estudio. En este caso se comienza el estudio en una estructura sencilla, real y de baja altura y posteriormente se estudia una más compleja aunque sólo sea un proyecto. Sin embargo cabe mencionar que como en toda investigación, se obvian muchos detalles que orillan a simplificar los modelos.

SISMOS UTILIZADOS

Se emplean 3 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 3 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.

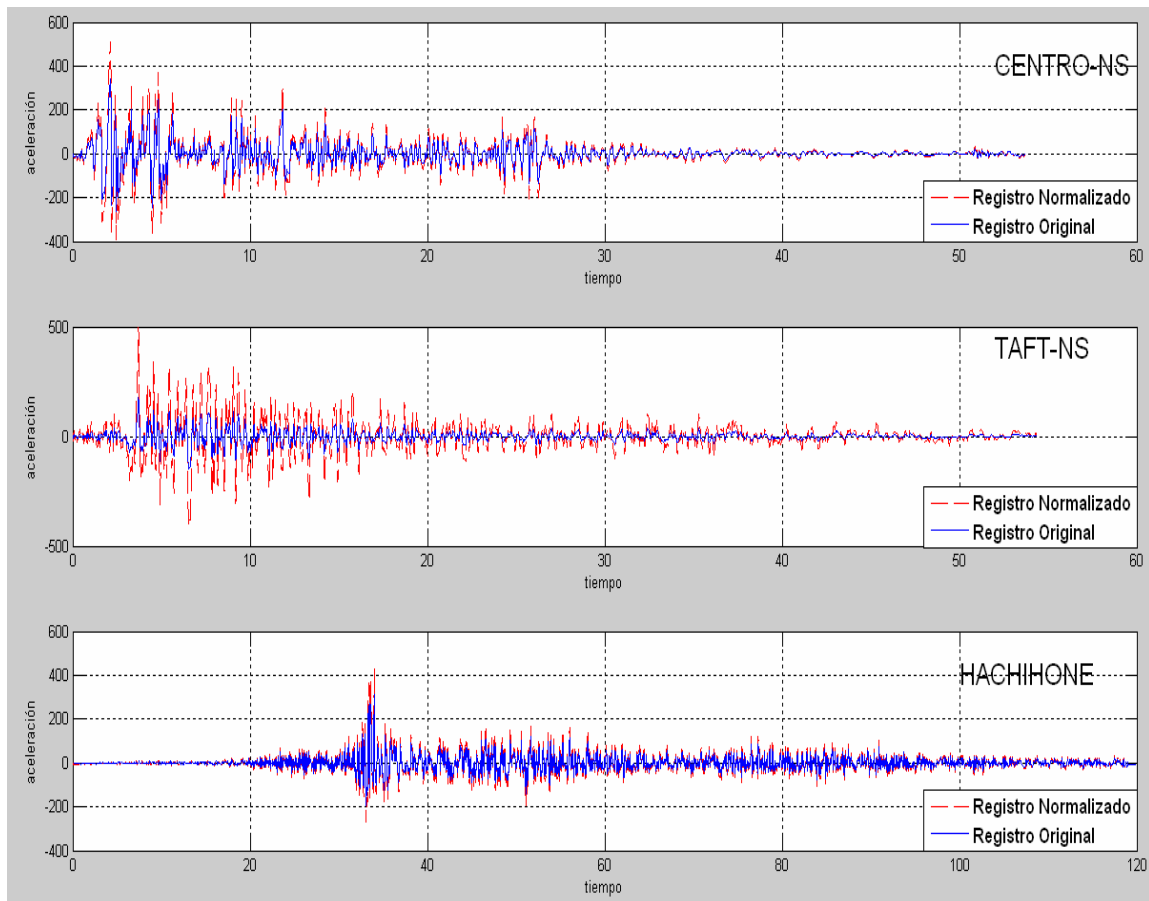


Figura 3.9 Sismos seleccionados y normalizados a una velocidad espectral de 50 m/s

DISPOSITIVOS UTILIZADOS

Existen muchos dispositivos semiactivos presentados brevemente en la introducción. Sin embargo 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 tiene 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.

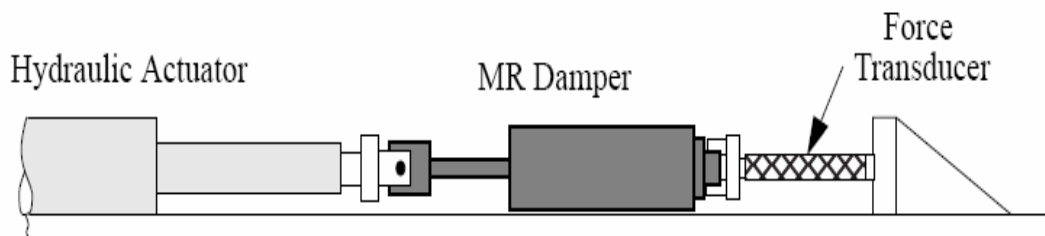


Figura 3.10 Configuración de las pruebas con Amortiguadores MR (Dyke *et al* 1996)

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.

Tabla 3.5 Especificaciones de los dispositivos SHM

<i>DISPOSITIVOS (SHM)</i>	
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

CAPITULO 4 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ACTIVO CENTRALIZADO

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 cabo la solución de las ecuaciones de estado.

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SIN CONTROL

Las estructuras se pueden representar por un ciclo abierto y modelado por estados, donde a un sistema se le aplica una señal, resuelve el sistema 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, 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.

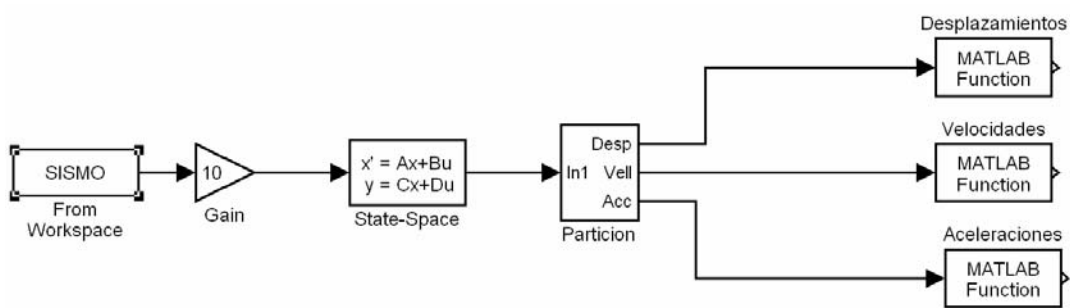


Figura 4.1 Modelo para estructura sin control estructural.

Resulta difícil almacenar todos los datos 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 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.

En figura 4.2 se presentan los valores representativos máximos de la estructura de 5 niveles sin control, para los registros del Centro (C), Taft (T) y Hachihone (H) respectivamente. Se observa diferencia en los parámetros que se comparan en los 3 sismos utilizados a pesar de escalarlos a una misma velocidad (50 m/s) como se presentó en el Capítulo 3. Se puede observar que la mayor demanda se debe al sismo del Centro y Hachihone. También se observa que como no existe control alguno las fuerzas aplicadas al sistema son nulas.

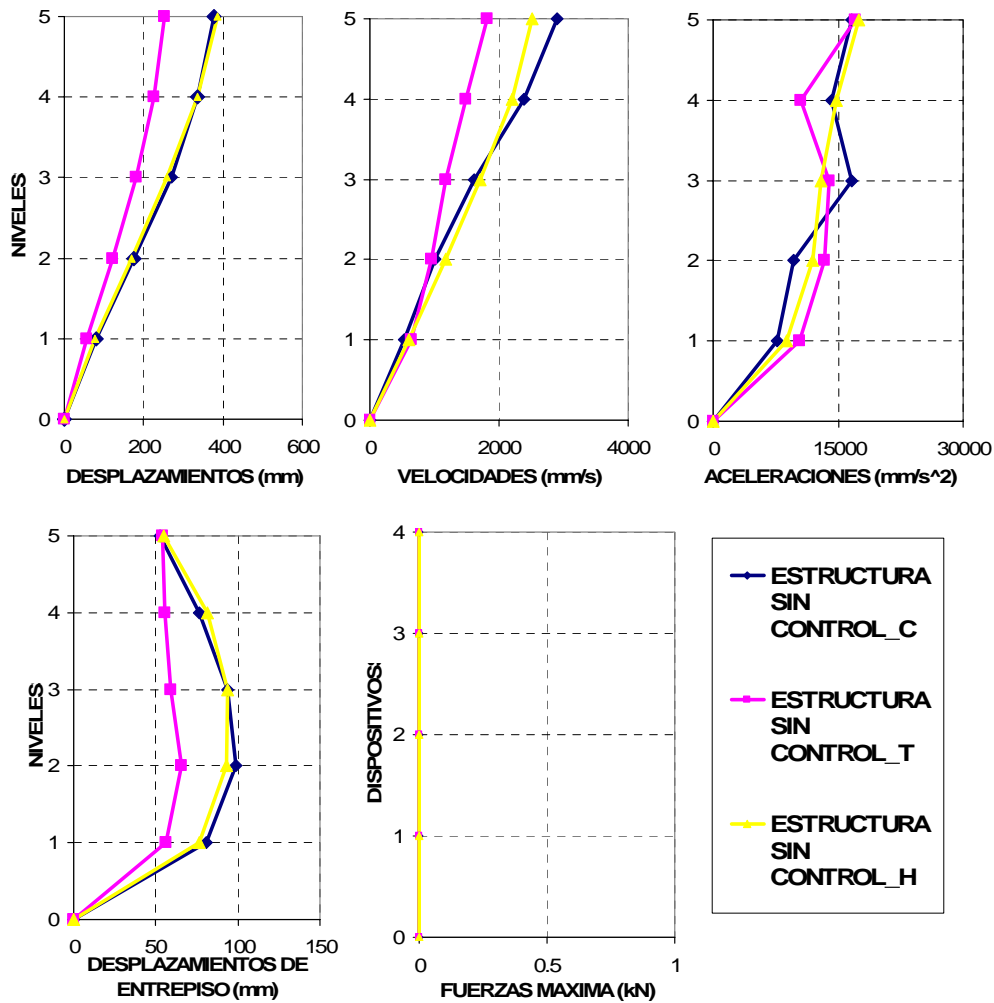


Figura 4.2 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepiso y fuerzas máximas de la estructura de 5 niveles ante los 3 sismos seleccionados.

No sólo se midió las respuesta con la estructura de 5 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 3 registros. Se observa que la mayor demanda es producida por el registro Taft y difiere de la respuesta obtenida con la estructura de 5 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.

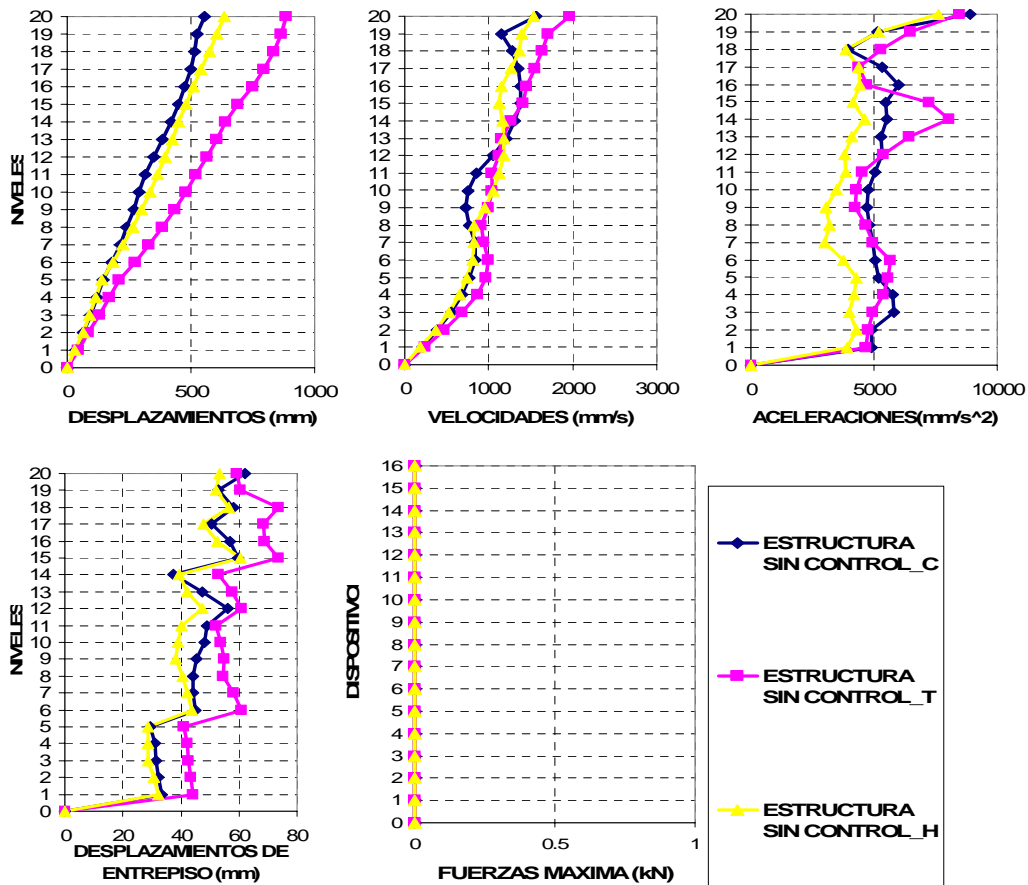


Figura 4.3 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepiso y fuerzas máximas de la estructura de 20 niveles ante los 3 sismos seleccionados

Los 2 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 dicho modelos.
- Se calcula el amortiguamiento proporcional.
- Posteriormente se arman las matrices A, B, C y D.
- Finalmente se aplica el sismo y se lleva a cabo la simulación.

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 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 5 niveles se modeló como un sistema de 9 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 toma en cuenta la ubicación de los contravientos así como las propiedades que le proporciona a la estructura.

TABLA 4.1 Dimensiones de las matrices para cada modelo

MATRIZ	MODELO 9 GDL	MODELO 36 GDL
A	18x18	72x72
B	18x5	72x17
C	27x18	108x72
D	27x5	108x17

En la figura 4.4 se presenta la respuesta de la estructura de 5 niveles con control pasivo ante los registros de estudio. Se destaca la notable mejoría en desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso, sin embargo 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 la estructura sin control las fuerzas máximas son nulas, ya que sólo se modifica la estructura para mejorar el comportamiento dinámico de la estructura. 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.

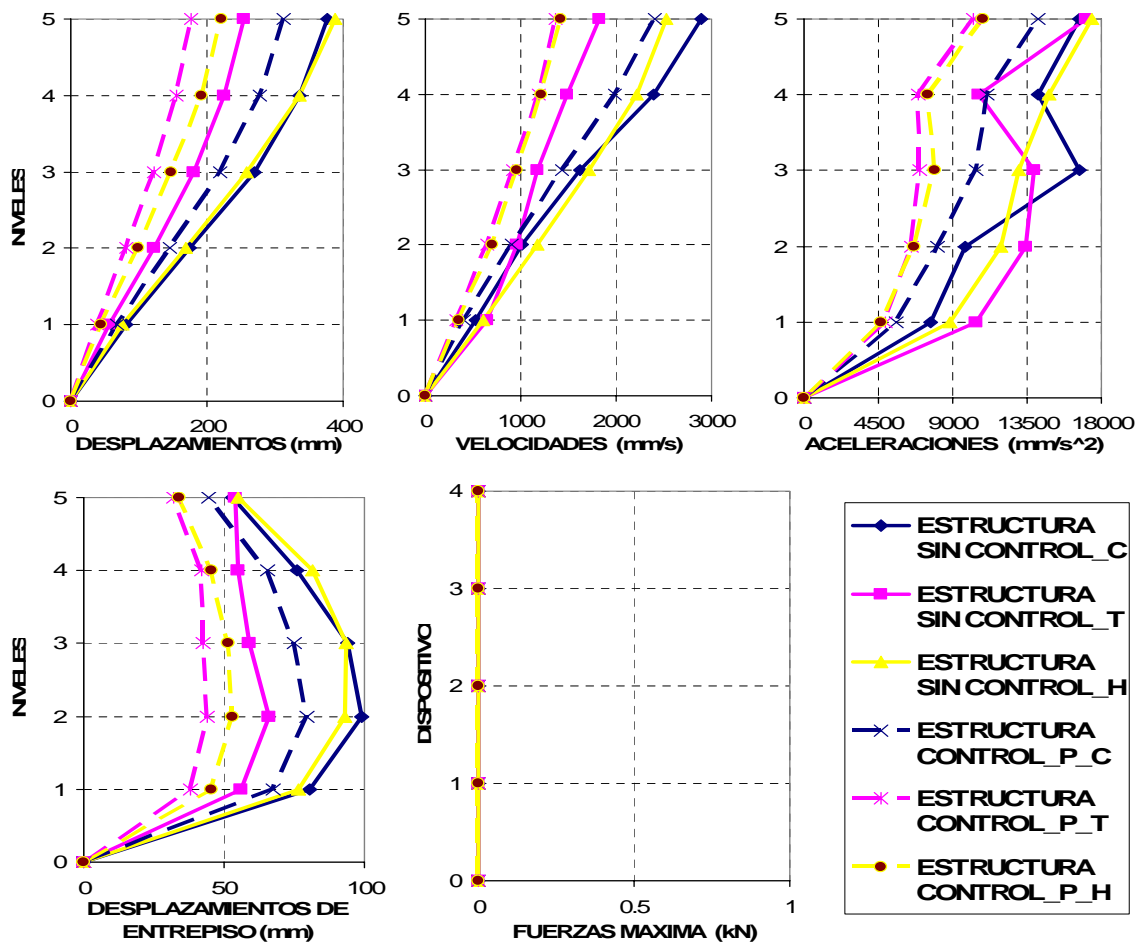


Figura 4.4 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepiso y fuerzas máximas de la estructura con control pasivo de 5 niveles ante los 3 sismos seleccionados.

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 presentan reducciones en los desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso considerables. Los cambios de rigidez se contrastan en la gráfica de desplazamientos de entrepiso. Mientras que las aceleraciones son atenuadas en los pisos superiores, sin embargo en el primer nivel existe un incremento de aceleración significativo, quizá puede generar un “piso débil” y se tendría que cuidar el diseño en estos puntos críticos.

El patrón de comportamiento de la estructura ante los 3 registros, resulta similar a pesar de que se observó una gran diferencia en la estructura de 5 niveles. Existen variaciones, pero se distinguen puntos importantes como los desplazamientos de entrepiso que podrían concentrar el daño estructural en algunos niveles.

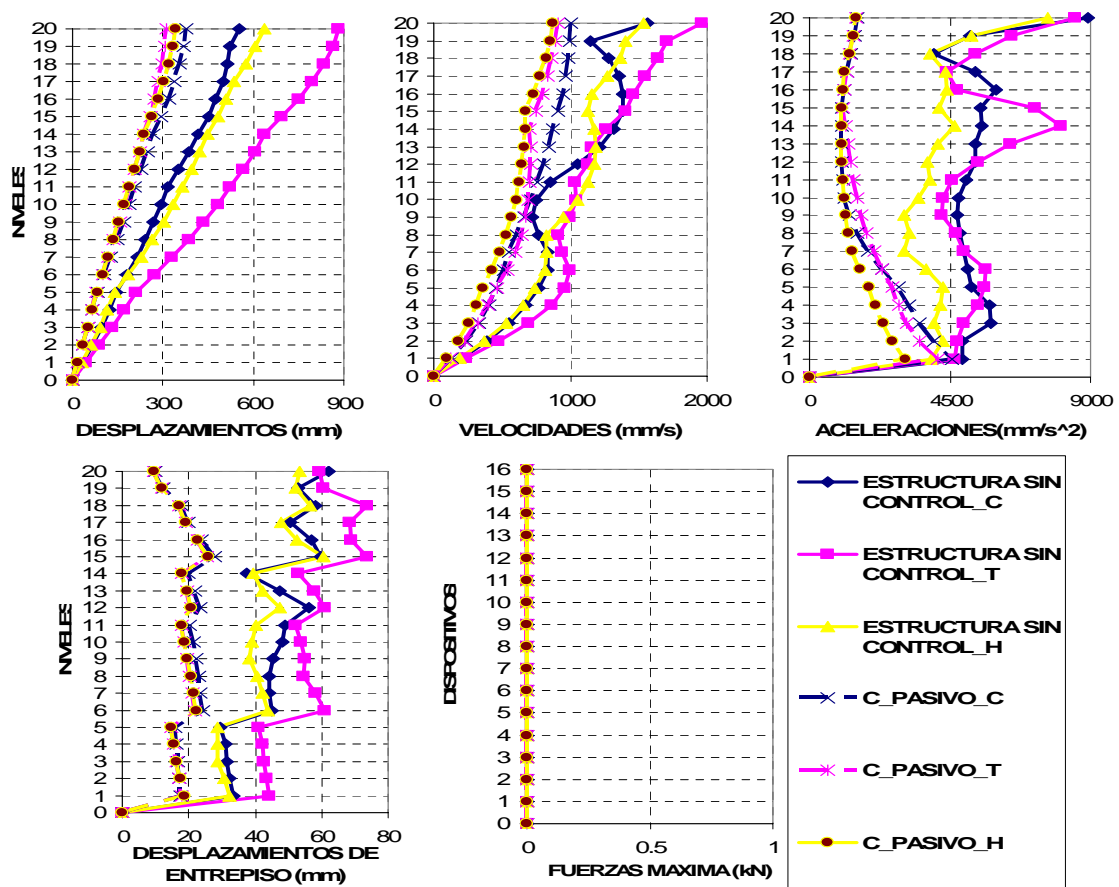


Figura 4.5 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepiso y fuerzas máximas de la estructura con control pasivo de 20 niveles ante los 3 sismos seleccionados

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 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 en el control de los desplazamientos y de las velocidades. También 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, sin embargo 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.

$$[K,S,e] = \text{lqr}(A,B,Q,R) \quad \text{Ec. 4.1}$$

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 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. La diferencia 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.

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

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

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 . Sin embargo se presentan todas las dimensiones de las matrices de salidas en la tabla 4.3.

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

Matrices obtenidas de la función LQR		
MATRIZ	MODELO 9 GDL	MODELO 36 GDL
K	4x18	16x72
S	18x18	72x172
e	18x1	72x1

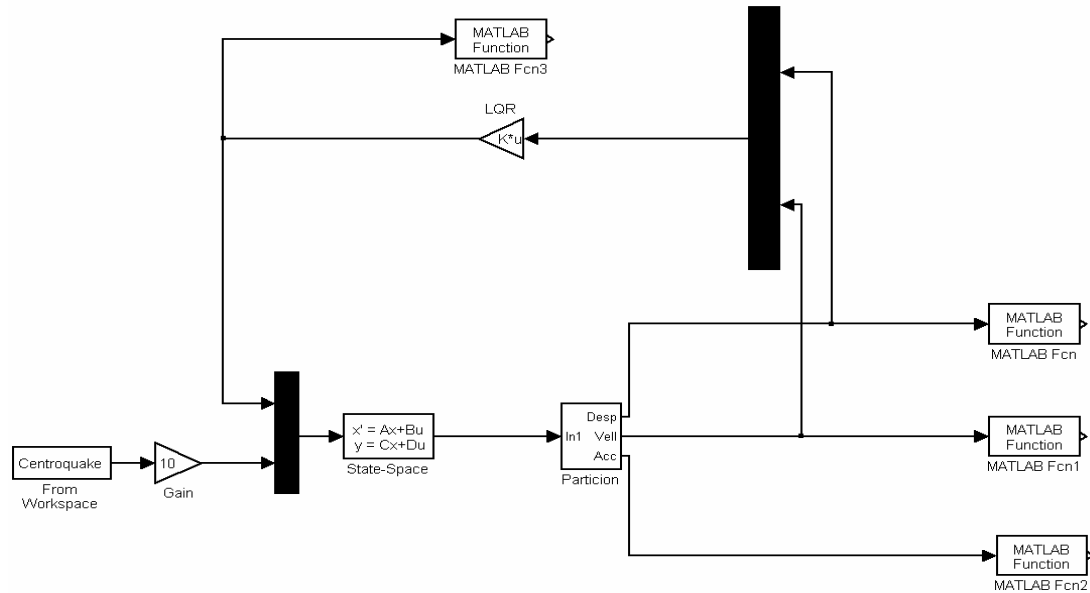


Figura 4.6 Esquema básico de control activo centralizado.

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, sin embargo 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 presenta el comportamiento de la estructura de 5 niveles ante el sismo del Centro con 3 diferentes pesos de R. Los valores para la matriz R son $r = \{0.1 \ 0.03 \ 0.01\}$ (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).

$$R = [I_{4 \times 4}] * r \quad \text{Ec. 4.2}$$

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

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 3 diferentes pesos de R para desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso, sin embargo las aceleraciones en los niveles inferiores se incrementan de manera considerable. Finalmente se observan las fuerzas máximas aplicadas al sistema con diferentes valores de R.

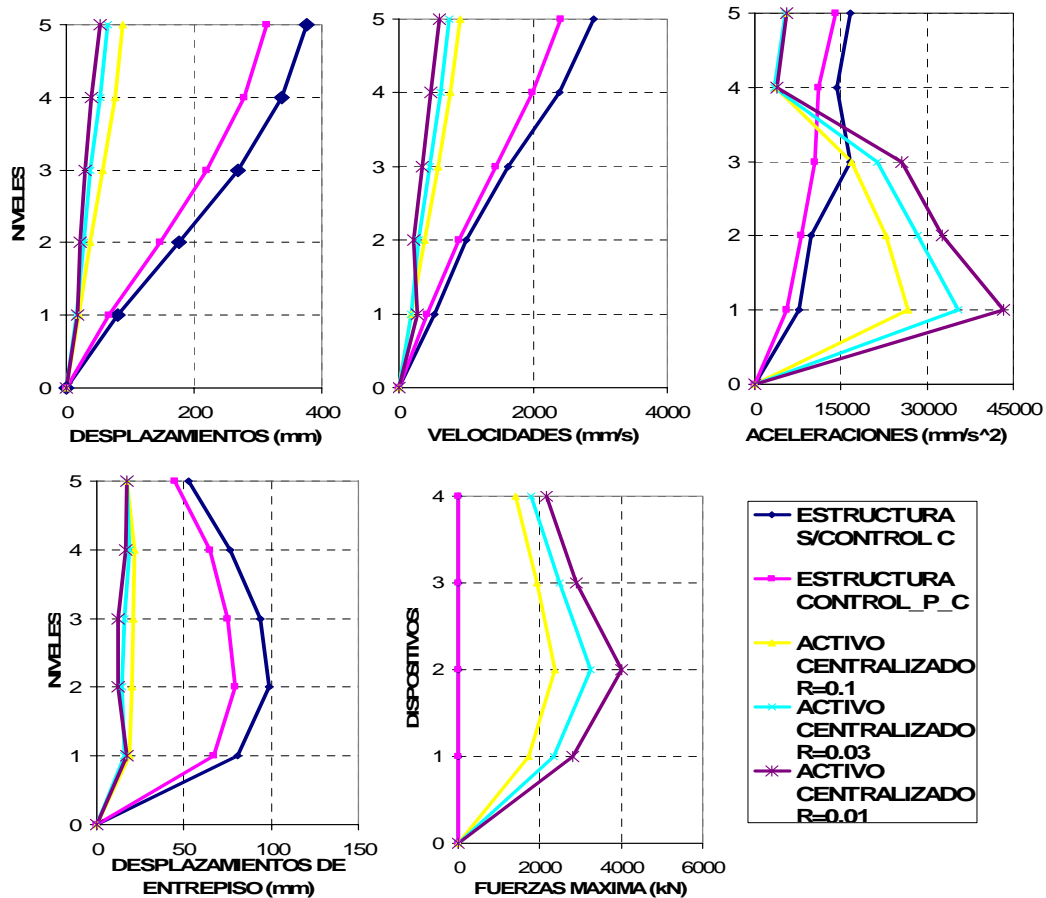


Figura 4.7 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones fuerzas y desplazamientos de entrepisos máximos, debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01

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 3 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 tiene una mejor respuesta.

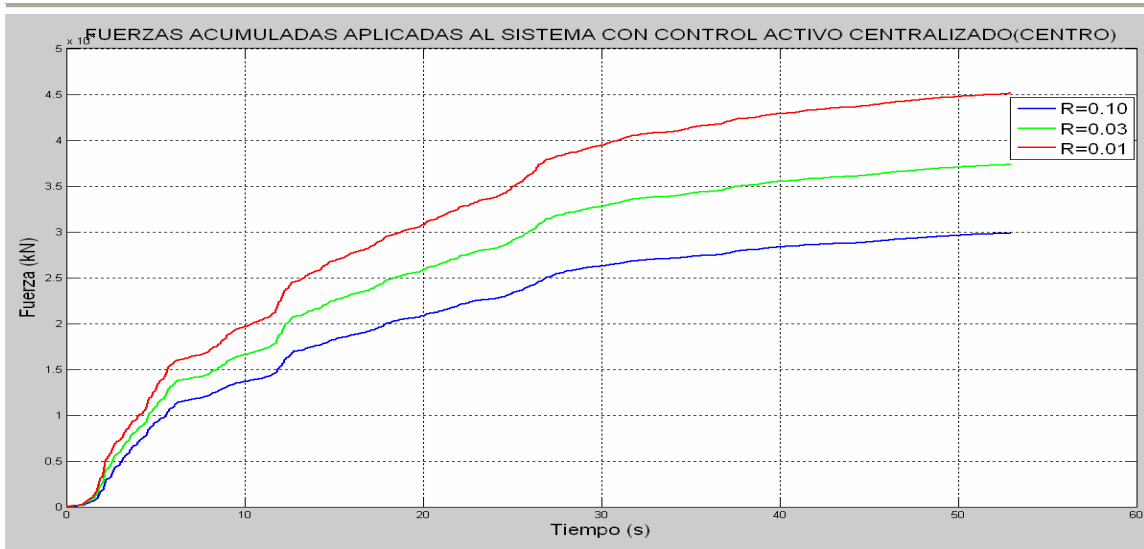


Figura 4.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01

Se lleva a cabo el mismo procedimiento para la estructura con el sismo Taft y Hachihone en las figura 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 respectivamente.

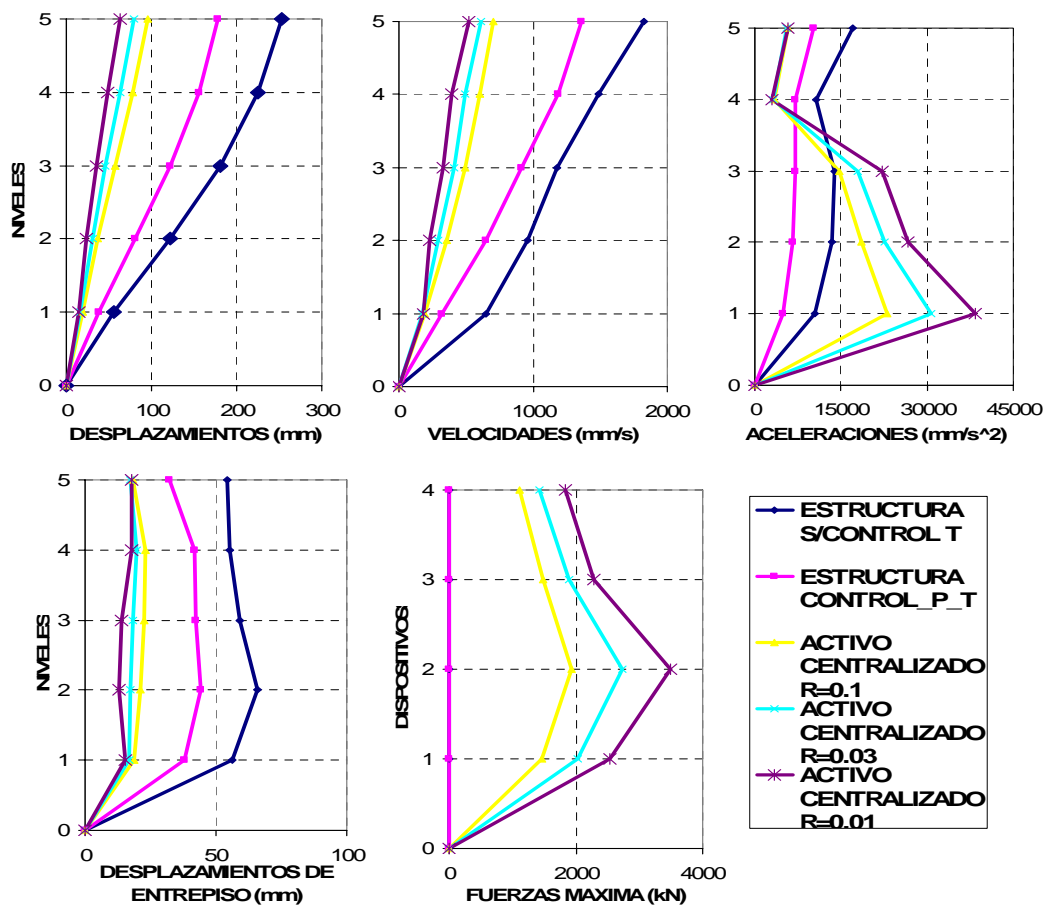


Figura 4.9 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entresijos y fuerzas máximas, debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01

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

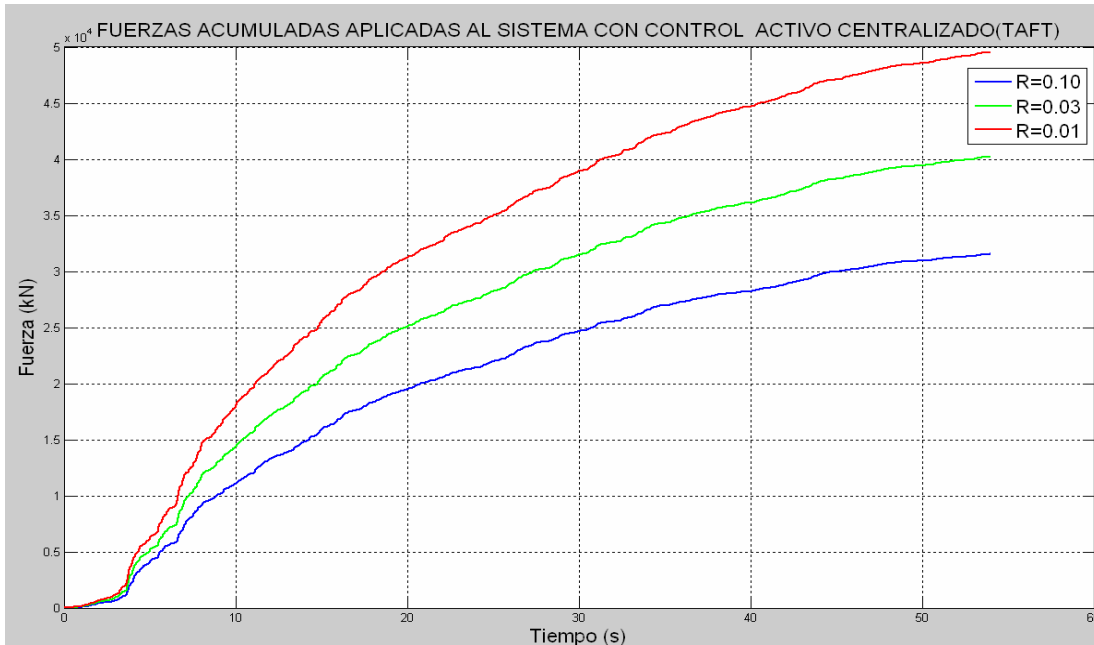


Figura 4.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01

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. Mejora desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso, pero incrementa aceleraciones en niveles inferiores.

En la figura 4.12 se puede observar la misma tendencia mostrada. Esta gráfica también permite observar las partes mas intensas del sismo. Se puede ver que cuando la pendiente es pequeña existen movimientos ligeros, sin embargo cuando existen sacudidas intensas la pendiente de la acumulación de fuerzas se incrementa considerablemente y 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, sin embargo 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 5 niveles) ayuda a disminuir el daño estructural así como a mejorar el confort ya que también reduce velocidades aunque las demandas de diseño se pueden ver afectadas.

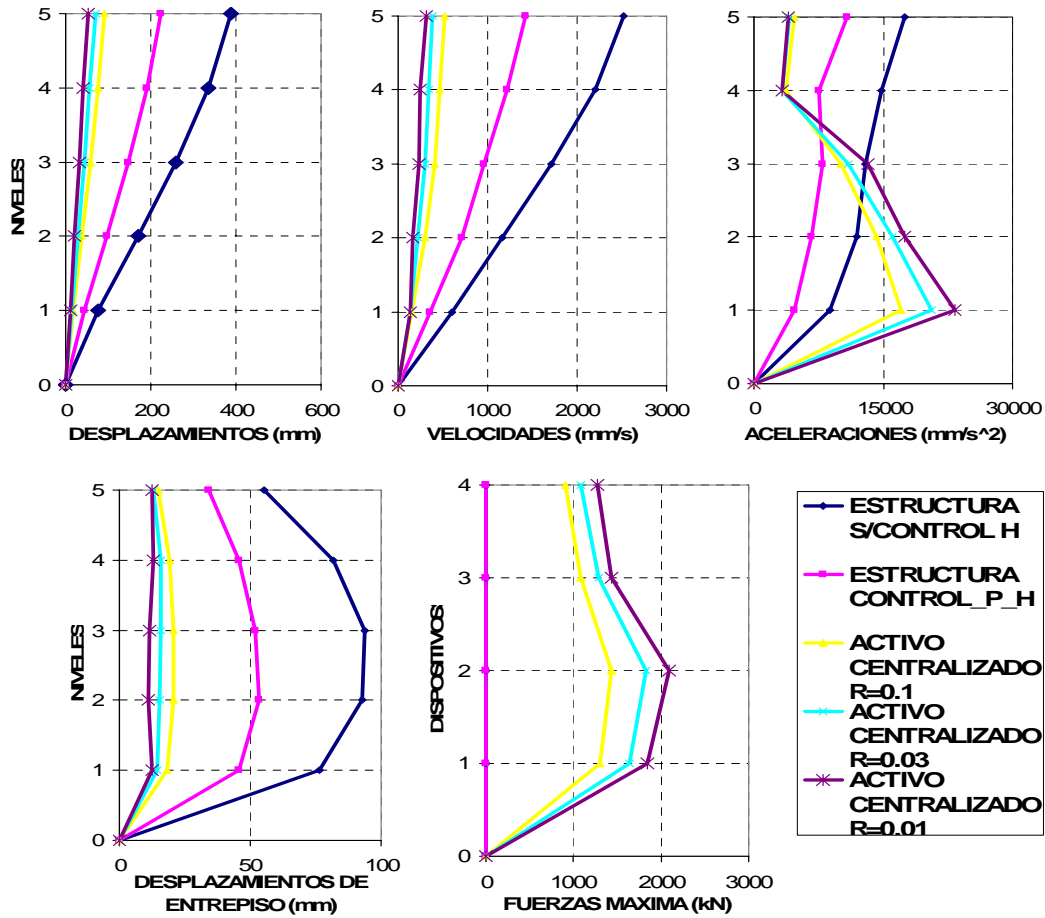


Figura 4.11 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas, debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01

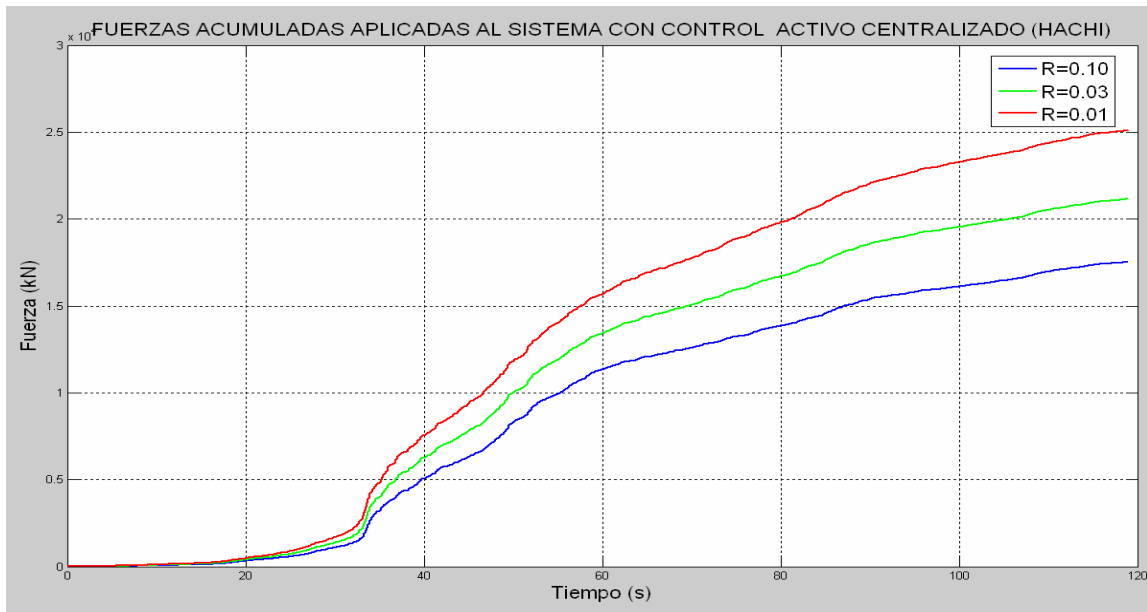


Figura 4.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03 y 0.01

Una vez que se determina la efectividad del control activo centralizado en estructuras bajas, 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 3 registros con variaciones en la matriz pesada R, sin embargo, como es una estructura de mayor altura se necesita 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.

$$R = [I_{16 \times 16}] * r \tag{Ec. 4.4}$$

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

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). También son notables los incrementos de aceleraciones en ciertos niveles donde existen dispositivos de control. Dichas aceleraciones toman un papel muy importante en el diseño estructural y la omisión de estos podría causar problemas como el colapso.

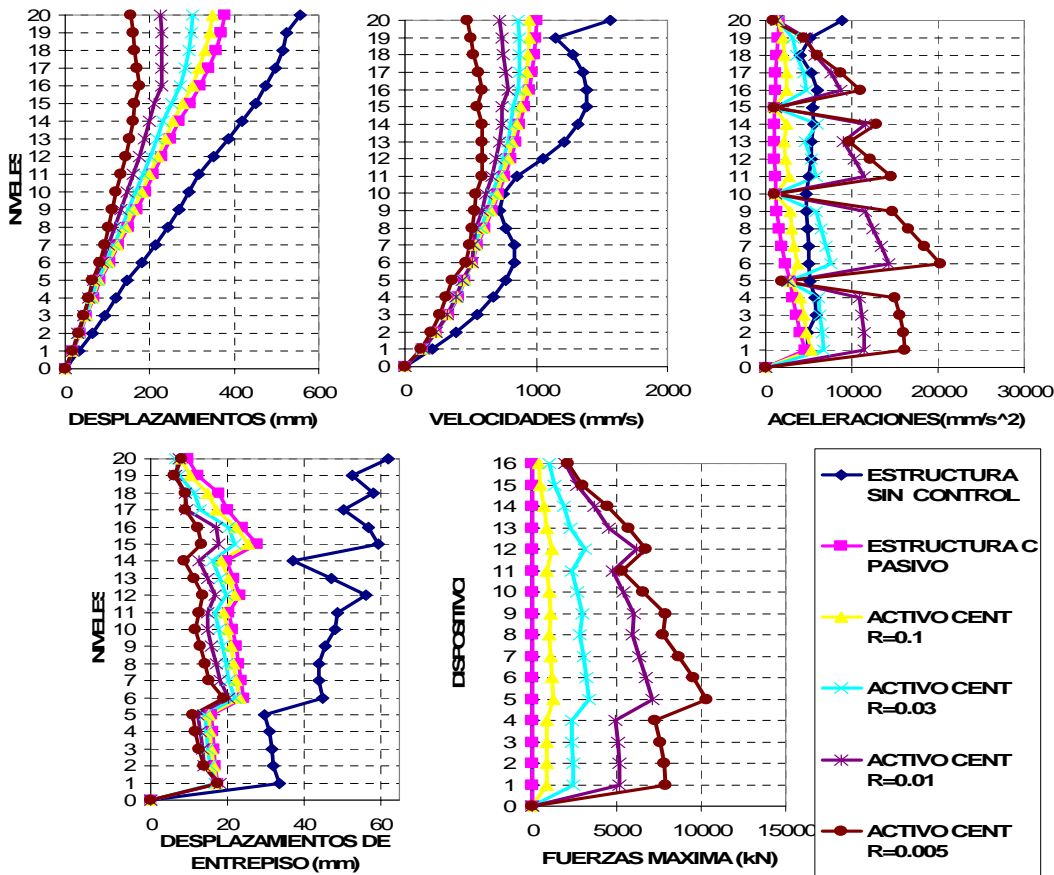


Figura 4.13 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas, debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005

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 10 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 5 niveles, así que es posible afirmar que la aplicación de fuerzas con la función LQR depende de la demanda, es decir de la intensidad del sismo.

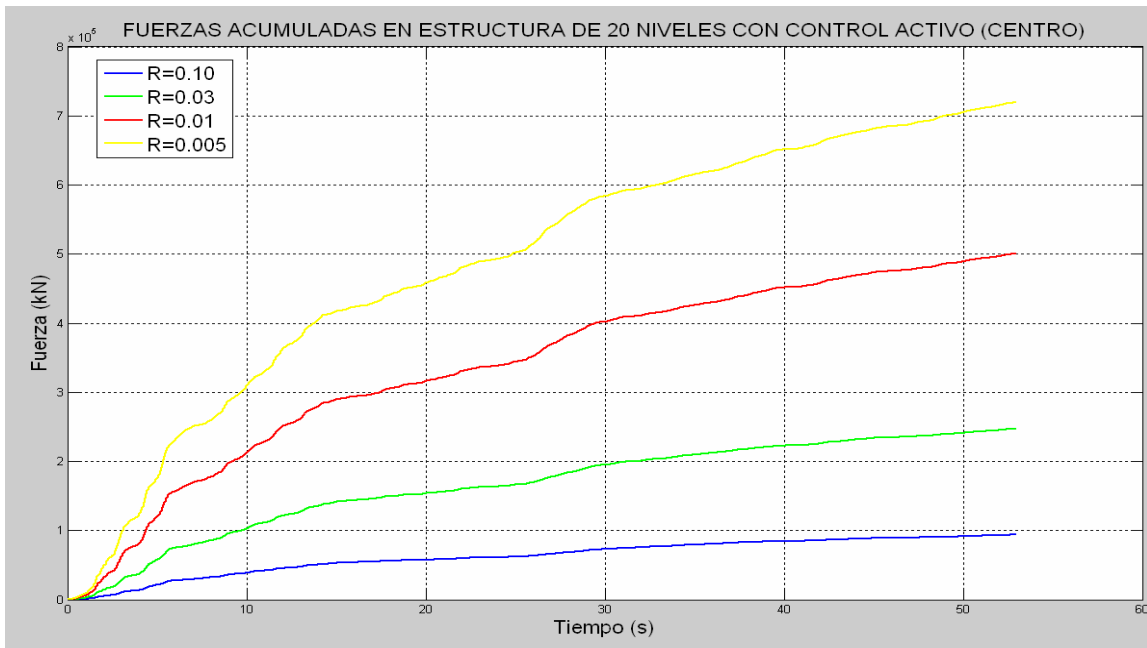


Figura 4.14 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Centro-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005

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 incrementan de manera considerable. Lo que significaría necesitar grandes cantidades de energía y posiblemente imposible de proporcionar.

Mientras tanto en la figura 4.16 se presentan las fuerzas acumuladas que se aplican a la estructura durante el sismo. Presenta el mismo comportamiento que el de 5 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 al contrario al sismo Taft-NS el comportamiento se mejora significativamente. Se reducen los desplazamientos velocidades y desplazamientos de entrepiso, con incrementos en las aceleraciones. También se observan incrementos significativos 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.

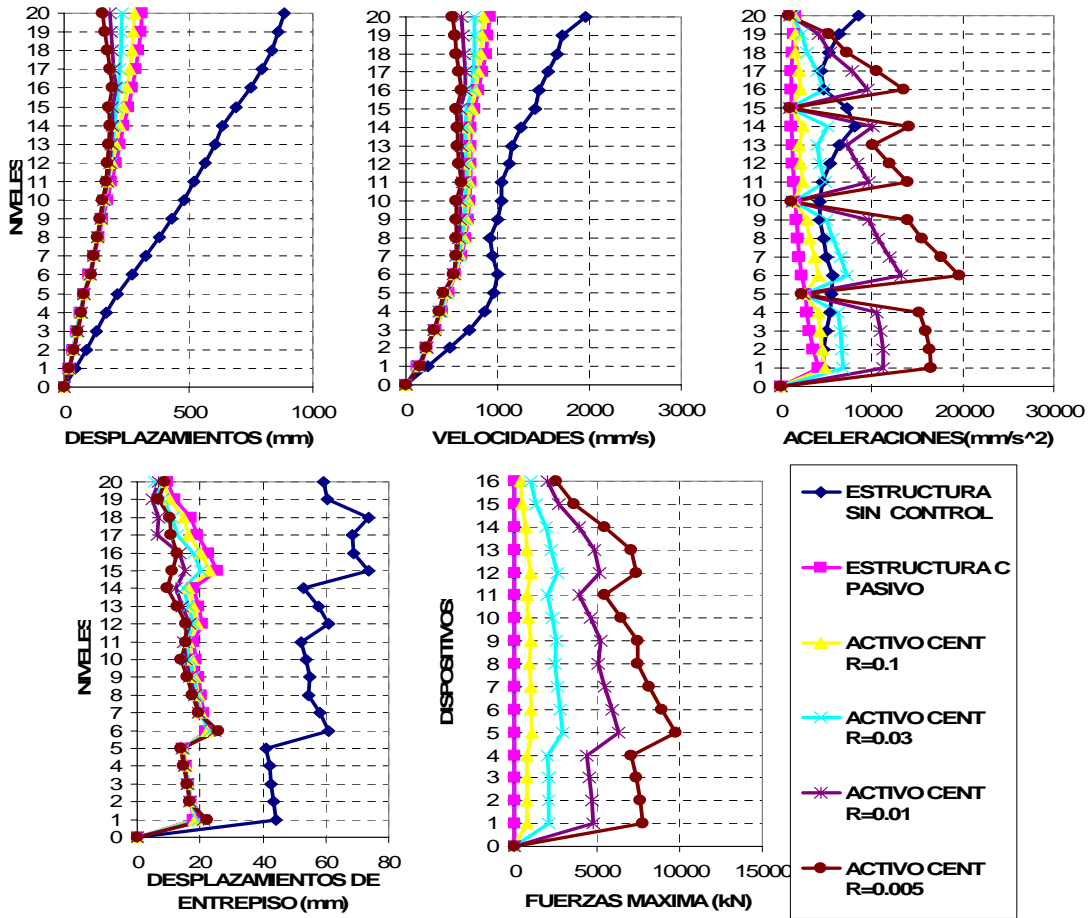


Figura 4.15 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas, debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005

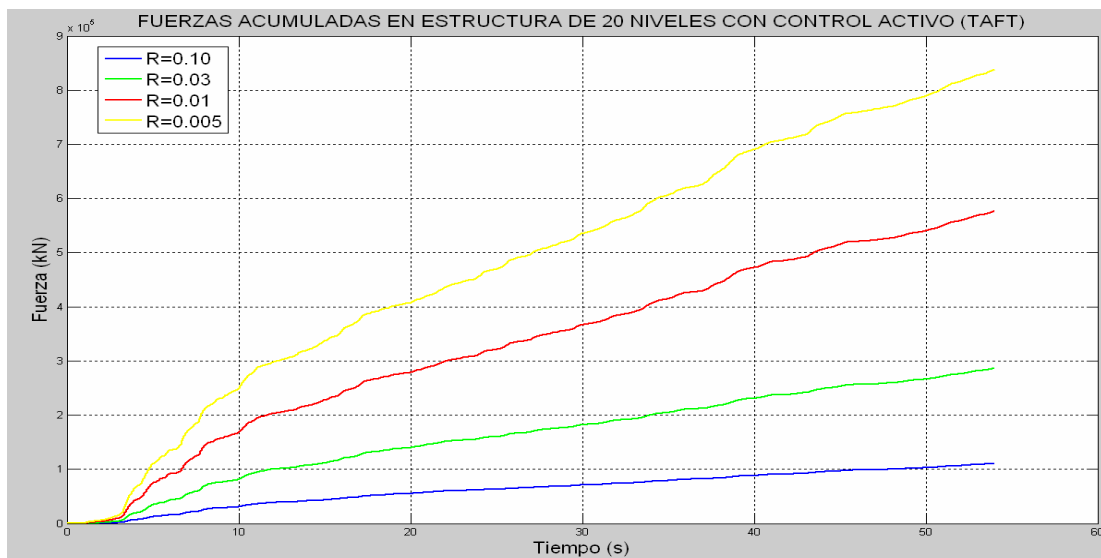


Figura 4.16 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Taft-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005

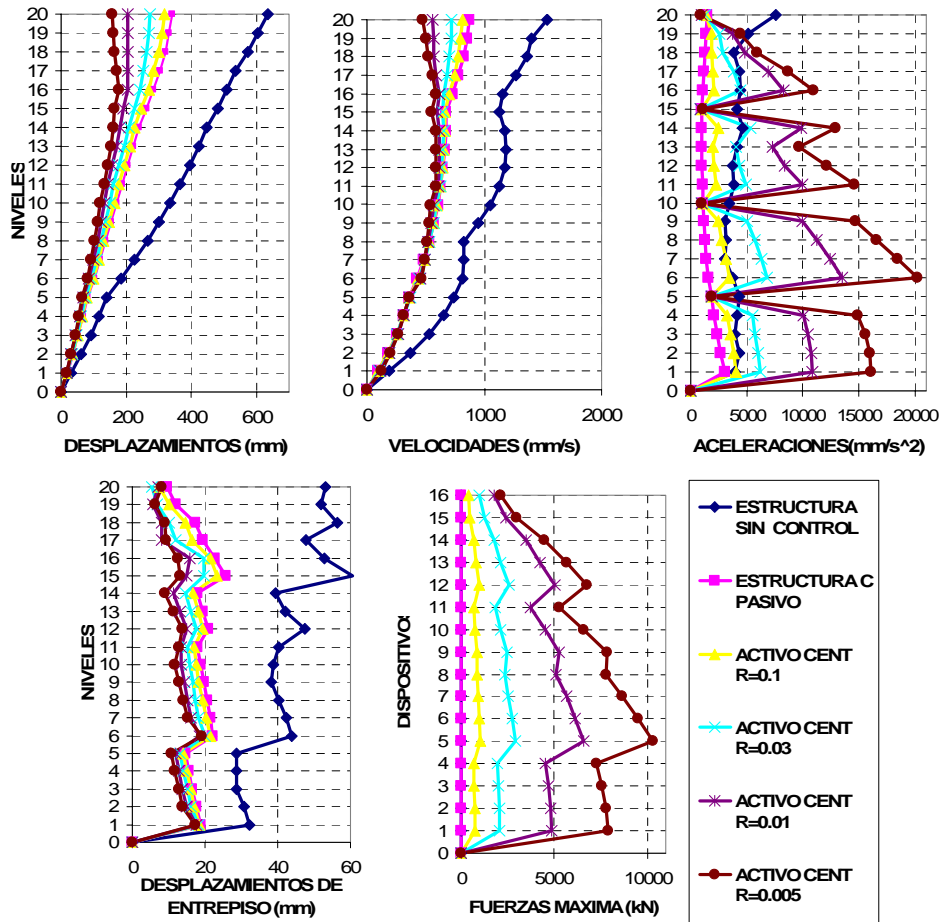


Figura 4.17 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas, debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005

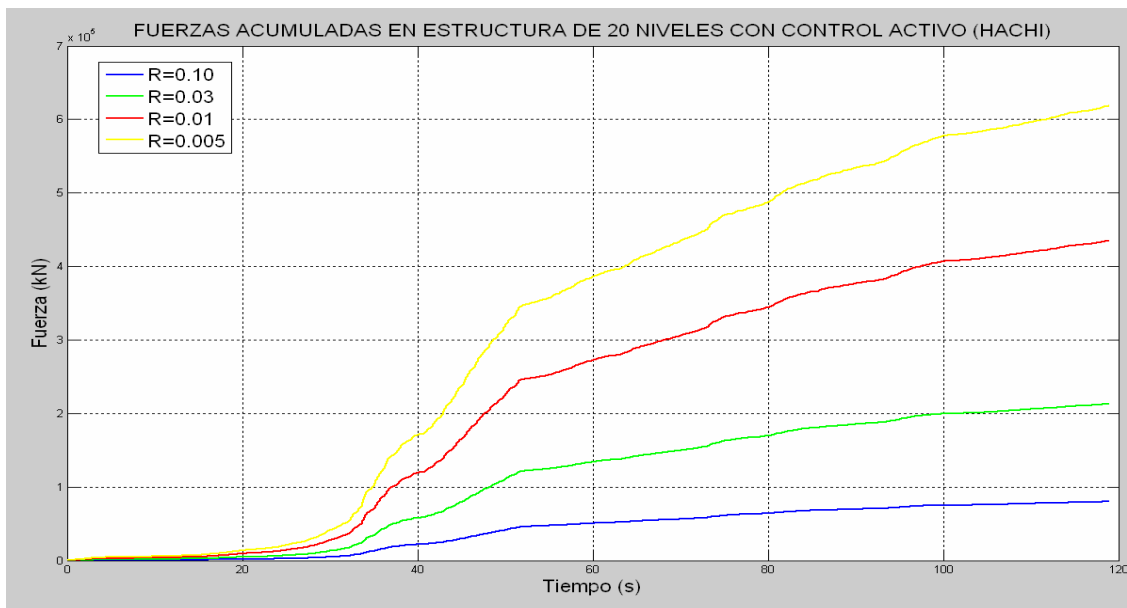


Figura 4.18 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura debidos al registro Hachi-NS con R de 0.1, 0.03, 0.01 y 0.005



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 lo tanto el daño estructural se ve reducido según el diseño por desempeño estudiado en los últimos años de manera importante. Es destacable ver que las velocidades también se ven reducidas con lo que nos permite tener un buen control de los contenidos que es otra ventaja de este tipo de control estructural.

Sin embargo, las aceleraciones se incrementan de manera considerable principalmente en los niveles donde hay dispositivos instalados. Esto resulta de alguna manera obvio ya que la estructura en cierto modo se rigidiza cuando el dispositivo proporciona fuerzas.

La cantidad de energía aplicada al sistema es muy grande y resulta difícil proporcionarla al sistema. Además sería muy peligroso ya que si fallara el control en algún instante, podría desestabilizar el sistema completo y provocaría el colapso.

CAPITULO 5 IMPLEMENTACION DEL MODELO CON CONTROL SEMIACTIVO

GENERALIDADES

El costo y mantenimiento del control activo despertó la necesidad del control semiactivo y los problemas de escalamiento estimuló el origen 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 requerimientos de energía para estabilizar el sistema resulta muy costoso, además puede tener problemas de comportamiento si llega a desestabilizarse. En este capítulo se presenta la implementación del control semiactivo centralizado para las 2 estructuras y se compara con la respuestas obtenidas con el control activo, para valores similares de R ante los 3 diferentes registros.

IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL SEMIACTIVO

Existen otros autores como Dyke (2000) que presentan un esquema de control semiactivo, en el cual plantean la solución óptima denominado "Clipped optimal". La solución se obtiene basada 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 esta estructura 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, ahora depende de parámetros como la velocidad de cada nivel y la fuerza óptima. La manera de modelarlo es la misma, esto es 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).

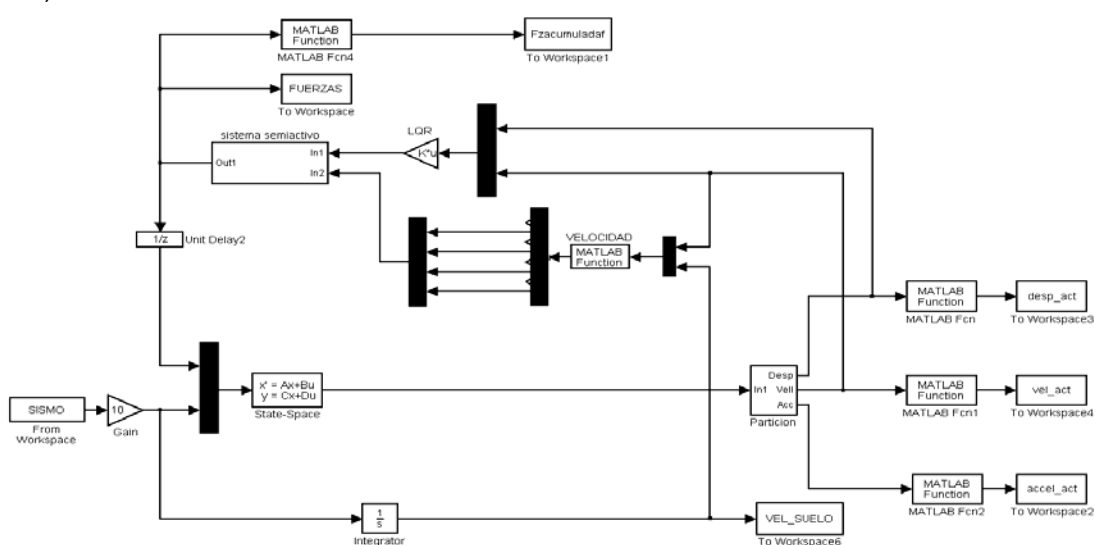


Figura 5.1 Esquema básico de control semiactivo centralizado

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 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

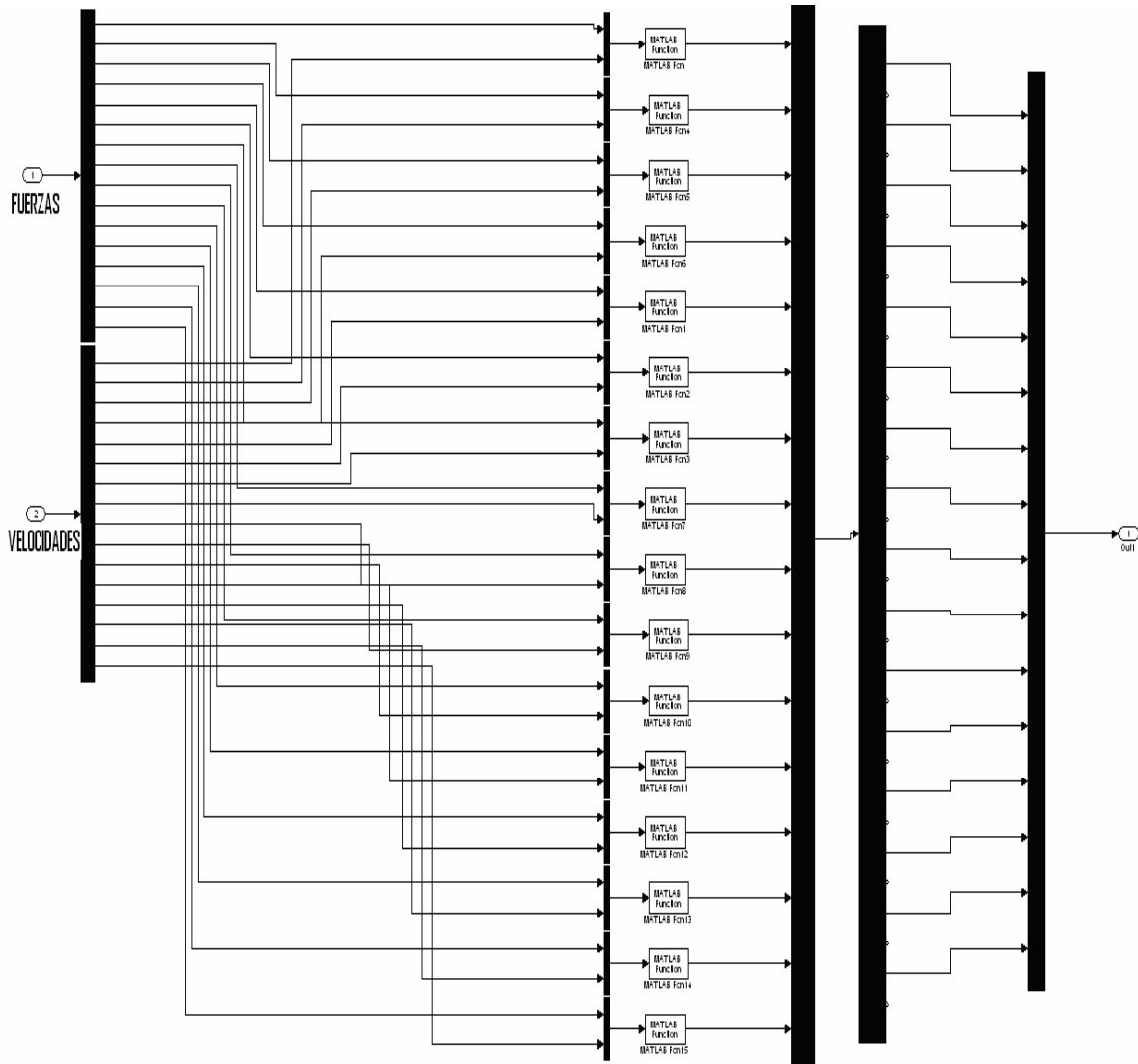


Figura 5.2 Subsistema "Control semiactivo" para edificio de 20 niveles

En este estudio se plantea el uso de la función LQR tal como lo hace Kurata et.al. (1999). Se plantea proporcionar fuerzas óptimas al sistema sólo si 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.

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

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, 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 5.4 ecuación define facultad de restringir las fuerzas aplicadas.

A continuación se presenta la comparación entre el comportamiento de las 2 estructuras para control activo y semiactivo centralizado con lo que podemos 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 5 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 apliquen no sean imposibles de suministrar.

La figura 5.3 presenta la respuesta de la estructura de 5 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, sin embargo 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.

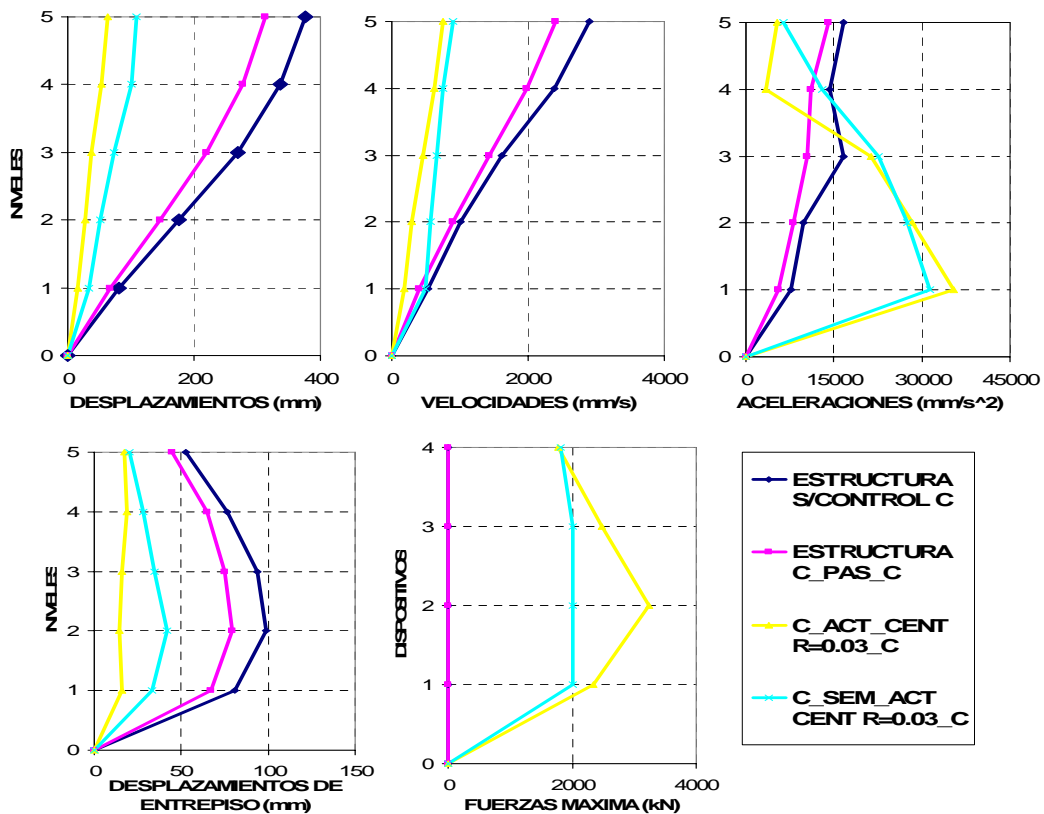


Figura 5.3 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Control Semiactivo. Centro-NS. R de 0.03

La figura 5.4 presenta las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 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 mas fuerzas en las etapas mas intensas.

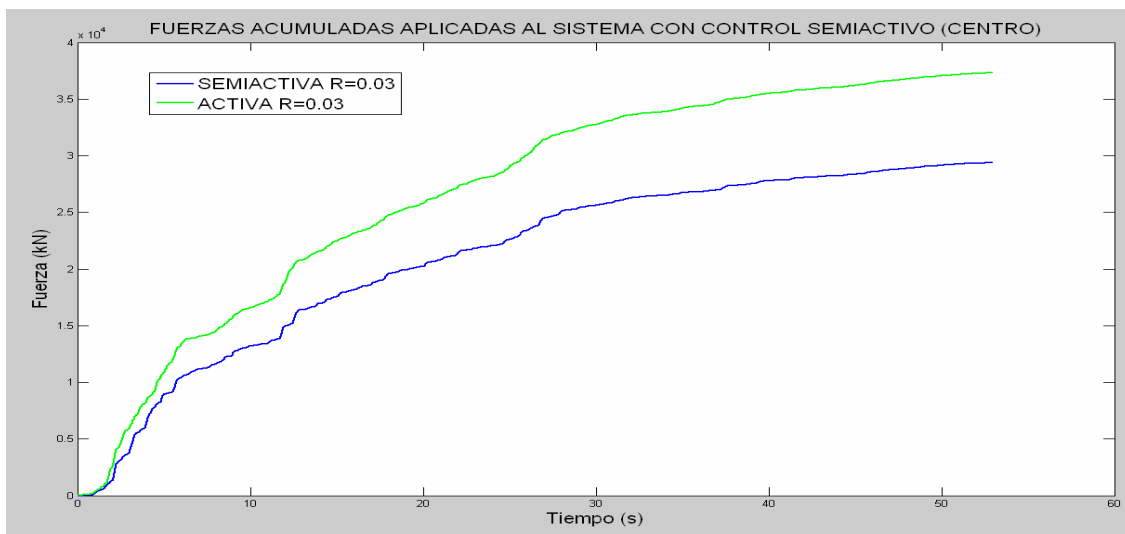


Figura 5.4 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Taft-NS R de 0.03

La figura 5.5 presenta la respuesta de la estructura de 5 niveles ante el registro Taft-NS. La estructura tiene una respuesta menor que con el registro anterior, sin embargo las aceleraciones no se disparan tanto. También los desplazamientos son reducidos y las fuerzas máximas se incrementan sin exceder la capacidad de los dispositivos.

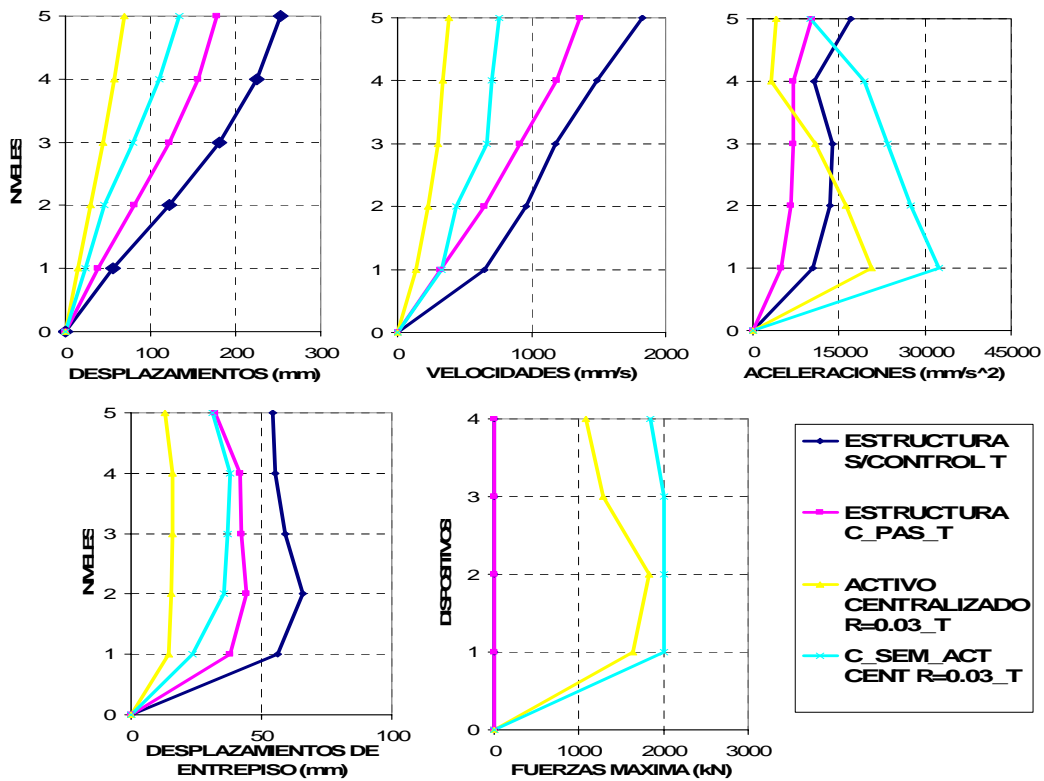


Figura 5.5 Respuestas máximas de la estructura de 5 niveles con control semiactivo ante el registro Taft-NS con R de 0.03

En la figura 5.6 se presenta el comportamiento de las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 5 niveles ante el registro Taft-NS. Muestra que más del 70% de las fuerzas que aplicaría el control activo puede ser proporcionada por el control semiactivo. A partir de ello se puede ver su efectividad sin tener que proporcionar grandes cantidades de energía.

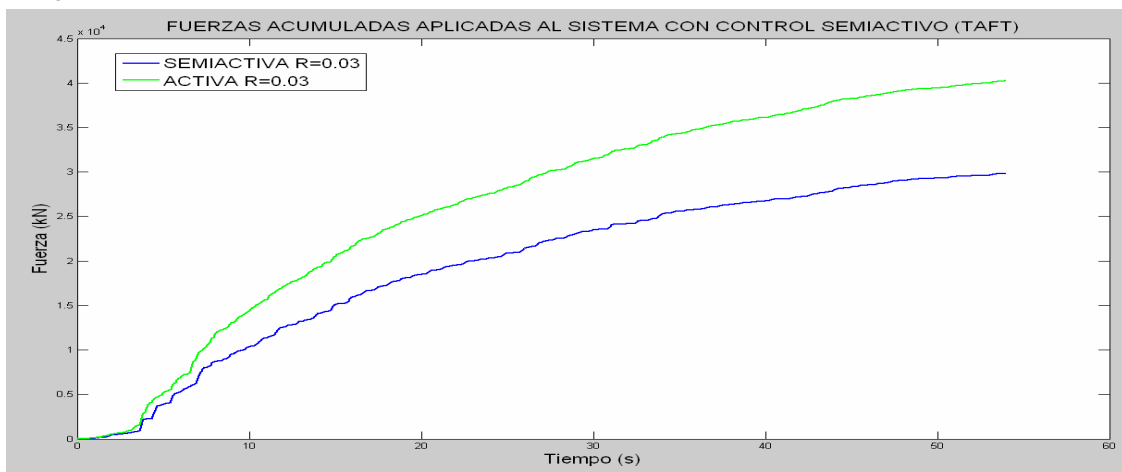


Figura 5.6 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Taft-NS R de 0.03

La figura 5.7 presenta la respuesta estructural del modelo de 5 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.

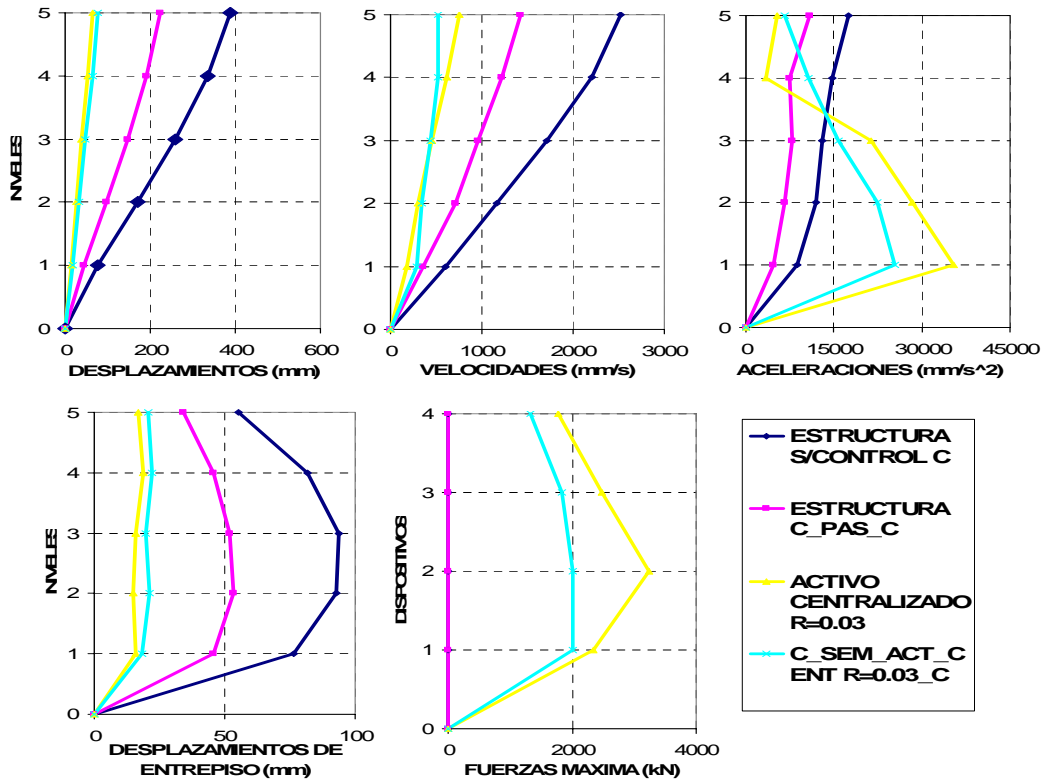


Figura 5.7 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Control Semiactivo. Hachi-NS. R de 0.03

Finalmente para la estructura de 5 niveles, la figura 5.8 presenta las fuerzas acumuladas para el registro Hachi-NS, con un comportamiento similar al de los 2 últimos registros.

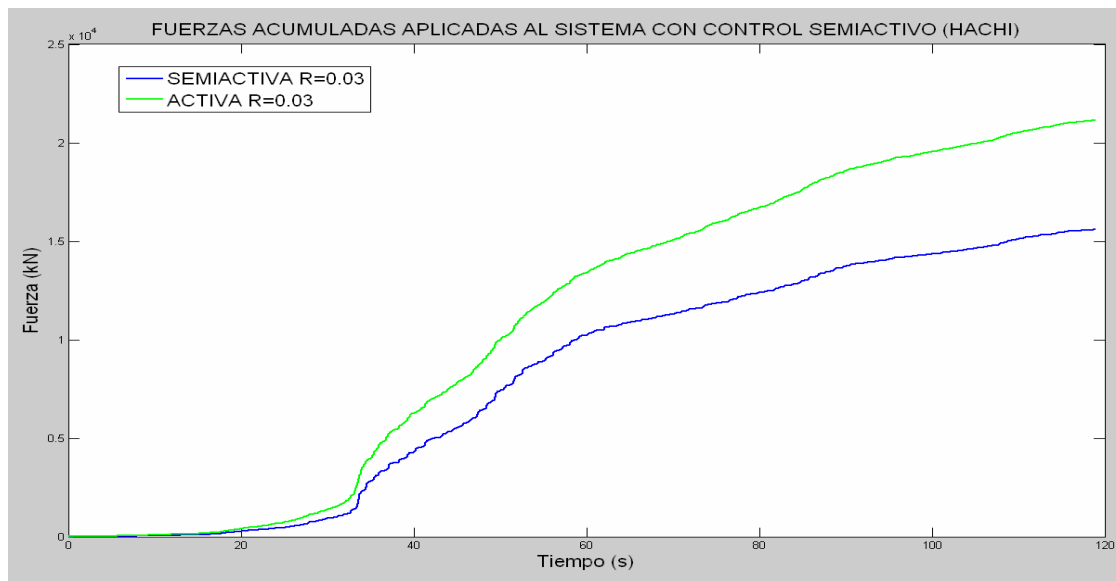


Figura 5.8 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Hachi-NS R de 0.03

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 5 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 2 registros las mejoras también son aceptables.

Por otro lado se intentará 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 que se alcanza con el control semiactivo centralizado es parecida a la obtenida con el control activo, sin embargo 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 se logran aportar los dispositivos al sistema.

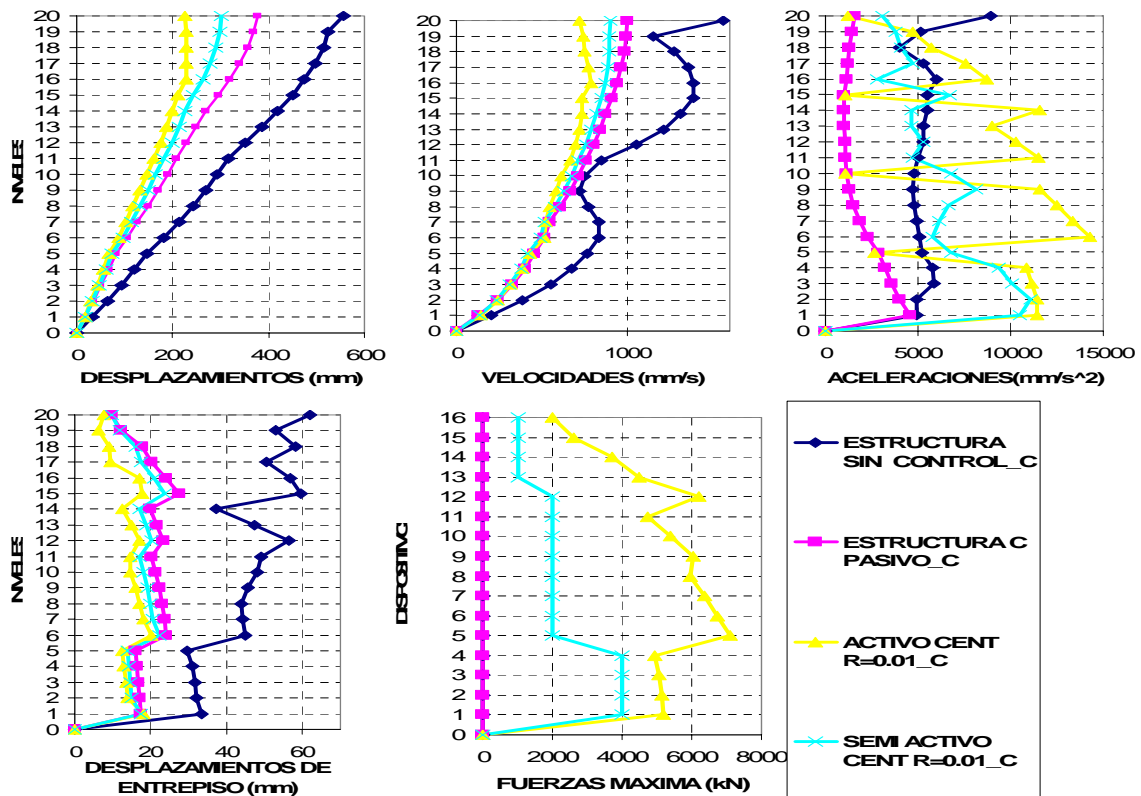


Figura 5.9 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Estructura de 20 Niveles. Centro-NS. $R=0.01$

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 apenas alcanza la mitad del control activo y por lo tanto, la mejora en la respuesta mostrada en la figura 5.9 resulta mínima.

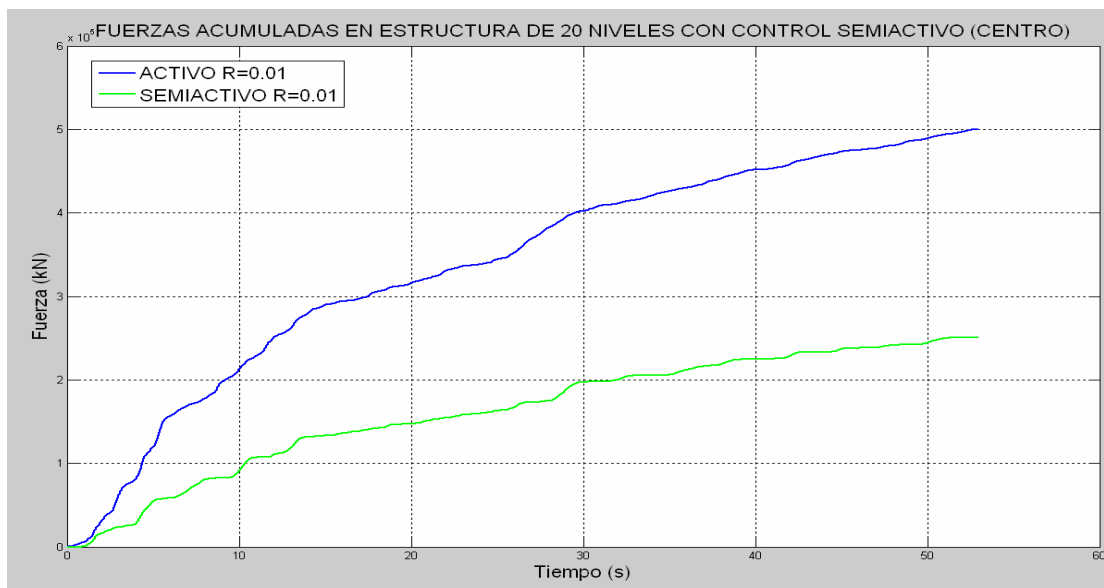


Figura 5.10 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Centro-NS $R=0.01$

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, sin embargo son constantes.

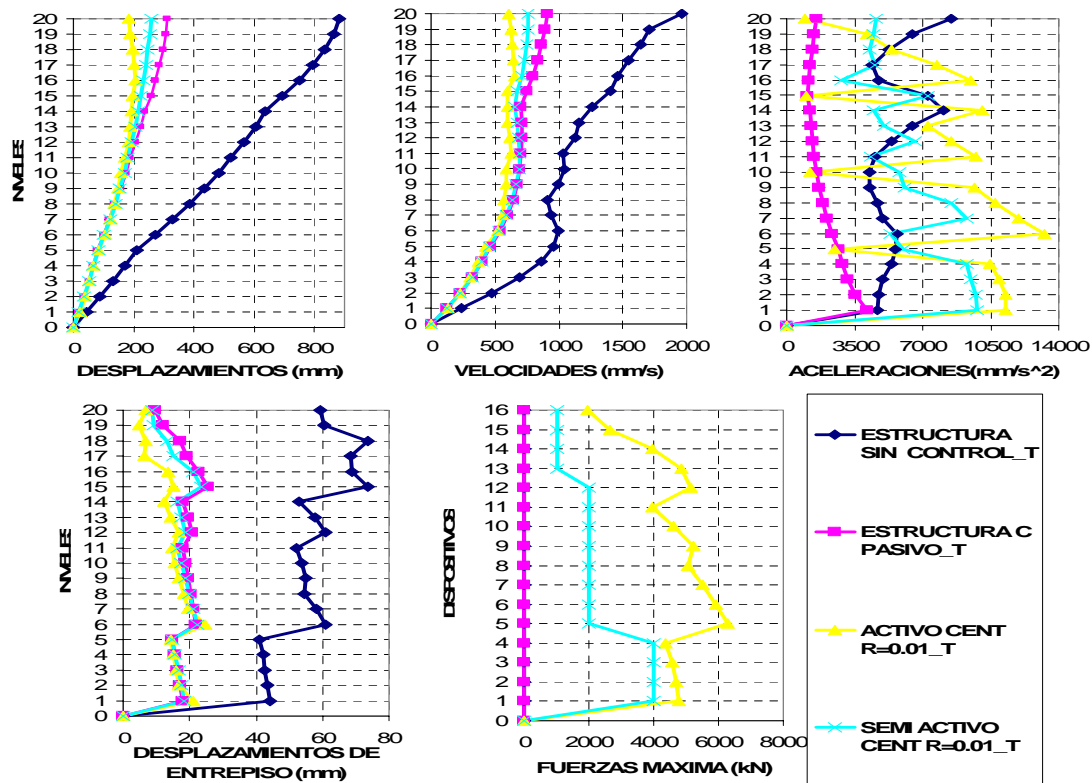


Figura 5.11 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Estructura de 20 Niveles. Taft-NS. R=0.01

La figura 5.12 presenta, 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 puede proporcionar el control semiactivo apenas alcanza el 50 % de las que puede proporcionar el control activo.

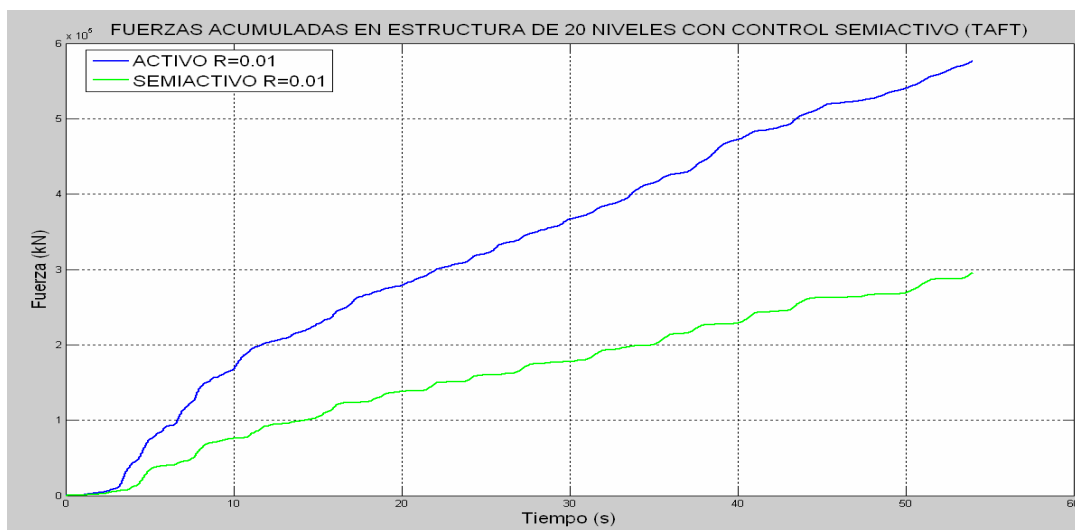


Figura 5.12 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Taft-NS R=0.01

Finalmente la figura 5.13 muestra 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, pero son mejores al pasivo.

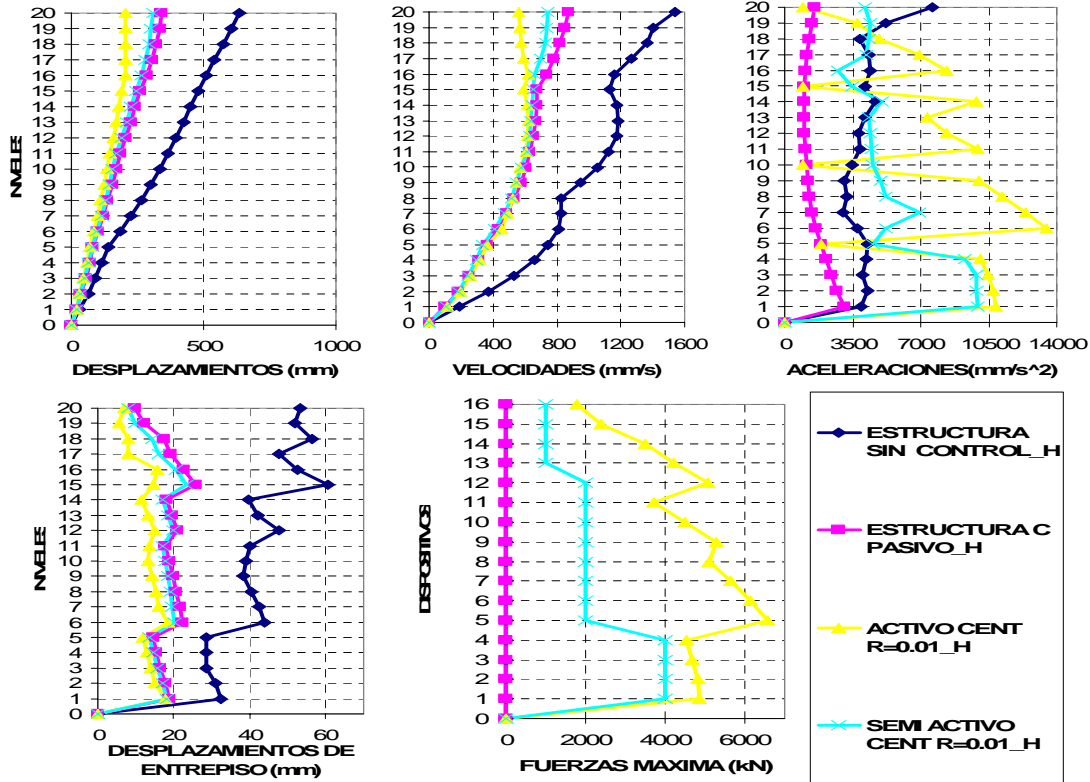


Figura 5.13 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Estructura de 20 Niveles. Hachi-NS. $R=0.01$

Las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles se presentan 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, por lo cual las mejoras no alcanzan la respuesta del control activo.

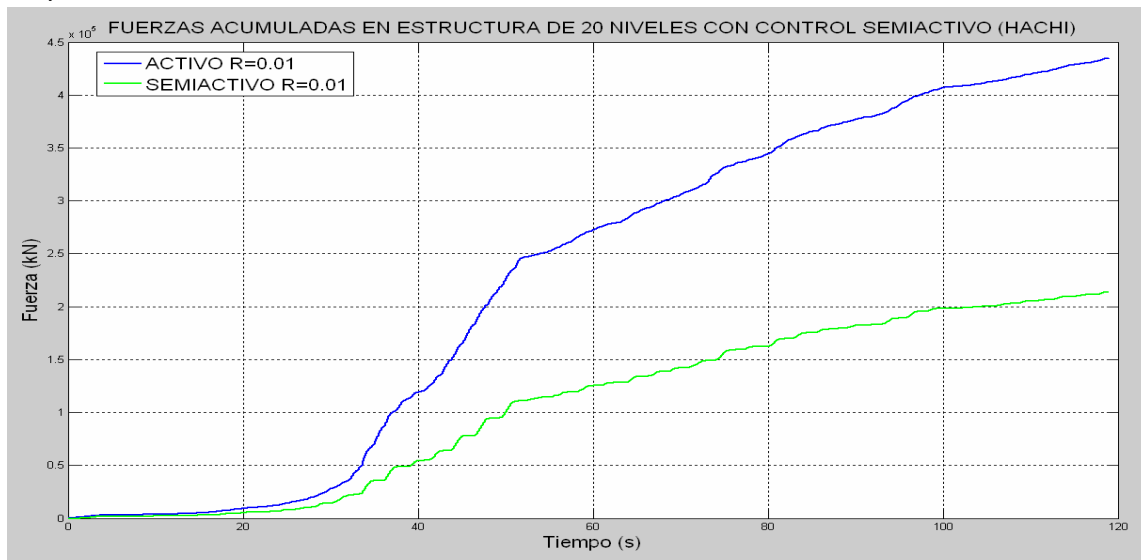


Figura 5.14 Fuerzas acumuladas del control activo y semiactivo centralizado. Hachi-NS $R=0.01$

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 proporcionaría por el control activo, razón por la cual la respuesta no alcanza los valores del control activo.

El control semiactivo tanto para estructuras bajas (5 niveles) como 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 5 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 proporcionar el control activo en estructuras altas.

DETERMINACIÓN, JUSTIFICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ACTIVO DESCENTRALIZADO PARCIALMENTE

GENERALIDADES

Como se ha mencionado en Capítulos anteriores el control centralizado resulta efectivo, sin embargo es muy difícil implementarlo en estructuras reales por los problemas como la transmisión y procesamiento de información. A partir de esto surge la idea de la descentralización. Pareciera ser que si dividimos el problema de control estructural con tanta información en pequeños problemas podremos dar solución al problema de escalamiento del control estructural, talvez no tan óptimo como esperamos pero se deberían obtener mejoras notables.

En este Capitulo se presenta la respuesta estructural del control activo con diferentes niveles de descentralización para los 3 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.

IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ACTIVO PARCIALMENTE DESCENTRALIZADO

El control activo pretende dar una solución óptima a un sistema global pero si no tiene la información suficiente resulta imposible; el modelado de una estructura con control parcialmente descentralizado se puede plantear como sistemas independientes donde 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 (basados en la leyes del mercado oferta - demanda) desarrollados por el mismo.

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 5 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" (mostrados 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. Se muestra en la figura 6.1 que cada "agente" recibe toda la información de todos los dispositivos, sin embargo 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, sin embargo la matriz de ganancia permite restringir dicha comunicación. A partir de la información permitida es obtenida la solución óptima por medio de la función LQR y se obtiene 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 3 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 2 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 4 subsistemas donde cada uno toma su propia decisión, es decir completamente descentralizado (figura 6.3 (c)).

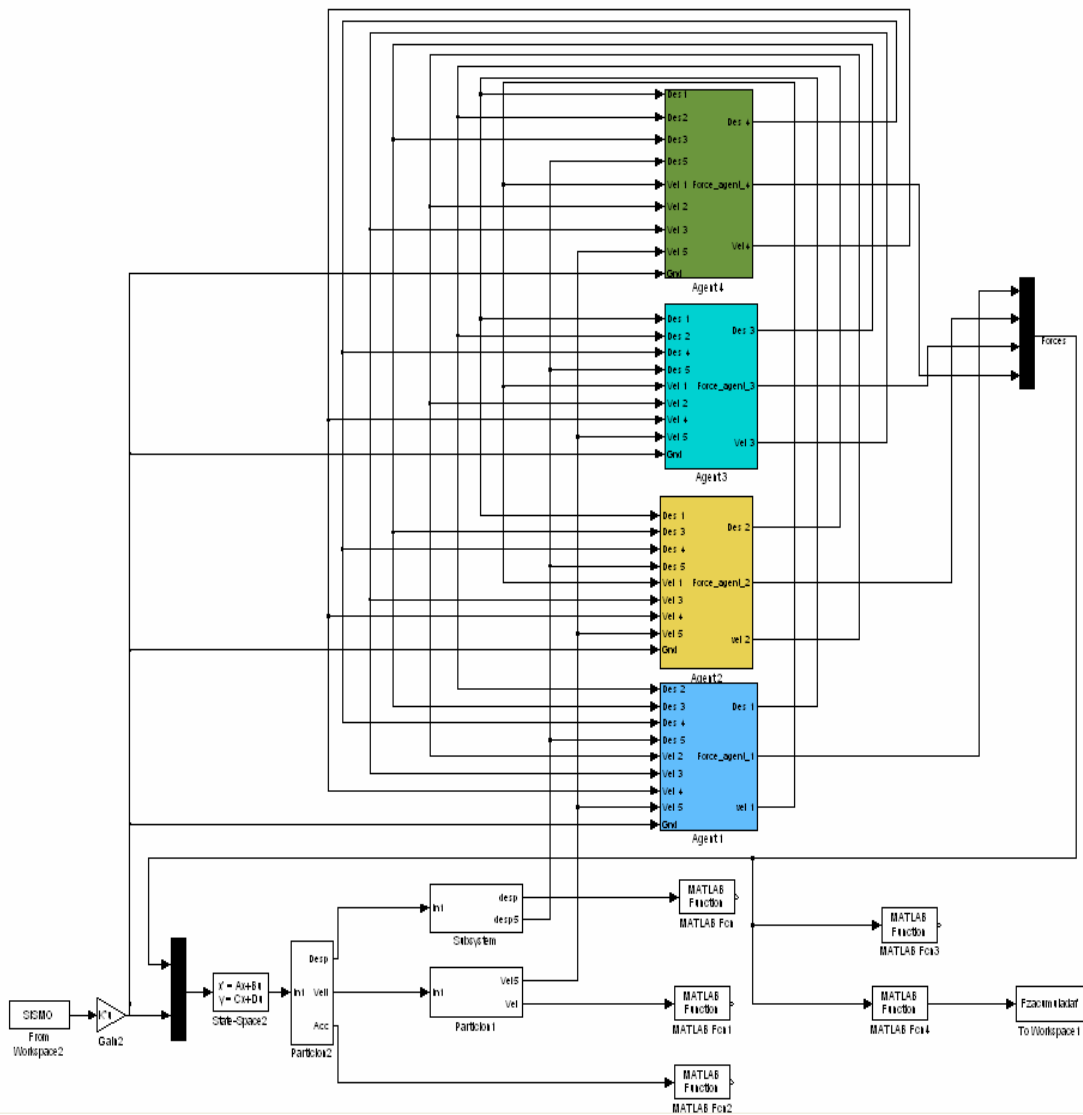


Figura 6.1 Modelo con control activo descentralizado (5 niveles)

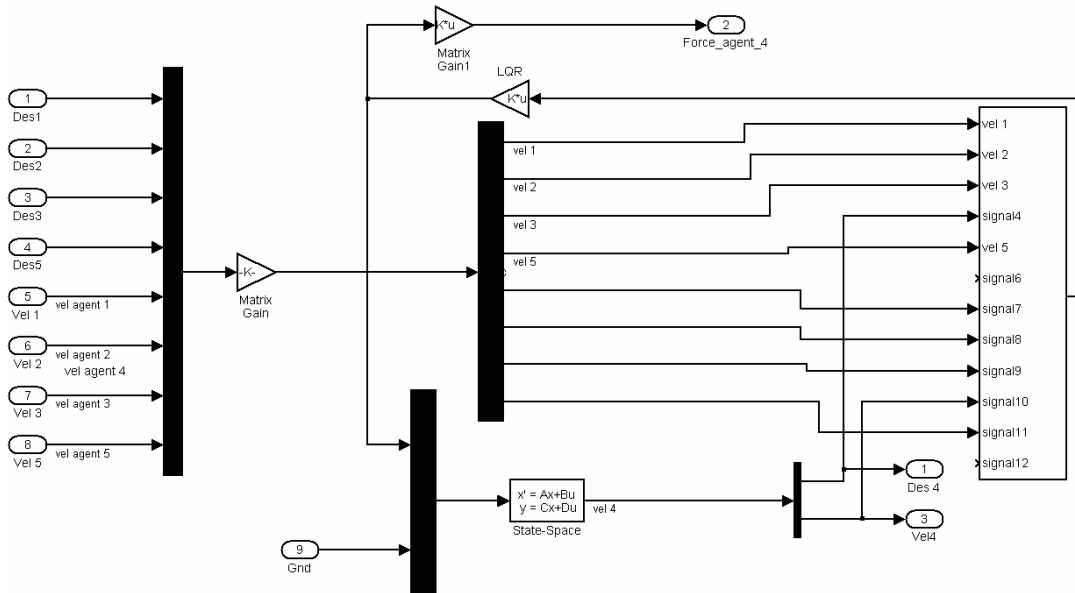


Figura 6.2 Agente del control descentralizado de cada dispositivo (5 niveles)

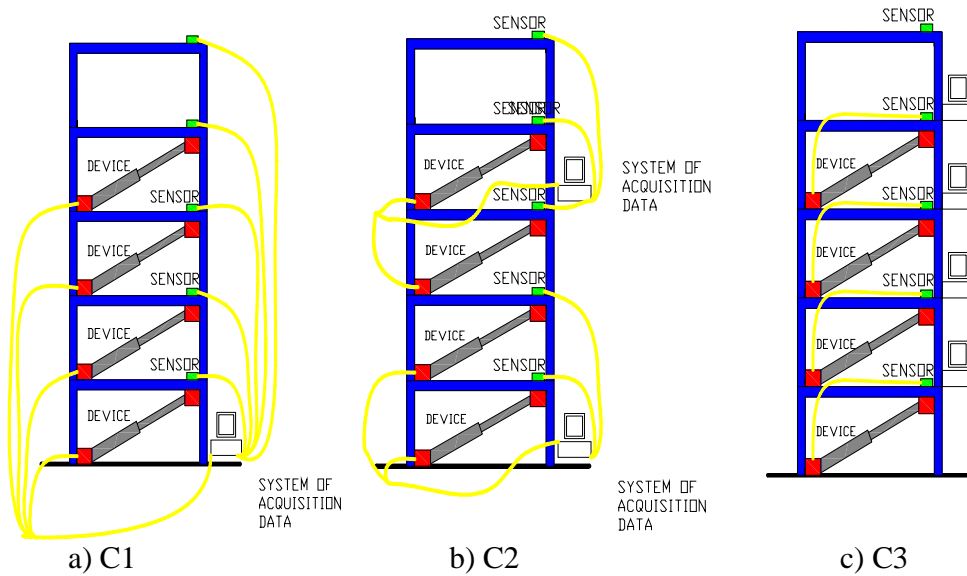


Figura 6.3 Niveles de descentralización

En este capítulo se presentan las comparaciones de las respuestas de la estructura de 5 niveles, con el peor comportamiento que es la estructura sin control, el mejor que es el control activo con $r = 0.03$ y control pasivo versus los 3 niveles de descentralización C1, C2 y C3.

Las figuras 6.4, 6.6 y 6.8 presentan la respuesta 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, presentan las fuerzas acumuladas para los 3 mismos registros antes mencionados respectivamente.

Las respuestas estructurales máximas que se producen en la estructura de 5 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 2 y requerimientos de fuerzas elevados en el nivel 4. Sin embargo en general presenta un comportamiento estable e inclusive presenta mejoras respecto al control pasivo.

Finalmente C3 presenta un comportamiento poco alentador para sistema, ya que se obtienen respuestas incluso 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 5 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 lo tanto cuando la existe centralización completa las fuerzas aplicadas son las mismas, sin embargo cuando existen 2 subsistemas necesita la mayor cantidad de fuerzas acumuladas y no alcanza los valores óptimos requeridos.

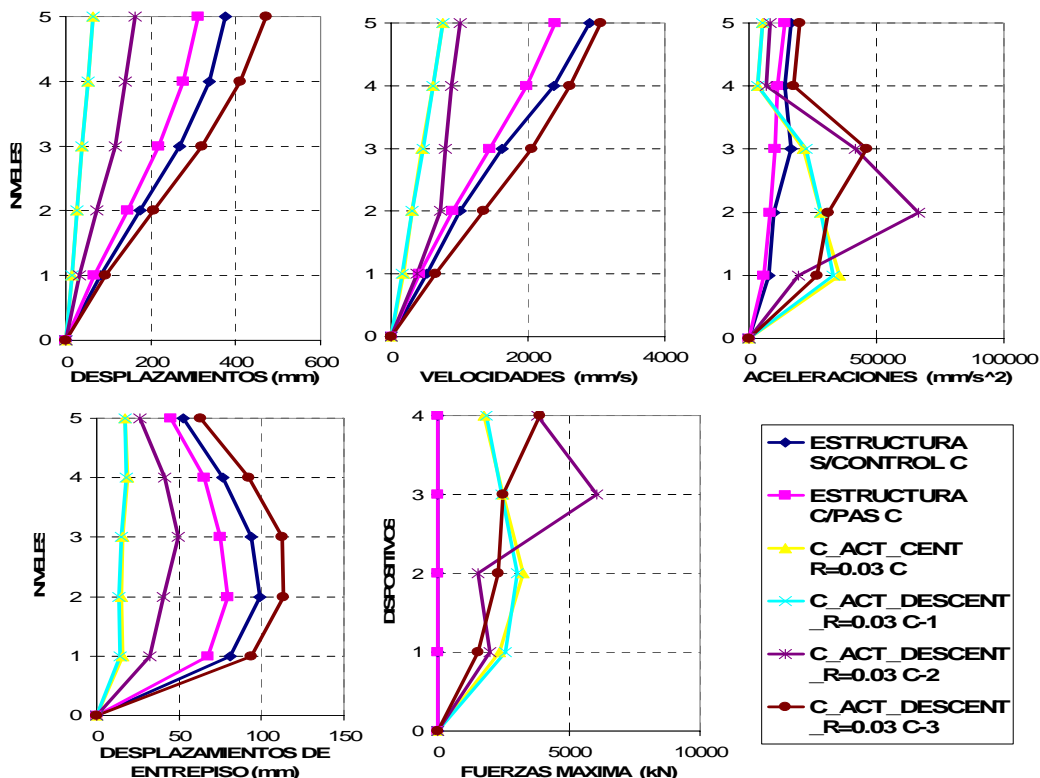


Figura 6.4 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Centro-NS. (Descentralizado)

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

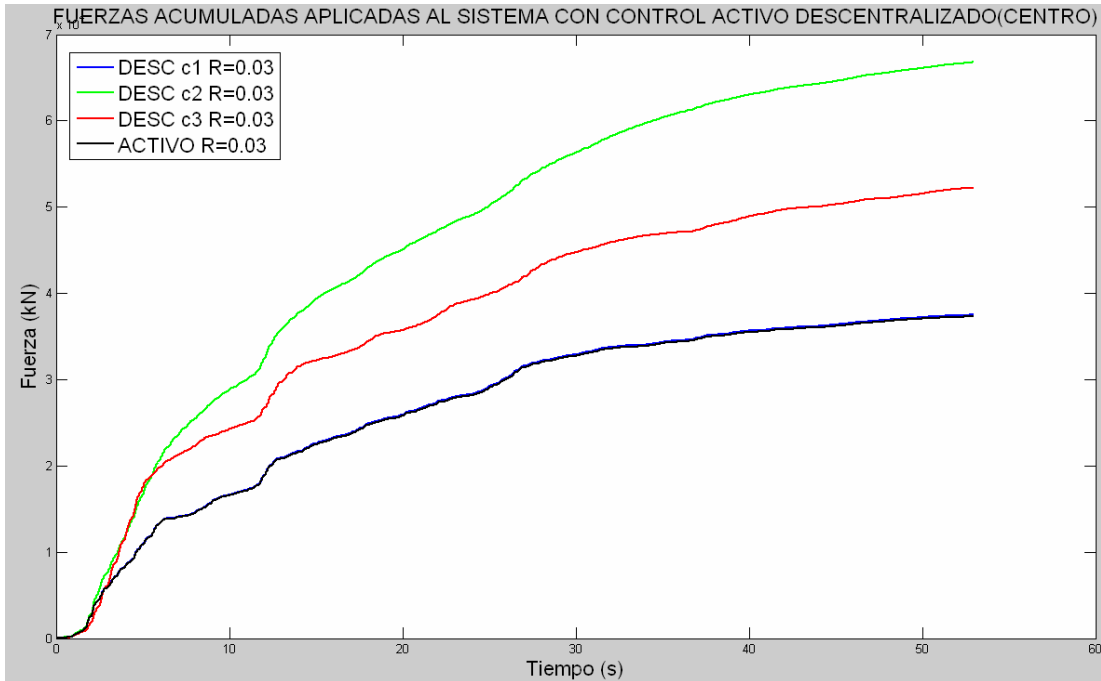


Figura 6.5 Fuerzas acumuladas aplicadas ante distintos niveles de descentralización para estructura de 5 niveles (Centro).

La figura 6.6 muestra el comportamiento máximo de la estructura para el sismo Taft-NS con respuesta similar a la obtenida con el Centro-NS. Sin embargo en este caso para C2, 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.

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

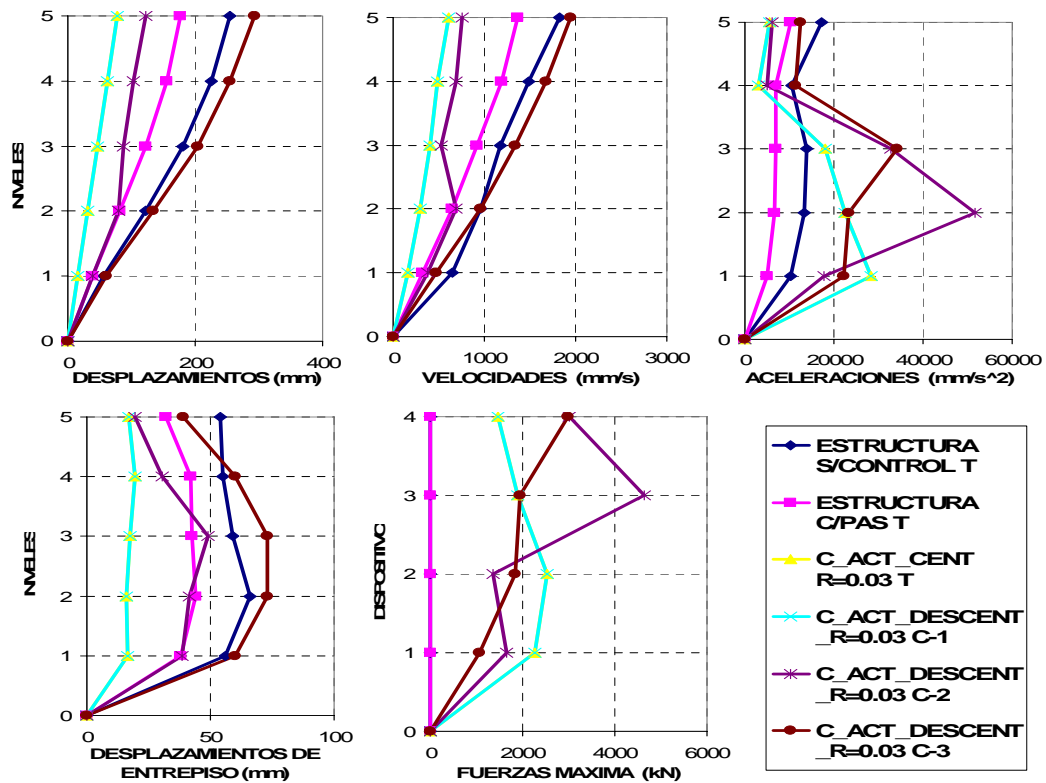


Figura 6.6 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Taft-NS. (Descentralizado)

La figura 6.7 exhibe las fuerzas acumuladas aplicadas al sistema ante el sismo Taft-NS con los 3 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 es problema en subsistemas, en primera no se alcanzan los niveles de C1, además se requiere mas de un 50% de fuerzas.

Las fuerzas acumuladas requeridas con C3 son superiores a las óptimas, sin embargo son 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.

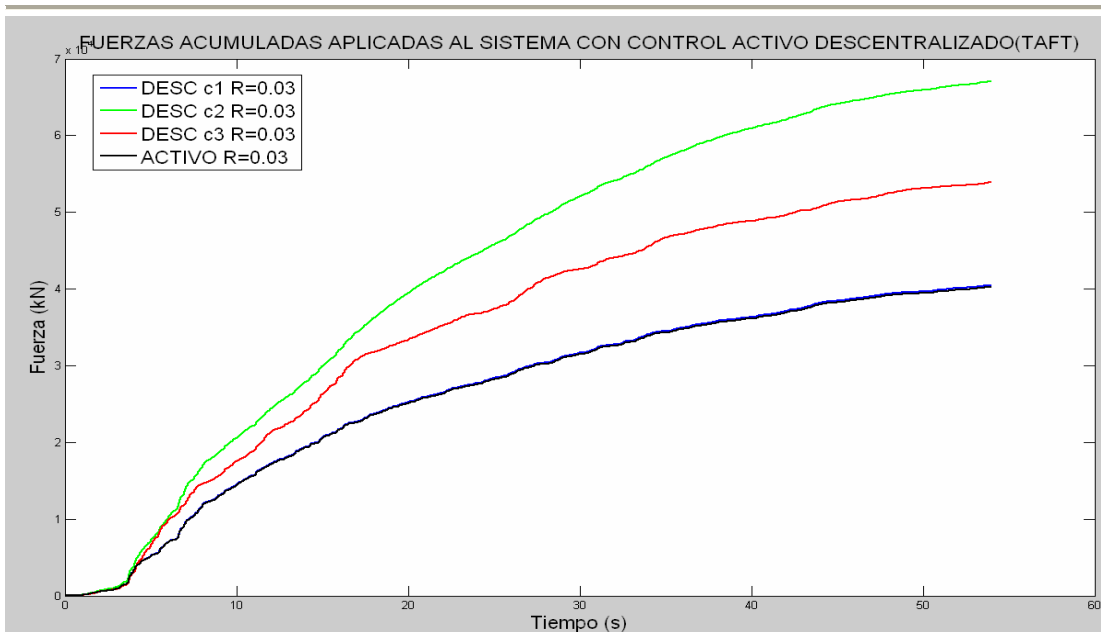


Figura 6.7 Fuerzas acumuladas aplicadas ante distintos niveles de descentralización para estructura de 5 niveles (Taft).

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.

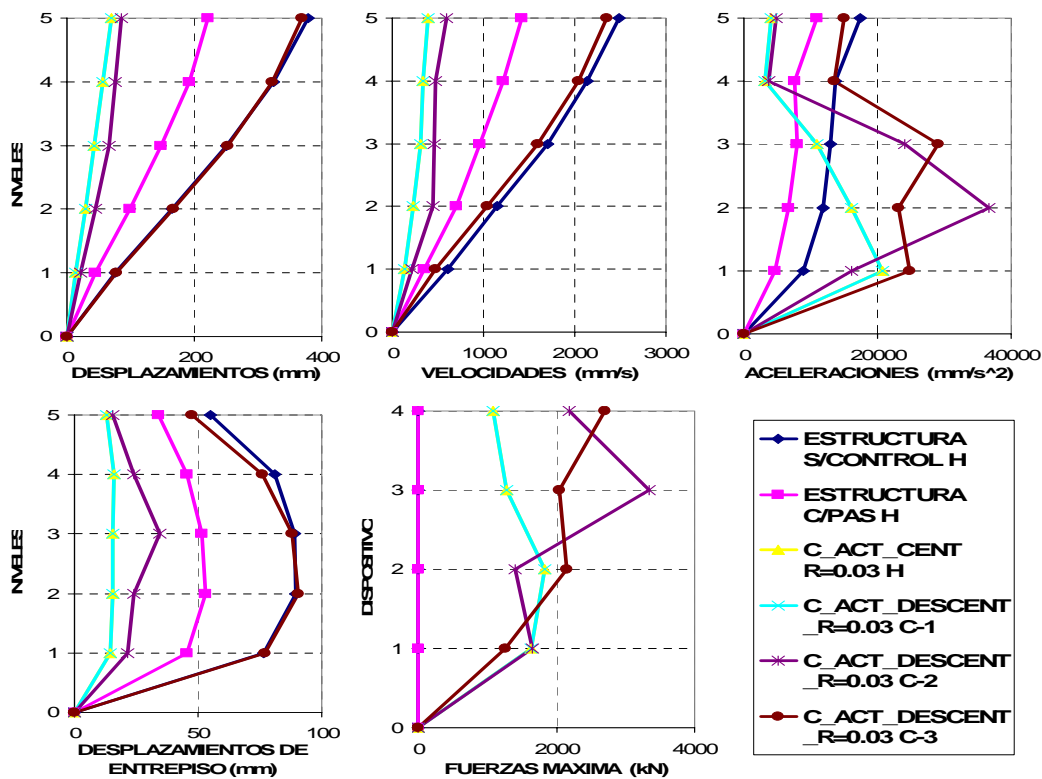


Figura 6.8 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Hachi-NS. (Descentralizado)

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.

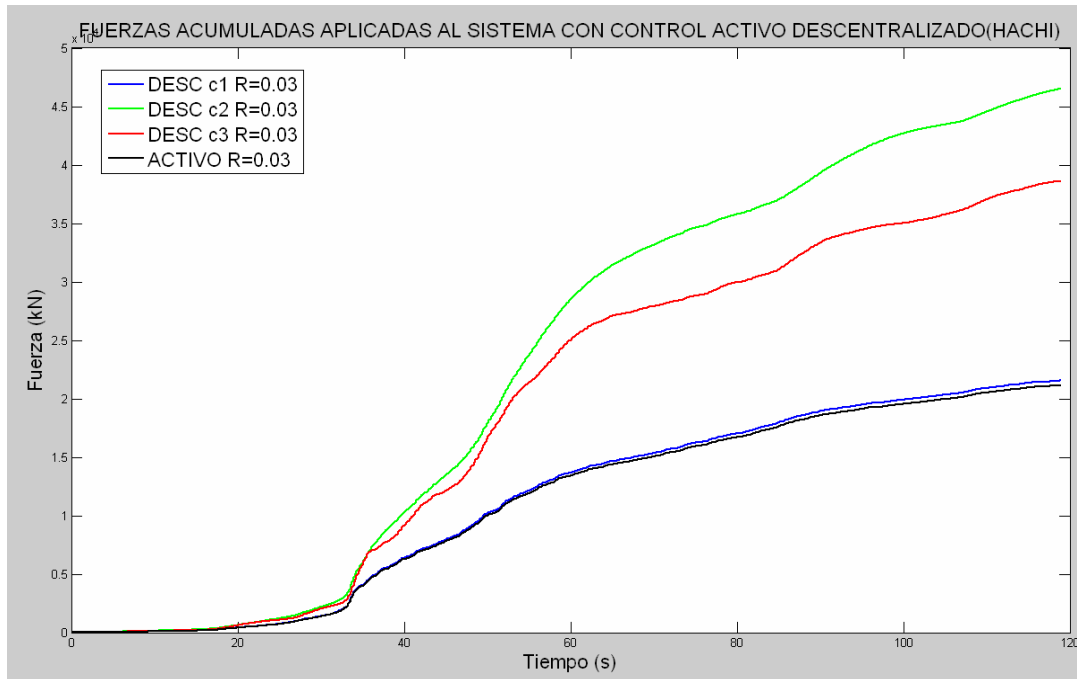


Figura 6.9 Fuerzas acumuladas aplicadas ante distintos niveles de descentralización para estructura de 5 niveles (Hachi).

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 3 registros utilizados. Sin embargo tiene un costo relativamente alto pues requiere mayores cantidades de fuerzas sin poder alcanzar las mejoras del control ideal, es decir el control activo centralizado.

Al parecer el control activo descentralizado completamente desestabiliza la estructura, es decir no mejora la respuesta estructural con respecto al control pasivo e inclusive tiene una respuesta más desfavorable que la misma estructura sin control. Esto se puede atribuir a que talvez cuando intentar proporcionar una solución óptima para una condición local, puede ser la más desfavorable para es sistema global, razón por la cual las respuestas son afectadas.

CAPITULO 7 IMPLEMENTACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DE CONTROL SEMIACTIVO DESCENTRALIZADO

GENERALIDADES

El control estructural es una manera inteligente de minimizar el daño de las estructuras civiles. El control pasivo, activo y semiactivo, estos 2 últimos centralizados e inclusive descentralizado parcialmente son adecuados y mejoran el comportamiento estructural, como se ha observado en capítulos anteriores. En este Capítulo se propone una nueva manera controlar la estructura a base de control semiactivo totalmente descentralizado.

La principal finalidad es evitar la implementación del control activo debido a los altos requerimientos de energía y problemas de escalamiento. Sin embargo se propone un algoritmo más efectivo que el pasivo, con la posibilidad de cambiar su comportamiento durante un evento sísmico y obtener un desempeño mayor.

DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

Las ventajas del control semiactivo despertaron el interés de la gente, tanto para desarrollar nuevos dispositivos como para implementarlos. Tal es el caso de Kurino *et al* (2003), quien en sus trabajos desarrolla un dispositivo de aceite el cual permite controlar el coeficiente de amortiguamiento. Dicho dispositivo establece su funcionamiento en la apertura de válvulas expresadas como compartimientos y resortes llamado “HiDAX”, refiriéndose como un sistema de alto amortiguamiento de nueva generación. Ciertamente se puede reconocer de esta forma, por que estos sistemas resulta más económicos y funcionales que los utilizados en el control activo.

En la actualidad los dispositivos HiDAX son ejemplares para los requerimientos del control estructural. El trabajo realizado por Kurino consistió en la implementación de dichos dispositivos en modelos teóricos así como la real de un edificio en 2003.

El trabajo de Kurino *et al* resulta muy importante ya que presenta todo el desarrollo teórico y práctico del funcionamiento de los dispositivos “HiDAX”. Es decir, permite determinar las ventajas de este tipo de control. Este sistema permite disipar una mayor cantidad de energía (hasta 2 veces más energía que un sistema pasivo ordinario). El algoritmo funciona sólo de 2 modos, ya sea encendido o apagado (Kurino *et al* 2003).

La figura 7.1 presenta el modelo de Kurino *et al*, llamado “bang bang”, el cual sólo presenta 2 niveles de fuerza de amortiguamiento (C_{min} y C_{max}), sin embargo sus valores están en función de las características del dispositivo. La ecuación 7.1 presenta la formula del control.

$$F\dot{x} \geq 0 \circ |F| \leq F_o \Rightarrow C(t) = C_{max}$$

$$F\dot{x} < 0 \circ |F| > F_o \Rightarrow C(t) = C_{min}$$

Ec. 7.1 y 7.2

Donde F_o representa la fuerza mínima que aplica el dispositivo, $C(t)$ el coeficiente de amortiguamiento, k rigidez y Fx expresa el control de energía del amortiguador de Maxwell. En la figura 7.1 se expresa el proceso de la 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} otra vez.

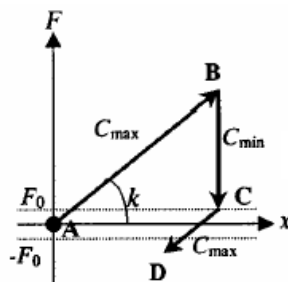


Figura 7.1 Modelo de Kurino et al (2003)

El trabajo de Kurino se ha implementado satisfactoriamente en un edificio que tiene como uso Hotel y oficinas. En él se montaron 72 HiDAX con la finalidad de controlar los fuertes vientos. Esta aplicación permite ver que la utilidad no sólo se da en zona sísmica.

El trabajo de Kurino tiene como punto central la creación de un sistema descentralizado. La idea principal es que no tenga que depender de información que se encuentre en otro dispositivo, o sensor. La finalidad de este control es que cada aparato tenga lo necesario para cambiar sus propiedades. Del mismo modo sea capaz de responder más rápidamente sin necesidad de una computadora central que tenga problemas de cables, conexiones o capacidad de procesamiento. Estas características resultan interesantes ya que se busca el mismo objetivo de este trabajo.

En base a que la modificación de las propiedades del dispositivo durante un evento se puede incrementar la eficacia del sistema de control, surgió la tarea de decidir cuando y cómo hay que modificar dichas propiedades, con la finalidad de proporcionar un mejor comportamiento de las estructuras. Apoyados en esta 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 la ventajas que presentan los nuevos amortiguadores como los MR.

Existen varias ideas que podrían aplicarse en la búsqueda de una solución simple y efectiva, pero que finalmente tienen el mismo concepto; a continuación se presentan 2 ejemplos para tratar de explicar dichos conceptos

La primera idea del control surge de lo que se conoce en charrería como "Piales" (Ver figura 7.2). Consiste en lazar únicamente las patas a 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 tiempo que resulta bastante difícil, entretenido y divertido a la vez que riesgoso (<http://www.prodigyweb.net.mx/perezdia/jaripeo/jaripeo-jaripeo.html>). Esta acción no es tan sencilla como parece, ya que si se detiene muy rápido se puede romper la reata y si no, se puede escapar el equino.



Figura 7.2 Píales en el Lienzo

Si se aplica este concepto a las estructuras, se observa que la intención es detener el movimiento de la misma sin dañarla, es decir incrementando la fuerza aplicada pero de manera gradual y no súbitamente (tal como se hace en la charrería). Sin embargo se deben tomar en cuenta las limitaciones que proporciona el control semiactivo. Cabe mencionar que el sistema no se desestabiliza por 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. Se puede explicar con otro ejemplo simple; imagine 2 huevos (Ver figura 7.3 (a) y (b)) que se arrojan hacia arriba a 3 metros de altura (Ver figura 7.3 (c) y (d)), el primero lo recibe con un recipiente estático (Ver figura 7.3 (e)) colocado a la misma altura donde lo arrojó; mientras que el segundo cae en otro recipiente que lo recibe con un movimiento en la misma dirección (Ver figura 7.3 (f)), con la finalidad de amortiguar su caída. Como se puede ver, el segundo huevo se encuentra intacto (Ver figura 7.3 (h)), sin embargo el otro no (Ver figura 7.3 (g)), ahora imaginemos que el huevo es una estructura. Y para finalizar sólo hay que cuestionar: ¿En cual de los 2 huevos le gustaría estar? La respuesta resulta obvia, ahora sólo queda especificar como se llevará a cabo dicha acción.

Los fines de este algoritmo están basados en que las fuerzas de control son independientes. A partir de esto 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 ya que como menciona Kurino (2003), Kurata (1999) y Dyke (1996), se puede controlar la fuerza modificando el coeficiente de amortiguamiento. De hecho los 2 últimos han realizado pruebas ante requerimientos aleatorios con resultados aceptables.

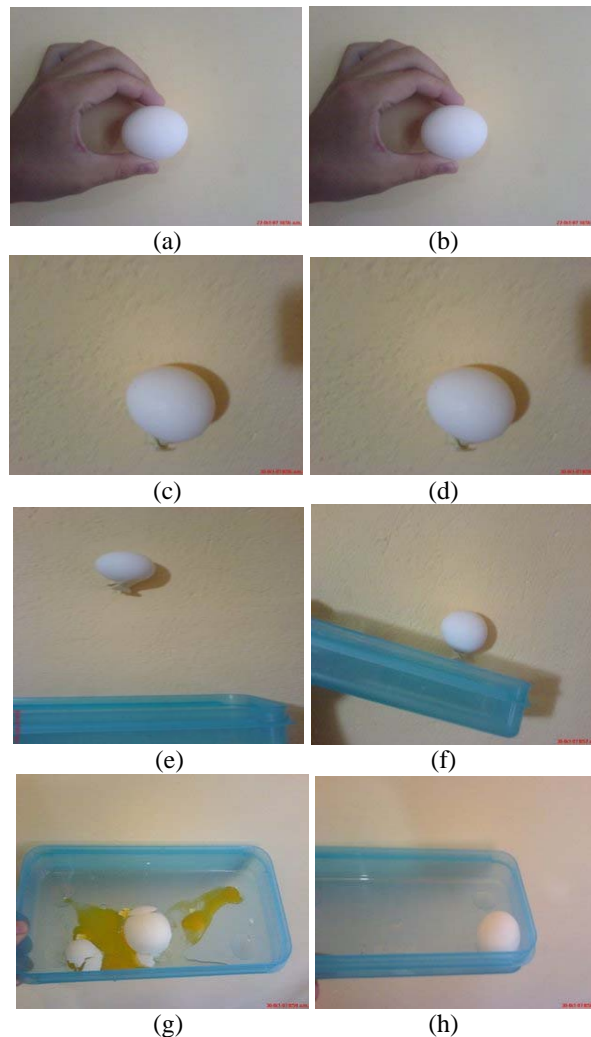


Figura 7.3 Descripción física del fundamento del algoritmo. Ejemplo 2

Es sabido que lo peor que puede ocurrir en el control semiactivo es que no funcione y que se comporte como un simple control pasivo, lo cual no es malo pero no es lo que se pretende. 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 2 ejemplos mostrados al principio de este Capítulo.

El comportamiento ideal es básicamente comenzar a incrementar las fuerzas con una cierta pendiente partiendo de cero hasta alcanzar el valor máximo que puede proporcionar el dispositivo. Indudablemente es necesario saber 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 desprecia.

En el algoritmo únicamente se utilizan las velocidades de cada uno de los niveles (es decir 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.

Con respecto al 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 las fuerzas disminuye al mínimo y se repite el mismo proceso pero en sentido inverso. En general, el algoritmo propuesto está definido por las ecuaciones 7.3 a 7.8:

$$Fr = \begin{cases} N * contp1 \rightarrow vi > 0 \mid vi = 0 \mid N * contp1 < 1000 \\ -N * contn1 \rightarrow vi < 0 \mid -N * contn1 < -1000 \\ 1000 \rightarrow N * contp1 > 1000 \\ -1000 \rightarrow -N * contn1 < -1000 \end{cases} \quad \text{Ec. 7.3 y 7.8}$$

$$F = \begin{cases} Fr \rightarrow Fr \leq (vi * C \max) \mid \\ vi * C \max_i \rightarrow |Fr| > (vi * C \max) \mid \end{cases}$$

Donde vi es la velocidad de cada nivel donde se encuentra cada 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 1 cuando cambian de signo. A partir de dichas reglas, las fuerzas aplicadas al sistema tienen el comportamiento que se observan en la figura 7.4.

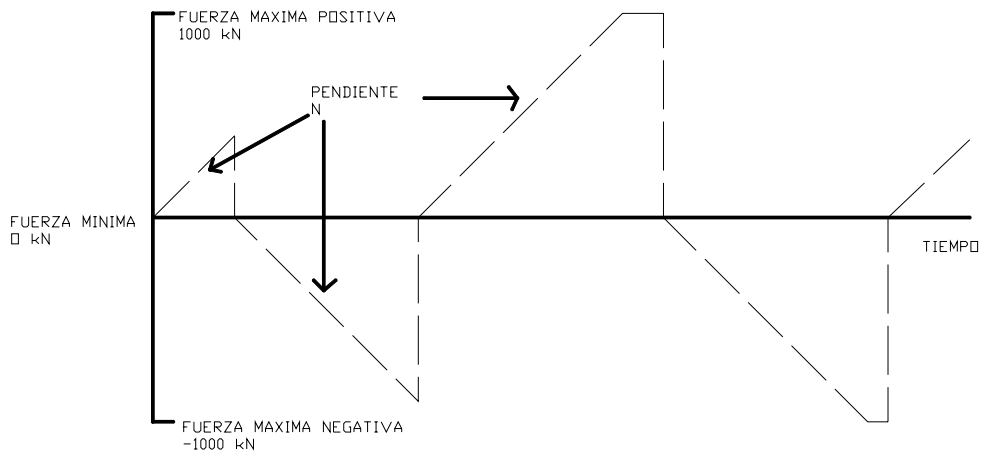


Figura 7.4 Comportamiento del algoritmo propuesto.

Las fuerzas aplicadas son básicamente las que se pueden proporcionar por 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 hace el modelo completamente descentralizado que pueda tomar una decisión propia para un mejor comportamiento dinámico. La idea principal es que sólo a partir de la velocidad del nivel donde se encuentra el dispositivo, éste responda de la mejor manera.

En la figura 7.5 se muestra el esquema del modelo para la estructura de 5 niveles. El modelado de este control es básicamente el mismo al 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 solo 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.

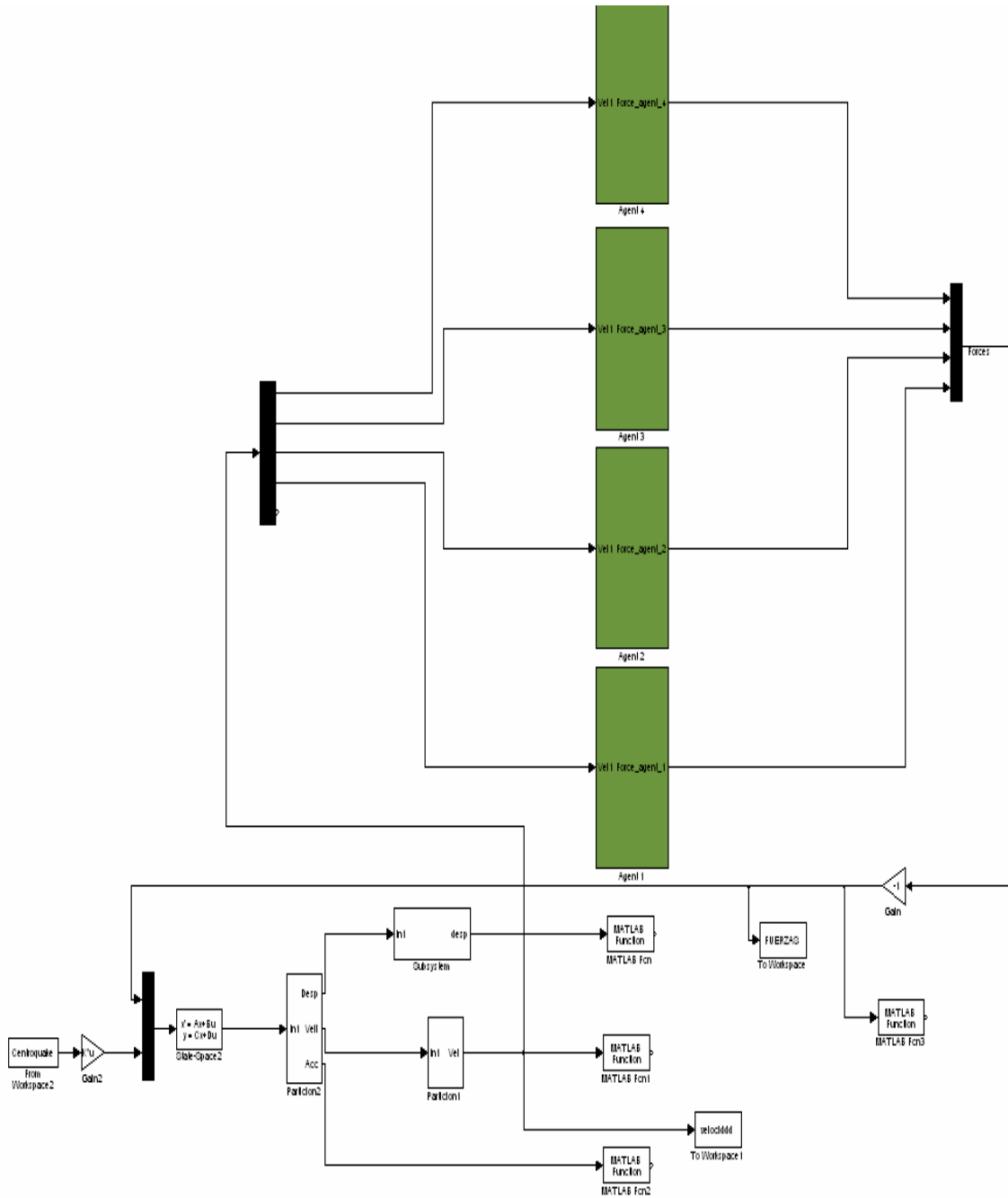


Figura 7.5 Diagrama de modelado para algoritmo propuesto (5 Niveles).

Las fuerzas aplicadas son determinadas por el algoritmo propuesto de manera autónoma en cada uno de los agentes (marcados en verde) que representan a cada dispositivo, 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.

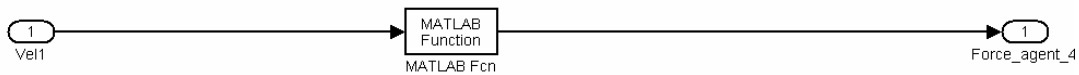


Figura 7.6 Proceso llevado a cabo en cada agente de manera descentralizada.

IMPLEMENTACION 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, y se presentan los resultados ante 5 diferentes pendientes, para los sismos definidos en el Capítulo 3.

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

Paso (s)	N (kN)	Pendiente (kN/s)
0.001	1	1000
0.001	0.1	100
0.001	0.05	50
0.001	0.01	10
0.001	0.001	1

Las figuras 7.7, 7.9 y 7.11 presentan las comparaciones de las respuestas de la estructura de 5 niveles obtenidas ante los 3 registros a lo largo de esta investigación. Como base se presenta la respuesta del modelo sin control, con control pasivo y con control activo con $r=0.03$. Posteriormente se presentan las respuestas ante las 5 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 3 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, sin embargo los demás parámetros con pendientes grandes mejoran dicho control. Cabe mencionar que la respuesta del control activo aún puede mejorar modificando la variable r . Las fuerzas máximas aplicadas se incrementan conforme a las pendientes, ya que alcanzan su fuerza máxima más rápidamente.

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

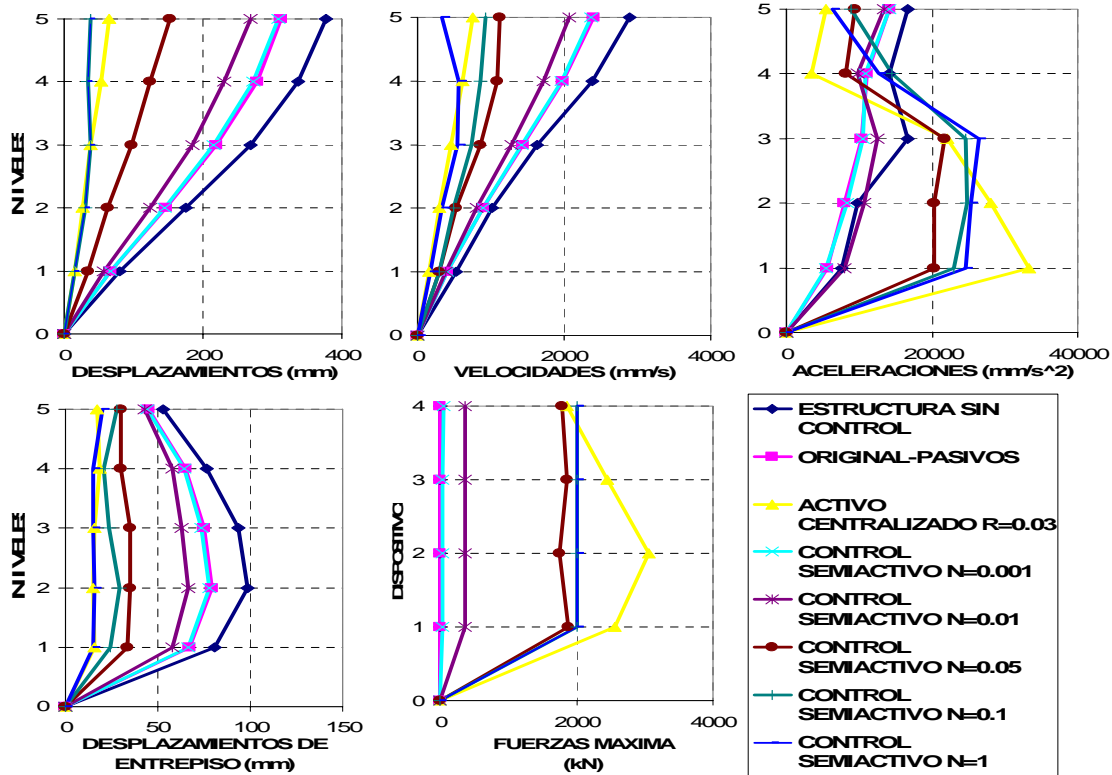


Figura 7.7 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entresijos y fuerzas máximas. Centro-NS. (Propuesta)

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

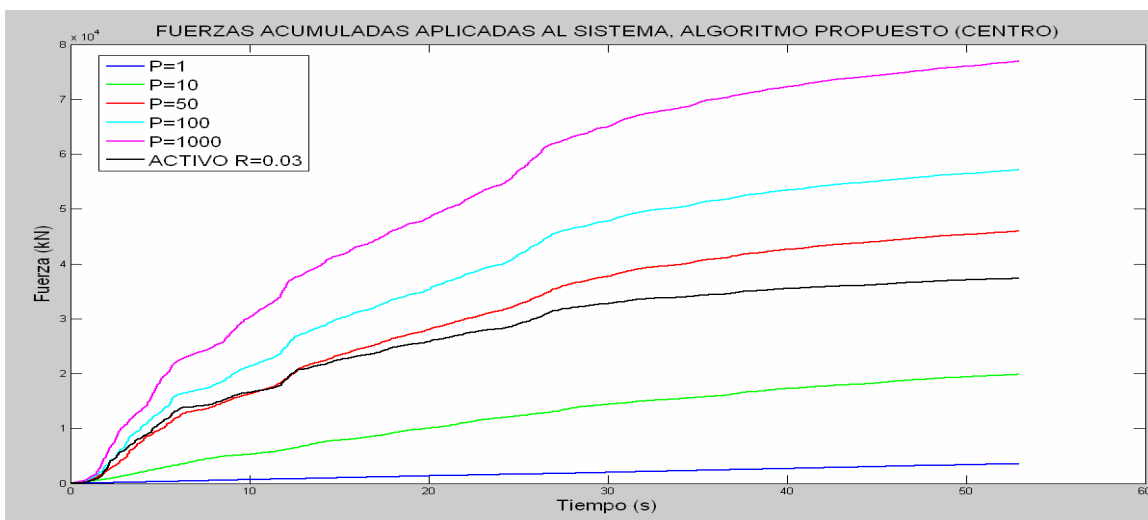


Figura 7.8 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de 5 niveles (Centro).

La figura 7.9 presenta las respuestas estructurales máximas ante el sismo Taft-NS, presenta un comportamiento similar al registro Centro-NS, es decir pequeñas mejoras con pendiente pequeña y se incrementan con pendientes grandes. También de presentan incrementos en las aceleraciones en los primeros 3 niveles 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 el control activo 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 pasar es que no funcione y quede como control pasivo.

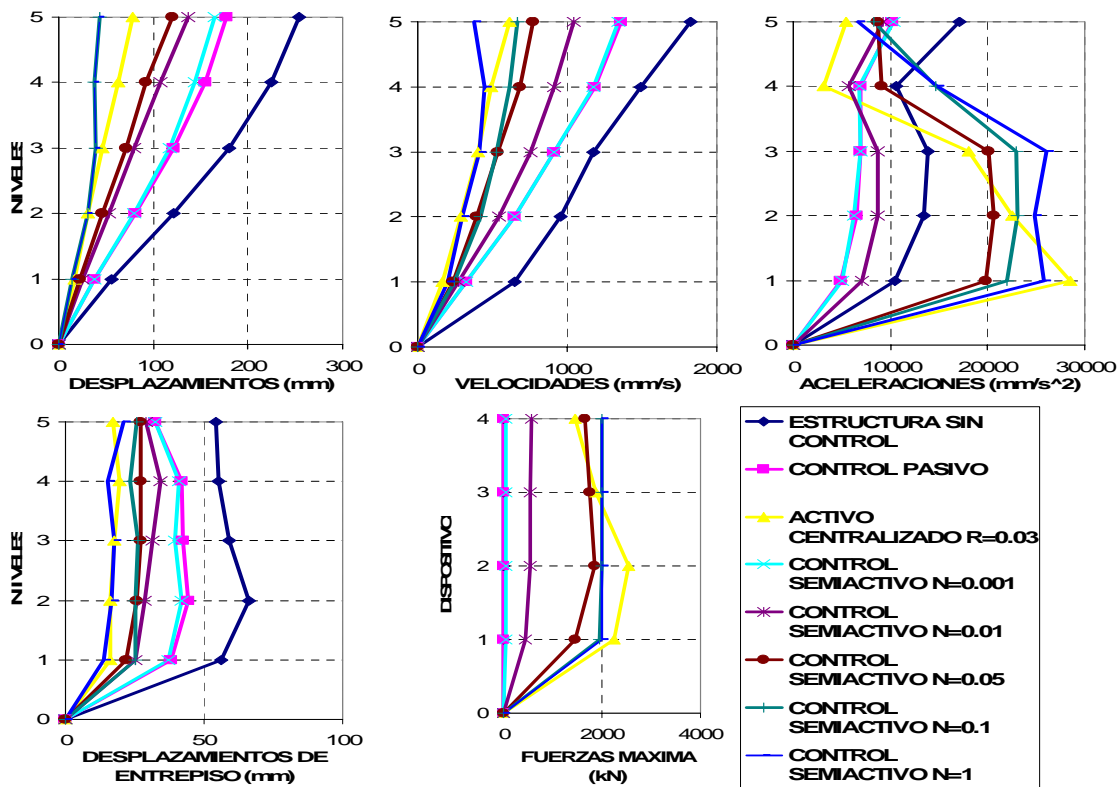


Figura 7.9 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Taft-NS. (Propuesta)

En la figura 7.10 se presentan las fuerzas acumuladas aplicadas al sistema ante diferentes pendientes con el registro Taft-NS. Se distingue similitud en la energía aplicada por el control activo y el control propuesto con $P=50$, sin embargo la respuesta no es mejorada a los niveles del control activo. A partir de ello se puede observar un desperdicio de energía aplicada al sistema, sin embargo permite mejorar el comportamiento.

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

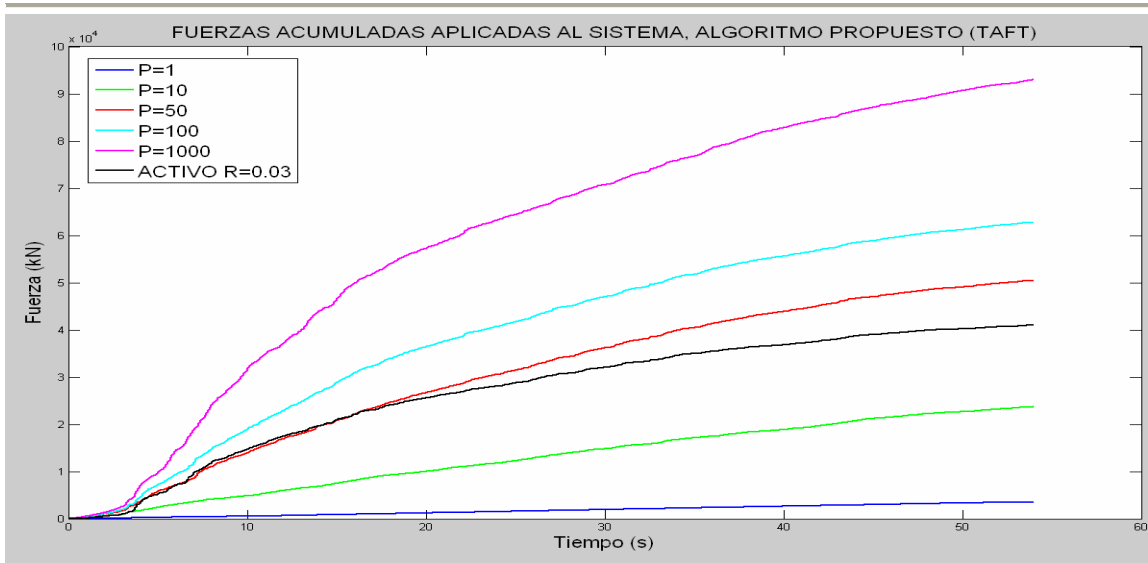


Figura 7.10 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de 5 niveles (Taft).

Finalmente la figura 7.11 muestra la respuesta ante el registro Hachi-NS, con un comportamiento muy similar. La respuesta es mejorada y con una pendiente muy alta puede alcanzar e incluso superar la respuesta del control activo con mas facilidad. 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.

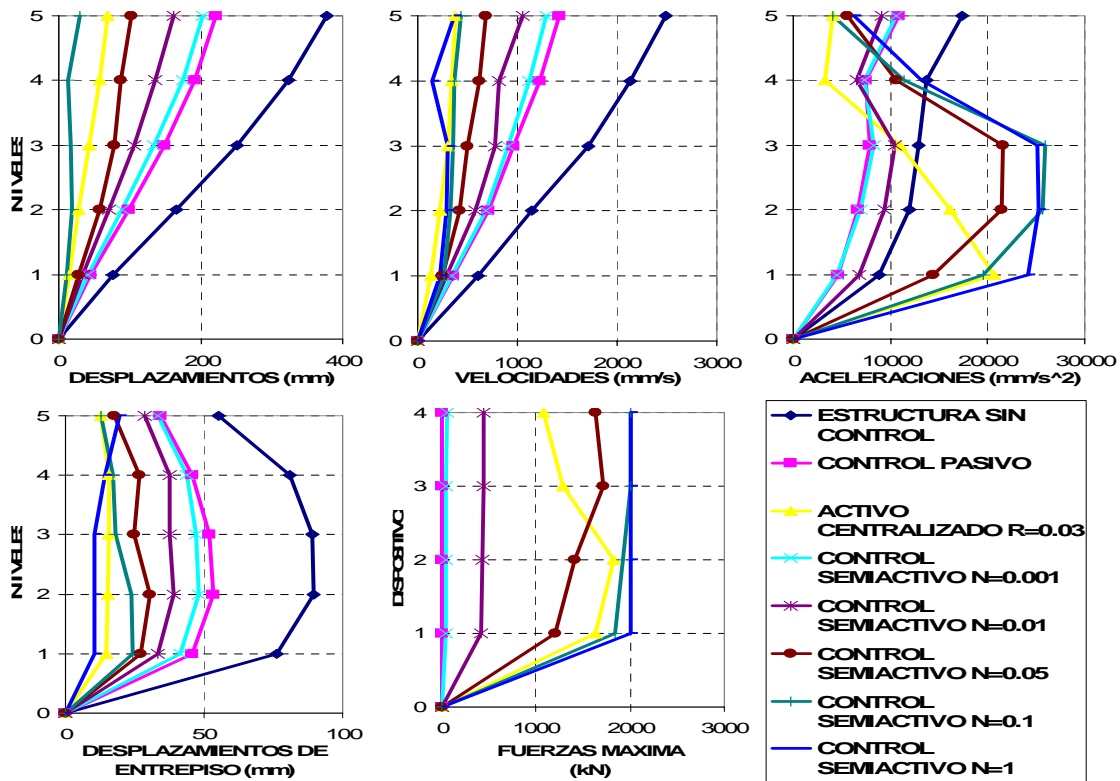


Figura 7.11 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Hachi-NS. (Propuesta)

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 2 registros.

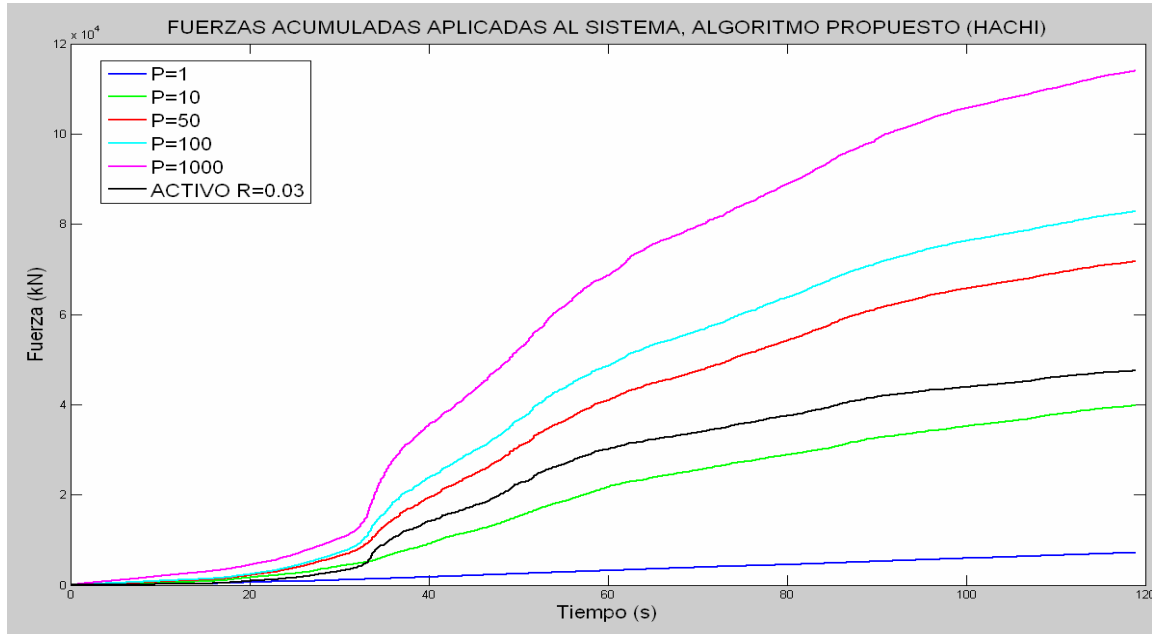


Figura 7.12 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de 5 niveles (Hachi).

En general para la estructura de 5 niveles se observan mejoras ante los 3 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 casi alcanzando los valores del control activo ($r=0.03$).

Definitivamente este control no afecta el sistema sin embargo conforme el incremento de fuerzas es más grande la efectividad del algoritmo se ve mejorado. Las velocidades presentan un comportamiento muy similar a los desplazamientos. Si la pendiente incrementa las velocidades máximas se reducen, con lo que los contenidos estarán más seguros.

Las aceleraciones de los entrepisos resultan afectadas con el incremento de la pendiente, pero algún costo se tiene que pagar, sin embargo 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 que se verifica la efectividad del algoritmo para estructuras bajas se procede 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 presenta del mismo modo.

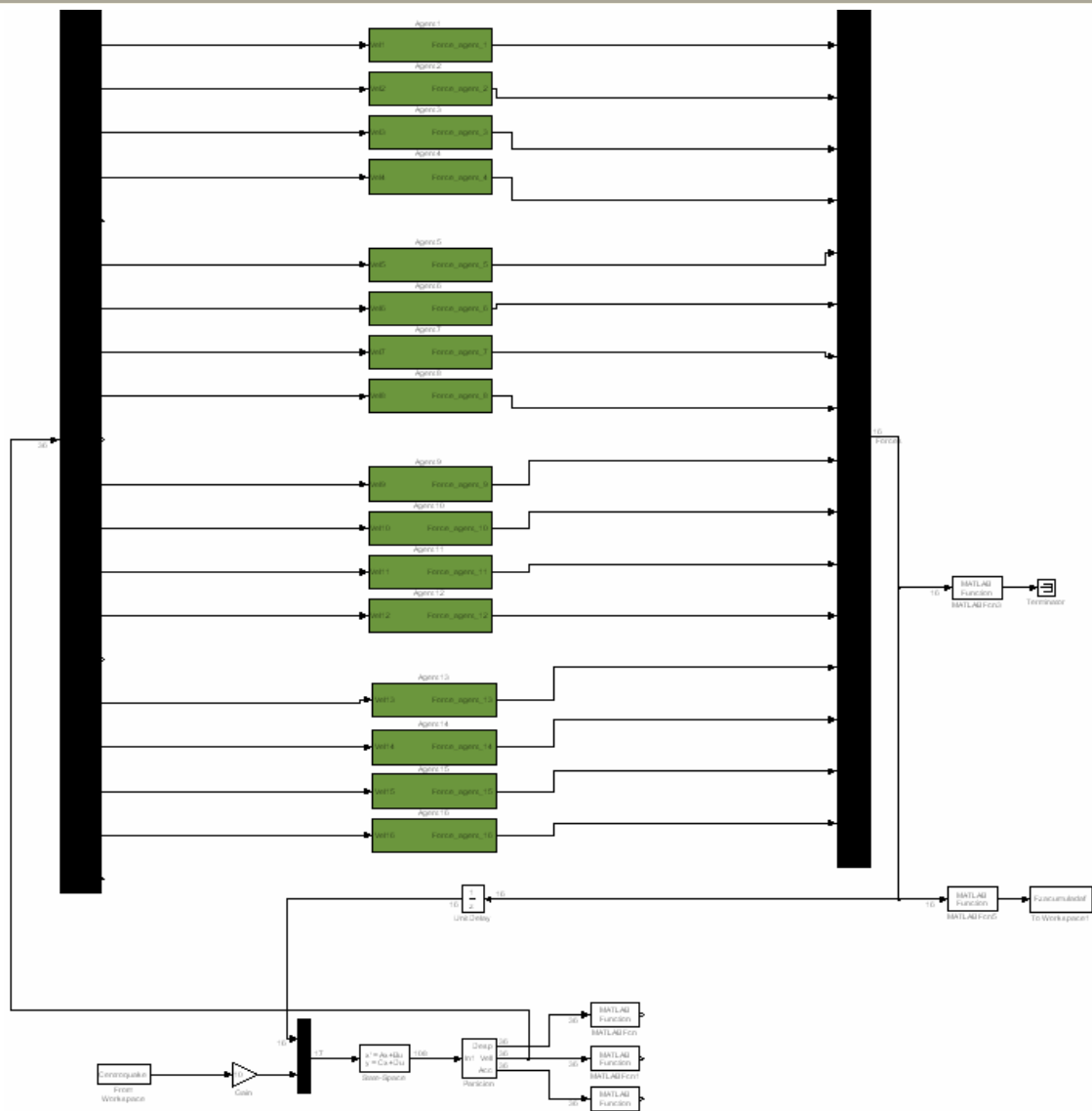


Figura 7.13 Diagrama de modelado para algoritmo propuesto (20 Niveles).

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

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

Paso (s)	N (kN)	Pendiente (kN/s)
0.0001	5	50000
0.0001	1	10000
0.0001	0.1	1000
0.0001	0.05	500
0.0001	0.01	100
0.0001	0.001	10
0.0001	0.0001	1

Se implementa el sistema para la estructura de 20 niveles y se obtiene su respuesta ante los 3 diferentes registros. Las figuras 7.14, 7.16 y 7.18 presentan las respuestas de la estructura ante los sismos del Centro-NS, Taft-NS y Hachi-NS respectivamente. Las respuestas comparadas toman como referencia la estructura con control pasivo y activo centralizado (ideal) ya que como se observa en las figuras, las respuestas de la estructura sin control difieren del resto de las respuestas.

Por otro lado las figuras 7.15, 7.17 y 7.19 presentan las fuerzas acumuladas aplicadas al sistema para los 3 distintos registros señalados y se comparan con las fuerzas acumuladas del control ideal.

La figura 7.14 presenta la respuesta obtenida de la simulación ante el registro Centro-NS. La respuesta del modelo sin control para desplazamientos, velocidades y desplazamientos de entrepiso no se presenta completa ya que se logra observar la parte más importante son las mejoras con respecto al control pasivo. Ante este registro las pendientes grandes permiten reducir las respuestas, sin alcanzar los valores del control ideal, sin embargo las fuerzas máximas son inferiores a las que necesita el control activo.

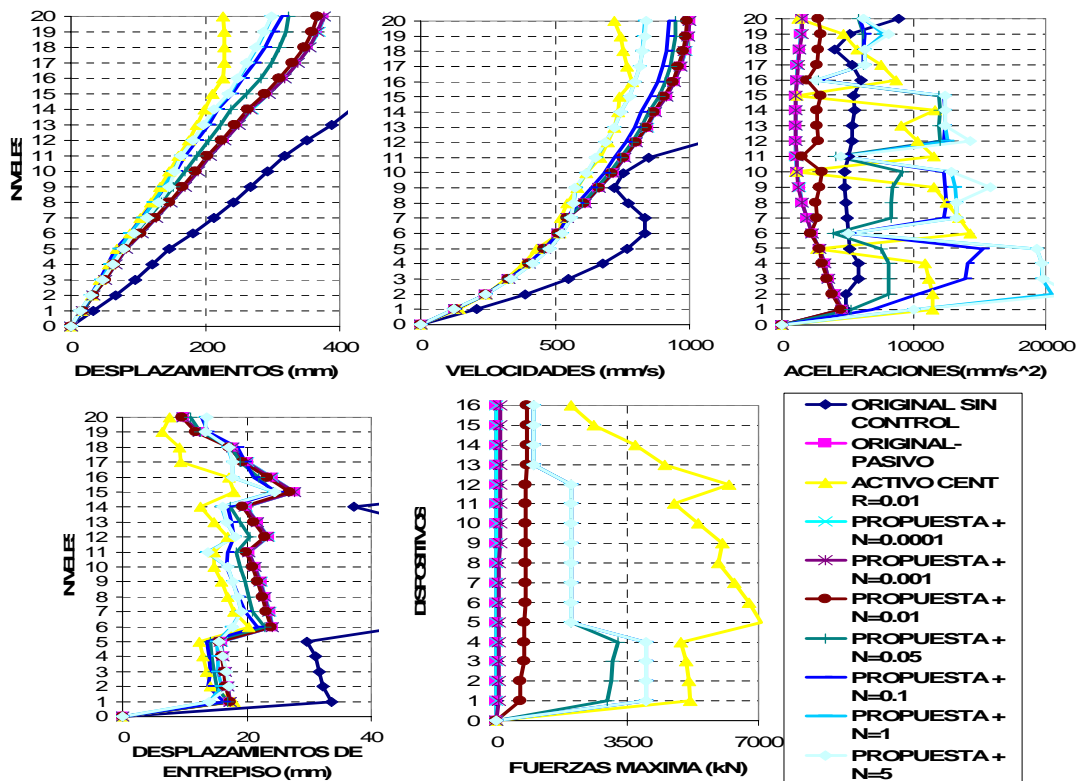


Figura 7.14 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Centro-NS. 20 Niveles (Propuesta)

La figura 7.15 muestra las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de 20 niveles. 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.

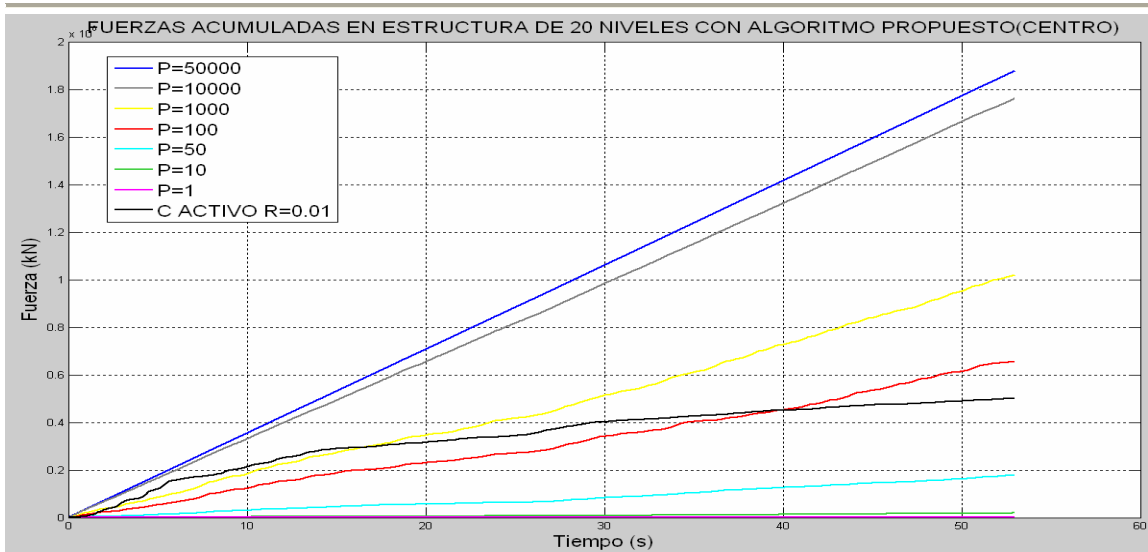


Figura 7.15 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de 20 niveles (Centro).

La figura 7.16 presenta las respuestas máximas de la estructura ante en 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 producir mejoras notables, ya que éstas podrían afectar el comportamiento el cual se puede ver en los desplazamientos de entrepiso. También es sabido que el control activo requiere niveles de fuerzas máximas elevados, que si no es imposible de proporcionar, resultarían muy difíciles.

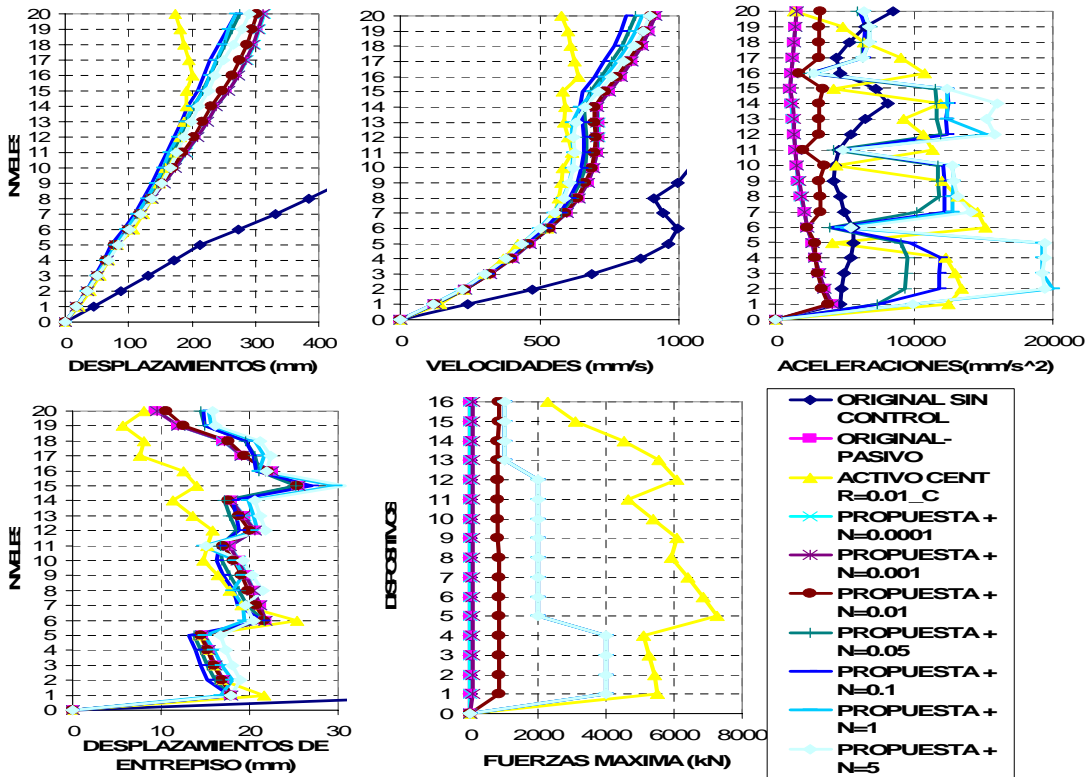


Figura 7.16 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Taft-NS. 20 Niveles (Propuesta)

El comportamiento de las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura de 20 niveles ante el registro Taft-NS mostrado en la figura 7.17, presentan el mismo comportamiento que el Centro-NS. Las pendientes pequeñas apenas son perceptibles y por lo tanto no afectan al sistema, pero tampoco lo ayudan y las pendientes altas pueden llegar a afectarlo sin lograr a 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 resulta que continua agregando fuerzas aunque no sean muy necesarias, razón por la cual los requerimientos de energía son extraordinarios.

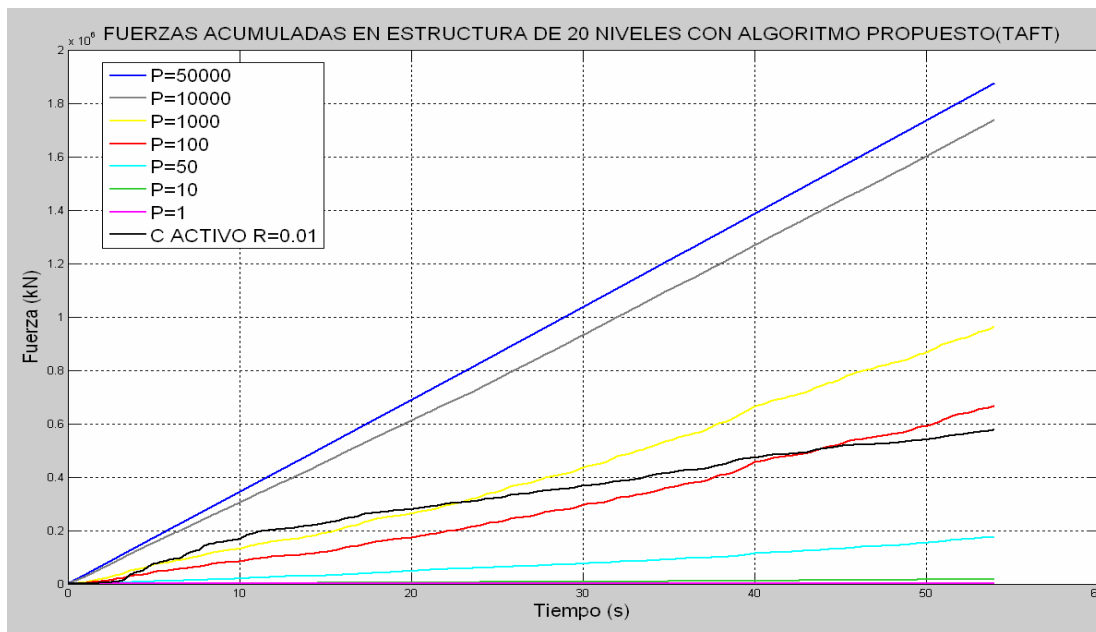


Figura 7.17 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de 20 niveles (Taft).

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. Por supuesto no alcanzan la respuesta del control ideal sin embargo existe una mejora.

Como ya se había comentado la inclusión del control trae consigo que las aceleraciones máximas se incrementen, sin embargo 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 los valores del control ideal.

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

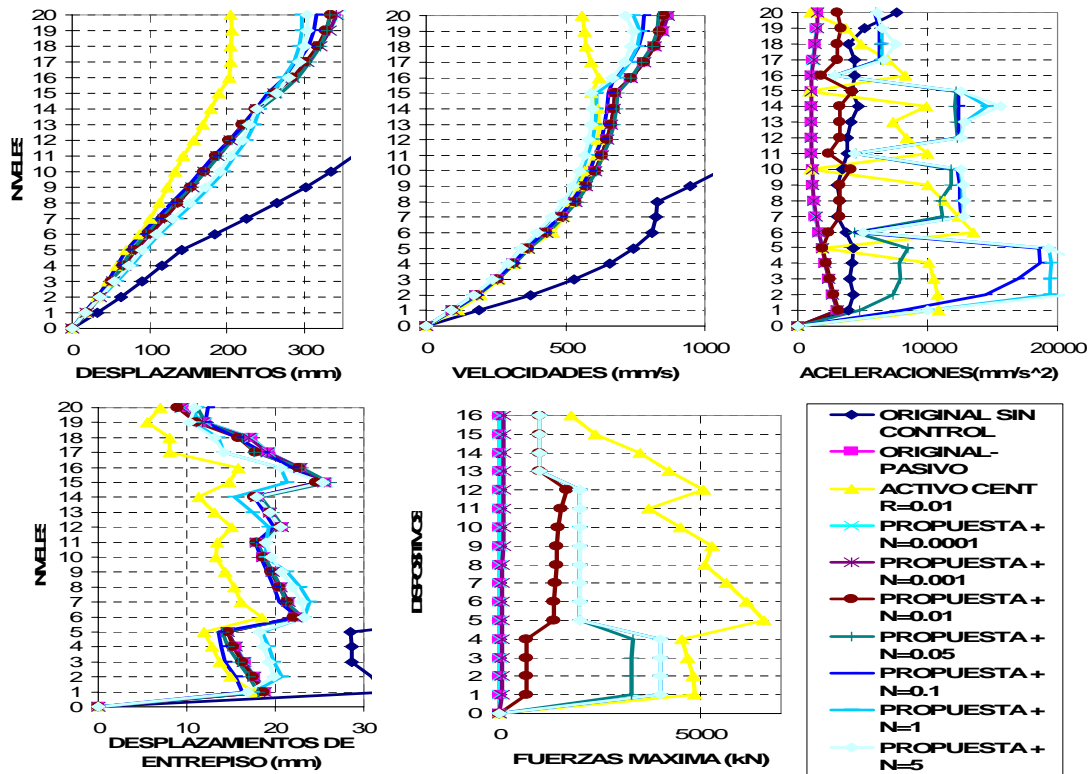


Figura 7.18 Desplazamientos, velocidades, aceleraciones, desplazamientos de entrepisos y fuerzas máximas. Hachi-NS. 20 Niveles (Propuesta)

Por último, la figura 7.19 presenta el comportamiento de las fuerzas acumuladas aplicadas al sistema ante el registro Hachi-NS. Sin duda presenta el mismo comportamiento que los 2 anteriores. Pendiente pequeñas aplican pocas fuerzas al sistema y grandes tienden a ser lineales.

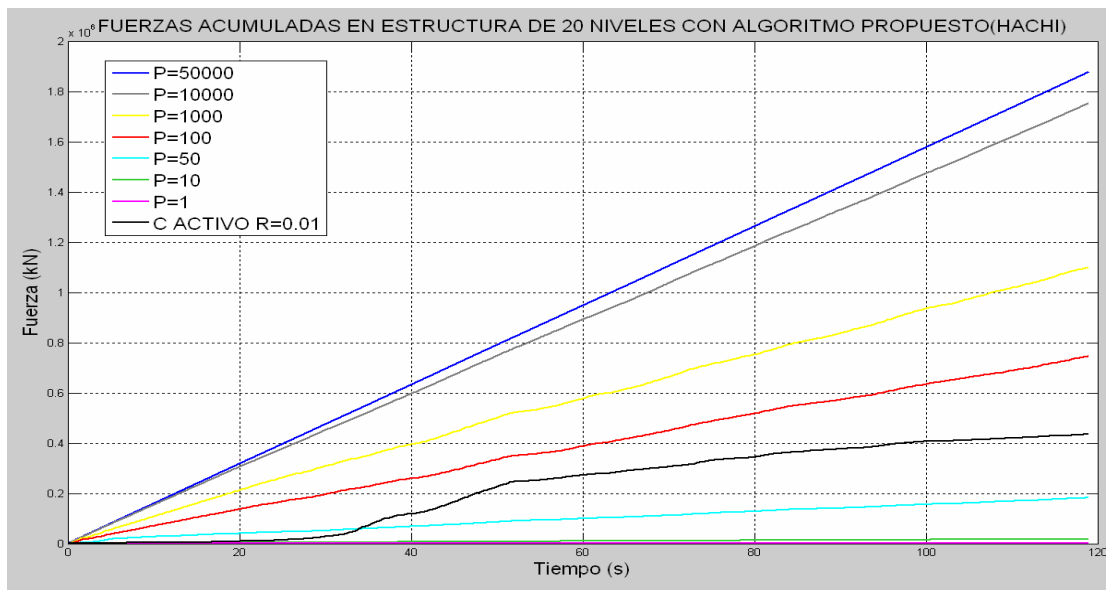


Figura 7.19 Fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura ante distintas pendientes de fuerzas para estructura de 20 niveles (Hachi).

Finalmente es importante comentar que las fuerzas aplicadas a la estructura son proporcionadas por el propio sistema. Por lo tanto 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 dominar el primer modo de vibrar. Mientras que para estructuras altas dicho algoritmo presenta limitaciones considerables, sin embargo 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 debe descuidar los incrementos en aceleraciones, lo cual podría ser un punto crítico en el diseño.

Las cualidades de algoritmo en estructuras altas resultan escasas para aventurarse a proponerlo, pero la posibilidad de implementarlo no es mala. Ya que hay que recordar que dichos dispositivos pueden variar sus características y después de un evento sísmico no necesitan sustituir como muchos otros disipadores.

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

CAPITULO 8 CONCLUSIONES.

El desarrollo tecnológico y científico en la actualidad permite proporcionar comodidades para la sociedad. En la ingeniería estructural existe la obligación de brindarlas. En esta investigación se pretende aprovechar recursos tecnológicos innovadores e implementarlos en la ingeniería civil. Sin embargo la presente tesis es un pequeño paso ante el rezagado camino de la ingeniería mexicana, en este tema. Es sabido que el proyecto global es ambicioso, sin embargo no es imposible. Al parecer el desarrollo de este tema en México es casi desconocido, pero no por ello olvidado. Hay una gran gama de recursos que pueden ser implementados pero es necesario llevar a cabo trabajos interdisciplinarios como este, que requiere conocimientos de otros áreas de investigación.

En esta investigación se presentó una noción del control estructural y los diferentes tipos de este. Así mismo se presentó un breve repaso general del control estructural a lo largo del siglo pasado hasta la actualidad. En ello destaca el constante interés para hacer estructuras más seguras por parte de muchos investigadores de todo el mundo. Cabe destacar que en México aunque no es pionero del control estructural se ha manifestado con la implementación de dispositivos de control estructural, obligado por la vulnerabilidad a desastres naturales que existen en varias zonas del país.

También se presenta una manera simple de modelar las estructuras basadas en el control moderno (MIMO), con grandes ventajas para la simulación de los modelos. Se identifican las desventajas del control centralizado debido a retrasos y problemas de escalamiento principalmente.

La implementación del control estructural activo y semiactivo, centralizado y semicentralizado se basan en la función LQR. Esta función resulta efectiva para el control estructural con ventajas tales como la restricción de las fuerzas y la definición de la importancia de las variables a controlar.

Se estudiaron estructuras encontradas en la literatura del control, representativas de estructuras bajas y altas. Se observó el comportamiento de dichas con la implementación del control, con resultados alentadores. La decisión de seleccionar la estructura de 5 niveles fue influida porque dicha estructura tiene implementado el control semiactivo centralizado y es una estructura muy estudiada por la gente interesada en este tema. Mientras que la estructura alta fue seleccionada porque se diseñó con la idea de ser un modelo representativo de estructuras comunes sometido a eventos sísmicos.

Se llevaron a cabo muchas simplificaciones de las estructuras seleccionadas hasta llegar a modelos simples pero representativos. Primero se redujeron a marcos planos y después a sistemas de varios GDL.

Las simulaciones requieren registros los cuales tienen distintas características. Se utilizaron 3 sismos usados en investigaciones previas, que sometieron a grandes demandas a las estructuras ya que se escalaron a una velocidad de 50 m/s.

Los dispositivos simulados tienen las características de los aparatos usados por Kurata (orificio variable), sin embargo se plantea implementar las características de los

magnetoreológicos, por sus características en ellas la rapidez de respuesta y su diseño compacto.

Los modelos sin control simulados sometidos a los sismos presentan distintas características y por lo tanto la respuesta es diferente a pesar de estar escalados a una misma velocidad. También presenta diferencias entre una estructura y otra, es decir, mientras los registros del Centro-NS y Hachi-NS demandan más a la estructura de 5 Niveles, estos mismos registros no son muy significativos para la estructura de 20 niveles. A partir de esto se puede notar el amplio campo que se abarca en este estudio.

En la implementación del control pasivo no se toman en cuenta todas las ventajas que puede proporcionar dicho control como puede ser el comportamiento no lineal. Sin embargo, para todos los modelos se utilizaron las mismas condiciones para que pudieran ser comparables.

La implementación del control pasivo permite reducir la respuesta estructural en ambas estructuras y ante los 3 registros usados. La principal razón por la cual la respuesta es reducida debe ser el incremento de rigidez y amortiguamiento, este último definido a partir de los modos de vibrar.

Es claro que la implementación del control activo centralizado en ambas estructuras y ante los 3 registros 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 5 niveles y $r=0.01$ para la de 20.

Las fuerzas acumuladas aplicadas a la estructura dependen del valor de r , es decir cuanto menor sea dicho valor, las fuerzas acumuladas aplicadas son mayores. Dicha acción trae consigo una reducción en la respuesta estructural, pero dotar a una estructura con tales fuerzas resultaría un trabajo considerable.

El modelado de las estructuras sin control se lleva a cabo por medio un ciclo abierto donde existe un sistema que recibe una excitación de entrada y produce una respuesta de salida. Mientras que para las estructuras con control se anexa un ciclo cerrado en el cual a partir de la respuesta del ciclo abierto conecta al ciclo cerrado para modificar la respuesta del sistema.

La implementación del control semiactivo permite ver las bondades de este tipo de control, en primera porque no se desestabiliza además alcanza valores cercanos a los obtenidos con el control activo. La respuesta se mejora considerablemente en el edificio de 5 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. Sin embargo, las mejoras están presentes y quizá pueda alcanzar dicho niveles incrementando la energía proporcionada al sistema, es decir incrementando el valor de r .

Al parecer el control descentralizado parcialmente es una opción viable para la reducción de la respuesta máxima en las estructuras y la solución de 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.

Por otro lado el control activo totalmente descentralizado resulta inapropiado ya que a pesar de requerir menor cantidad de fuerzas acumuladas no mejora la respuesta estructural y llega a desestabilizarlo, produciendo respuestas máximas inferiores que la estructura sin control.

Finalmente la propuesta de algoritmo de control de desplazamientos permite reducir considerablemente la respuesta estructural máxima en edificios bajos. Mientras que en edificios altos las mejoras no son tan visibles. Sin embargo cabe destacar la cantidad de energía que se puede disipar con este algoritmo.

En la estructura de 5 niveles la efectividad del algoritmo es notable, sin embargo desperdicia grandes cantidades de fuerzas acumuladas. Pues cuando aplican casi la misma cantidad de energía el control activo centralizado mejora significativamente la respuesta respecto al algoritmo propuesto. En la estructura de 20 niveles la mejora es casi nula pero evita la desestabilización de la misma.

En estudios posteriores, se plantea 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. También se pretende llevar a cabo la implementación a escala de dicho algoritmo.

REFERENCIAS

- Chin-Hsiung Loh y Chang Chia-Ming. (2006). **“Decentralized versus centralized control study for large civil infrastructural systems”**. Memorias del 4th World Conference on Structural Control and Monitoring. 4WCSCM-121.
- Dike J. S. y Jansen L. M. (2000) **“Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study”**. Journal of engineering Mechanics. Vol., 126, No 8 ASCE. pp.795-803.
- Dike S.J, Spencer Jr. F.B, Sain M.K. and Carlson J.D. (1996) **“Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction”**. Smart Materials and Structures Vol. 5, 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., (1997) **“Structural control: past, present and future”** Journal of engineering Mechanics. pp 897-971
- Kurino H., Tagami J., Shimizu K. and Kobori T., (2003) **“Swiching oil damper with built-in controller for structural control”**. Journal of Structural Engineering. ASCE. Julio. pp 895-904.
- Kurino H., Yamada T., Matsugada and J Tagami (2006) **“Swiching oil damper with automatic valve operation system for structural control”**. Memorias de 4th World Conference on Structural Control and Monitoring. 4WCSCM-217
- Lynch Jerome Peter (2002) **“Decentralization of wireless monitoring and control technologies for smart civil structures.”** (Tesis Doctoral).
- MATLAB. The MathWorks, Inc.
- Narito Kurata, Takuji Kobori, Motoichi Takahashi, Naoki Niwa and Hiroshi Midorikawa, (1999) **“Actual seismic response controlled building with semi-active damper system”**, Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Earthquake Engng. Struct. Dyn. 28, 1427-1447
- Narito Kurata, Takuji Kobori, Motoichi Takahashi, Toshihisa Ishibashi, Naoki Niwa, Jun Tagami and Hiroshi Midorikawa, (2000) **“Forced vibration test of a building with semi-active damper system”** Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Earthquake Engng. Struct. Dyn. 29 629-645.
- Soong T T. (1990) **“Active structural control”**. Theory and practice. Longman Scientific and technical, , Great Britain.
- Shimizu K., Orui S. and Kurino H.,(2006) **“Observed response of high-rise building with semi-active swiching oil dampers to earthquake and typhoon”**. Memorias de 4th World Conference on Structural Control and Monitoring. 4WCSCM-214
- Tena C. A. (2007) **“Notas clases: Control de la respuesta sísmica”** Trimestre 07-I. Universidad Autónoma Metropolitana- Azcapotzalco. Postgrado en Ingeniería Estructural.

Tena C. A. (2003) **“Disipación pasiva de energía en México: Un estado del arte”** VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Venezuela.

Oviedo J. Andrés y Duque Maria del Pilar, (2006) **“Sistemas De Control De Respuesta Sísmica En Edificaciones”** Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 6, p. 105-120. Diciembre 2006. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)

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

<http://www.taylordevices.com>

Cundumi Sánchez Orlando (2005), **“A Variable Damping Semiactive Device For Control Of The Seismic Response Of Buildings”** (Tesis Doctoral)

Cupich Rodriguez M. y Elizondo Garza F J. **“Amortiguadores Magnetoreológicos”** Ingenierías. Julio-Diciembre 1998 Vol. 1 No. 2