

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**CONTRIBUCION AL DESARROLLO
DE SISTEMAS DE CONTROL DE
ESTRUCTURAS DE EDIFICACION
MEDIANTE CABLES ACTIVOS**

Autor: Francisco López Almansa
Director: José Julián Rodellar Benedé

Barcelona, Enero de 1988

CAPITULO 1

CONTROL DE ESTRUCTURAS

En el presente capítulo se muestra una visión general del control de estructuras y una visión más pormenorizada del control activo de estructuras.

En el apartado 1.1 se muestra una visión general de las soluciones que se han propuesto para minimizar los efectos de las excitaciones dinámicas sobre las estructuras de Edificación e Ingeniería Civil: medidas de diseño estructural y sistemas de control. En el apartado 1.1 se muestra también una visión general del campo del control de estructuras indicando los distintos tipos de sistemas de control propuestos: pasivos, activos, semi-activos e híbridos.

En el apartado 1.2 se describen los sistemas de control pasivo de estructuras y en los apartados 1.3, 1.4 y 1.5 se describen, respectivamente, los sistemas activos, semi-activos e híbridos.

INDICE

1.1	<i>Introducción.....</i>	<i>1.3</i>
1.2	<i>Sistemas de control pasivo de estructuras.....</i>	<i>1.7</i>
1.3	<i>Sistemas de control activo de estructuras.....</i>	<i>1.15</i>
1.3.1	<i>Conceptos básicos de control automático.</i>	
1.3.2	<i>Morfología de un sistema de control activo de estructuras.</i>	
1.3.3	<i>Estrategias de control utilizadas en el control activo de estructuras.</i>	
1.3.4	<i>Mecanismos actuadores utilizados en el control de estructuras.</i>	
1.4	<i>Sistemas semi-activos.....</i>	<i>1.34</i>
1.5	<i>Sistemas de control híbridos.....</i>	<i>1.35</i>
	<i>Referencias.....</i>	<i>1.36</i>

1.1 INTRODUCCION.

Un objetivo permanente en el diseño de estructuras sometidas a solicitaciones dinámicas (especialmente excitaciones sísmicas y cargas de viento) es mantener su respuesta dentro de unos límites marcados por sus condiciones de seguridad y de servicio y por las condiciones de confort humano. Las condiciones de seguridad y de servicio se expresan fundamentalmente mediante restricciones a los desplazamientos de la estructura y las condiciones de confort humano se formulan limitando las aceleraciones de la estructura, de forma que disminuyendo la respuesta pueden satisfacerse simultáneamente todas las condiciones exigibles al comportamiento dinámico de la estructura.

En los campos de la Edificación y de la Ingeniería son cada vez más frecuentes las estructuras con una problemática específica frente a las acciones dinámicas: estructuras de gran esbeltez (edificios altos, puentes con grandes luces, torres de comunicación, antenas de transmisión, chimeneas metálicas, etc), instalaciones sometidas a excitaciones dinámicas inusualmente violentas (plataformas marinas "off-shore" y torres de comunicación ubicadas en lugares particularmente expuestos), vehículos capaces de desarrollar grandes velocidades (aeronaves y naves espaciales) y recientemente las plataformas espaciales. Por dicho motivo la búsqueda de soluciones para disminuir la respuesta dinámica de las estructuras ha sufrido un espectacular aumento en los últimos años. Un tipo de soluciones propuestas se basa en el diseño de los elementos estructurales (medidas de diseño estructural) mientras que otras soluciones alternativas plantean el uso de elementos extraños a la estructura (sistemas de control pasivo y de control activo). En el presente apartado, se describen dichas tres soluciones [1-3]:

- a) *Medidas de diseño estructural.* En estructuras sometidas a acciones dinámicas (especialmente cargas sísmicas) es imprescindible tener en cuenta las recomendaciones de diseño contenidas en las normas antisísmicas, las cuales suelen referirse a las disposiciones en planta y en alzado, a las juntas constructivas, a las cimentaciones y a las tipologías estructurales más idóneas. Es también importante exigir una ejecución especialmente cuidadosa.

En numerosas ocasiones dependiendo de las características de la excitación esperada, del terreno y de la cimentación, para mejorar el comportamiento frente a cargas dinámicas, se proyectan estructuras más rígidas dimensionadas para que resistan los esfuerzos provocados por la excitación dinámica. Esta, frecuentemente, se aproxima mediante cargas estáticas equivalentes de acuerdo con criterios contenidos en las normativas de uso legal. Si no se cometen errores importantes en la simulación estática de las cargas dinámicas y en la evaluación de la cuantía de las mismas, esta forma de proceder suele proporcionar resultados del lado de la seguridad pero presenta notables inconvenientes:

- Se obtienen, en general, estructuras pesadas lo cual incrementa el coste de las mismas, produce un indeseable aumento de las cargas transmitidas a la cimentación y limita de forma importante el rendimiento de la estructura puesto que éste, en muchas ocasiones, depende de su ligereza. Tal es el caso de las estructuras de edificios altos, los tableros de puentes de grandes luces y otros tipos de estructuras cada vez más frecuentes en las construcciones modernas debido especialmente al importante desarrollo que han experimentado últimamente los métodos numéricos de cálculo, a la existencia de materiales más resistentes y ligeros y a la utilización de nuevas técnicas constructivas.
- La respuesta sísmica de una estructura rígida no es nunca inferior a la excitación transmitida por el terreno, lo cual puede ser un problema en instalaciones en que se precise un mayor aislamiento dinámico. En particular, la aceleración suele alcanzar valores elevados en las estructuras rígidas lo cual limita notablemente las condiciones de confort.
- Las sollicitaciones dinámicas esperadas en la vida útil de una estructura poseen una importante componente de incertidumbre y la aparición de excitaciones de mayor violencia que la esperada puede provocar en la estructura daños importantes.

Frente a excitaciones dinámicas con un importante contenido en frecuencias altas, el comportamiento de las estructuras flexibles es cuantitativamente mejor que el de

las estructuras rígidas puesto que sus frecuencias naturales de vibración se alejan de las frecuencias presentes en la excitación y, por otra parte, su capacidad para resistir sin daños deformaciones importantes es mayor que la de las estructuras rígidas. Por dichas razones, en las últimas décadas se ha generalizado en la costa Oeste de los Estados Unidos la construcción de edificios en los cuales una o varias plantas tienen una rigidez notablemente inferior a las demás. En algunos casos las plantas superiores pueden dimensionarse extremadamente flexibles de forma que, frente a excitaciones dinámicas violentas, sufren importantes deformaciones que reducen las de los pisos inferiores [4]. Aunque este sistema es potencialmente muy eficaz, se precisa una ductilidad de los pisos superiores difícil de obtener con los materiales de que se dispone actualmente y los daños en las plantas superiores pueden ser considerables. También se ha utilizado la solución de diseñar la planta inferior muy flexible para que, en presencia de sollicitaciones sísmicas excepcionalmente intensas, se produzcan plastificaciones de los pilares de forma que la energía absorbida permita disminuir los movimientos de las plantas superiores [5]. Esta solución está perdiendo popularidad debido a que las grandes deformaciones sufridas por la planta inferior pueden comprometer la estabilidad de todo el edificio y a que se precisan importantes reparaciones después de la actuación de una excitación violenta. En la figura 1.1 se muestran esquemas estructurales de este tipo de soluciones.

Mediante medidas de diseño estructural se trata de confiar la absorción de la energía aportada por la sollicitación exterior al amortiguamiento interno de la estructura en cuyo caso, en presencia de cargas dinámicas importantes, se producen deformaciones permanentes (habitualmente localizadas en las uniones entre vigas y pilares) de forma que, en el mejor de los casos, es necesario reparar la estructura para dejarla de nuevo en condiciones de servicio.

- b) *Sistemas de control pasivo.* Recientemente [6], se han utilizado mecanismos externos incorporados a la estructura para absorber la energía contenida en la excitación y, consecuentemente, aumentar el amortiguamiento de la estructura. Dichos mecanismos se denominan sistemas de control pasivo de estructuras.

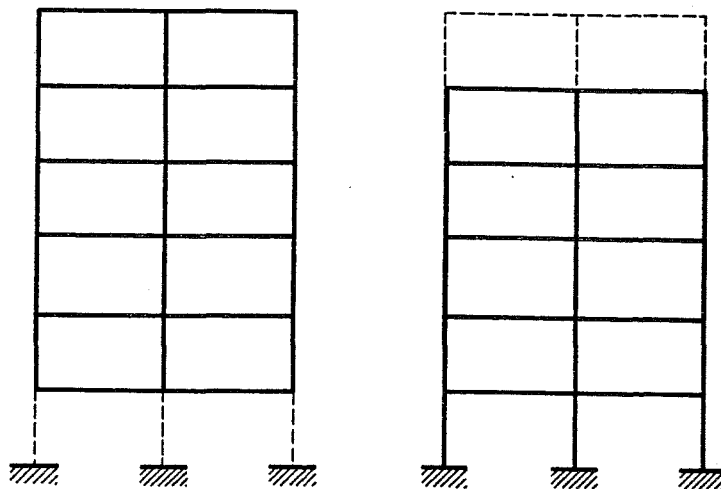


Figura 1.1 Edificios con plantas flexibles.

Los sistemas pasivos absorben la energía de la excitación incrementando el amortiguamiento de la estructura y modificando sus frecuencias naturales de vibración alejándolas de las frecuencias presentes en la excitación. Dichos mecanismos deben diseñarse estimando previamente el rango de frecuencias de la excitación y frecuentemente deben ser reemplazados después de la actuación de sollicitaciones dinámicas violentas. Su capacidad para disminuir la respuesta de la estructura es, por otra parte, limitada.

- c) *Sistemas de control activo.* Son sistemas que utilizan en tiempo real la respuesta medida de la estructura para generar un conjunto de fuerzas de control que se aplican a la estructura por medio de dispositivos mecánicos actuadores con el fin de reducir su respuesta [7-9]. Por su propia concepción, estos sistemas son capaces de adaptarse automáticamente a las características de la excitación y pueden lograr una reducción de la respuesta dinámica de la estructura muy superior a la obtenida con el uso de sistemas pasivos. El control activo utiliza conceptos y esquemas propios del Control Automático de Sistemas utilizados exhaustivamente

en diversos dominios de la Ingeniería y de las Ciencias Aplicadas.

1.2 SISTEMAS DE CONTROL PASIVO DE ESTRUCTURAS.

Los sistemas de control pasivo de estructuras pueden ser definidos como aquellos mecanismos incorporados a las estructuras con la finalidad de absorber parte de la energía suministrada a las mismas por excitaciones dinámicas violentas y, de esta forma, disminuir su respuesta. Lo que distingue a los sistemas pasivos de los sistemas activos es que aquellos no reciben información "on-line" de las características de la excitación ni del comportamiento de la estructura.

Entre los sistemas pasivos de control pueden distinguirse dos grupos: los sistemas pasivos asistidos que precisan un aporte de energía para su funcionamiento y los sistemas puramente pasivos que funcionan sin necesidad de dicho aporte.

En estructuras de Edificación y de Ingeniería los **sistemas de control puramente pasivos** que se han propuesto son aplicables especialmente a estructuras de tamaño pequeño y mediano y únicamente son útiles para reducir su respuesta horizontal frente a sollicitaciones sísmicas y nunca frente a excitaciones provocadas por el viento. Los principales sistemas puramente pasivos de control de estructuras son los siguientes:

- *Juntas plásticas.* Se trata de elementos metálicos constituidos por un metal dúctil e intercalados en la estructura de forma que, en presencia de cargas dinámicas importantes, sus deformaciones plásticas son aprovechadas para absorber energía. Estos elementos suelen estar formados por estribos en forma de U o por barras cortas fijadas entre superficies móviles o utilizadas como elementos de arriostramiento. Se dimensionan de forma que las cargas estáticas y las cargas dinámicas de viento no produzcan plastificaciones en ellos y únicamente para excitaciones sísmicas violentas aparezcan plastificaciones que modifiquen cualitativamente el comportamiento dinámico de la estructura [10,11]. En la figura 1.2 se muestra un esquema de un edificio con una posible disposición de las juntas plásticas.

Recientemente se han propuesto elementos capaces de modificar su

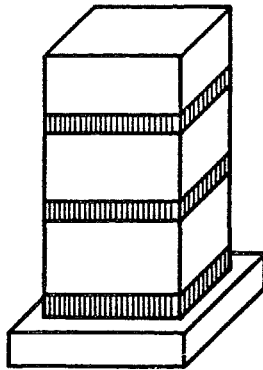


Figura 1.2 Sistema pasivo de control por juntas plastificables.

comportamiento de elástico a plástico de acuerdo con la información sobre las características de la excitación sísmica que le transmiten sensores exteriores [12].

- *Stepping structures.* En la literatura anglosajona se conoce con el nombre de “stepping structures” a las estructuras en las que las uniones entre alguno de los pilares y la cimentación que los soporta pueden ser diseñadas para permitir una separación vertical de ambos mediante la plastificación de elementos metálicos intercalados. Este tipo de apoyos se dimensiona para que el despegue del pilar se produzca solamente en presencia de excitaciones sísmicas violentas. Si se utilizan estos sistemas pasivos no es necesario dimensionar la cimentación para que resista tracciones. En la Universidad de California se han realizado experiencias sobre pórticos a escala reducida habiéndose comprobado que la utilización de este tipo de apoyos no produce un incremento apreciable de las oscilaciones laterales y, por el contrario, sí que produce una apreciable reducción de los esfuerzos en las barras y una importante disminución de la aceleración de respuesta [10]. En la figura 1.3 se muestra un esquema de la estructura utilizada en dichos ensayos.

En Nueva Zelanda se ha construido un puente de ferrocarril (cuyos pilares tienen gran altura) y una chimenea con este tipo de unión entre la estructura y la

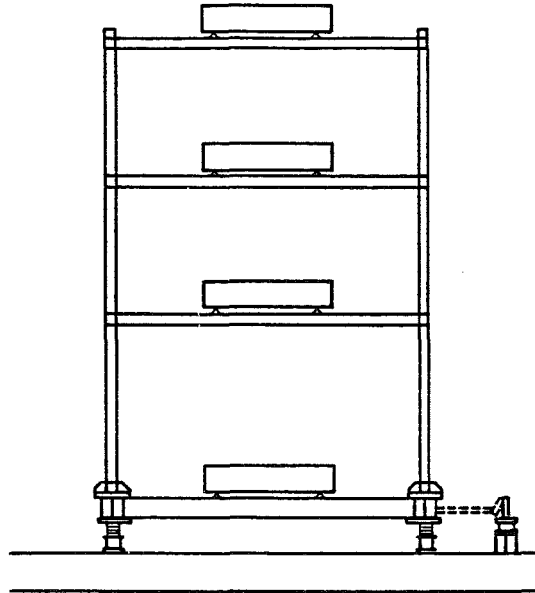


Figura 1.3 Estructura experimental sobre apoyos que permiten separación entre el pilar y la base.

cimentación [10,11].

- *Aislamiento de base.* Otro método para obtener estructuras capaces de absorber energía de la excitación sísmica es proyectar apoyos que produzcan un aislamiento dinámico entre la estructura y el terreno [13]. Estos sistemas pasivos de control son conocidos en la literatura anglosajona como “Base Isolation”. Se han propuesto [14–16] y utilizado [17] apoyos deslizantes formados por rodillos o esferas metálicas. Para evitar desplazamientos permanentes del edificio deben existir fuerzas de recuperación que tiendan a restituir al edificio a su posición inicial. Una solución es construir los cilindros de rodadura con sección elíptica de forma que, al producirse un desplazamiento horizontal del edificio, aparecen fuerzas de recuperación debidas a la geometría de los rodillos. Recientemente se ha propuesto el aislamiento dinámico entre la estructura y la cimentación mediante apoyos elastoméricos de caucho reforzados mediante placas de acero [10,18]. Los

soportes de caucho son diseñados para resistir grandes deformaciones absorbiendo de esta forma importantes cantidades de energía. Los sistemas de aislamiento de base propuestos hasta ahora no son aplicables a estructuras muy altas porque las deformaciones de los apoyos pueden comprometer la estabilidad de la estructura completa. Por otra parte, el rango de frecuencias presentes en la excitación que son absorbidas por los apoyos elastoméricos, aconseja utilizar éstos en estructuras rígidas cimentadas sobre terrenos duros. En la figura 1.4 se muestra un esquema estructural de un edificio que incorpora un sistema de aislamiento de base.

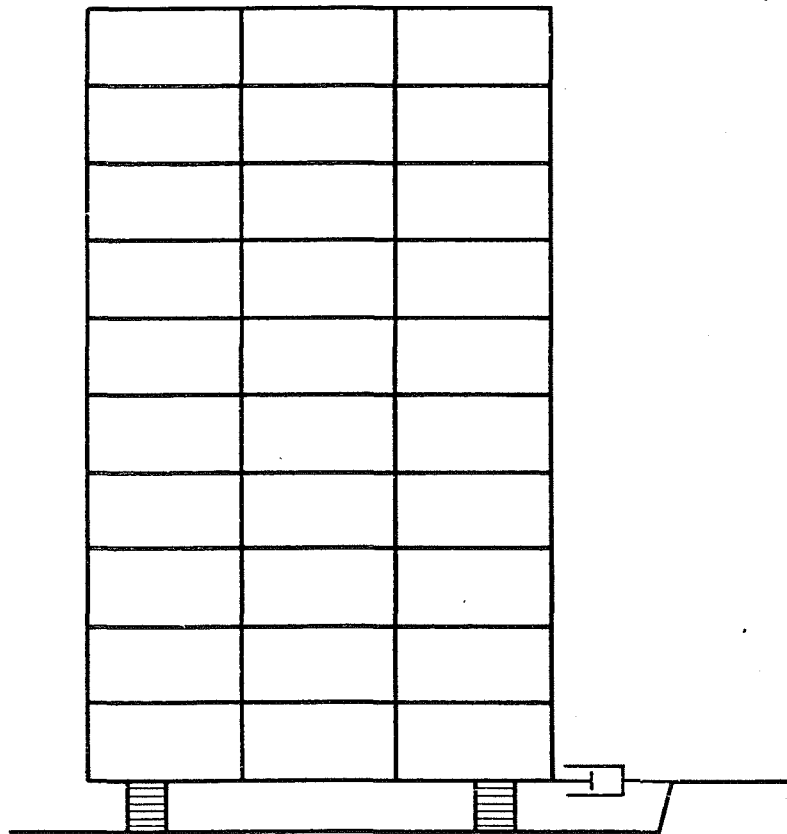


Figura 1.4 *Edificio con sistema de aislamiento de base.*

Otro tipo de sistemas pasivos propuestos recientemente consisten en apoyos

de caucho que incorporan un núcleo de plomo cuyas deformaciones plásticas permiten una mayor absorción de energía [19]. En [10] se han propuesto sistemas de apoyos que también permiten importantes absorciones de energía mediante plastificación de elementos metálicos. En U.S.A., Nueva Zelanda y en otros países existen construcciones que incorporan sistemas de aislamiento mediante soportes de caucho. Dichas construcciones corresponden principalmente a estructuras de edificación, muelles de descarga, centrales nucleares, puentes y distintas instalaciones industriales, existiendo una tendencia manifiesta al incremento en el uso de estos sistemas [20-22].

- *Elementos de absorción dinámica.* Para disminuir el riesgo de inestabilidad de las vibraciones laterales de chimeneas metálicas y de otras estructuras esbeltas sometidas a la acción del viento pueden disponerse en su fuste y en su coronación elementos metálicos que interrumpen la continuidad de su superficie y dificultan la formación de vórtices [23]. Dichos elementos se conocen en la literatura anglosajona como "Dynamic Absorbers". El peligro es mayor en agrupaciones lineales de chimeneas cuando la dirección del viento coincide con la de la alineación. En la figura 1.5 se muestra una fila de 5 chimeneas de 120 metros de altura y separadas 60 horizontalmente metros las cuales incorporan un elemento de absorción dinámica formado por un anillo metálico fijado a la parte superior de la chimenea mediante elementos metálicos elásticos [24].

El sistema descrito en [24] puede ser también utilizado en turbinas de centrales eléctricas. La efectividad del sistema se constata mediante ensayos en túnel de viento y en modelo real.

Los sistemas de control pasivo asistidos no reciben información de las características de la excitación ni de la respuesta de la estructura pero precisan un aporte exterior de energía para su funcionamiento. Para reducir la respuesta horizontal frente a cargas dinámicas de viento de estructuras muy esbeltas (tales como edificios altos y torres de comunicación) se han propuesto los amortiguadores pasivos de masa sintonizada conocidos habitualmente por sus iniciales en lengua inglesa P.T.M.D. correspondientes a Passive Tuned Mass Dampers.

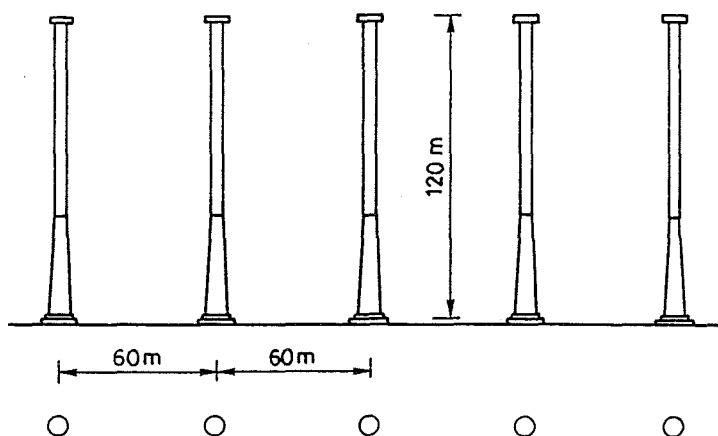


Figura 1.5 *Agrupación de chimeneas metálicas con elementos de absorción dinámica.*

Los P. T. M. D. consisten básicamente en un bloque rígido de gran masa colocado en la parte superior de la estructura de forma que puede desplazarse horizontalmente en dos direcciones ortogonales estando unido a la estructura mediante resortes amortiguados [25–29]. En la figura 1.6 se muestra un P.T.M.D. instalado en una estructura de edificación.

Para que el desplazamiento del bloque rígido se realice sin rozamiento se dispone una suspensión hidráulica que precisa un aporte exterior de energía para su correcto funcionamiento y por dicho motivo el P.T.M.D. no es un sistema puramente pasivo sino un sistema pasivo asistido. Los valores de la masa del bloque y de las constantes dinámicas de los resortes se determinan para que, en ambas direcciones ortogonales, la frecuencia natural de vibración del conjunto masa-resortes se aproxime sensiblemente a la frecuencia fundamental de la estructura (por dicho motivo estos sistemas se llaman “sintonizados”) y de esta forma el comportamiento del sistema con dos grados de libertad formado por el primer modo de vibración de la estructura y por el bloque rígido corresponda al de un sistema con menor rigidez que el modo propio fundamental pero con un amortiguamiento más importante que el de éste. Los sistemas P.T.M.D. son

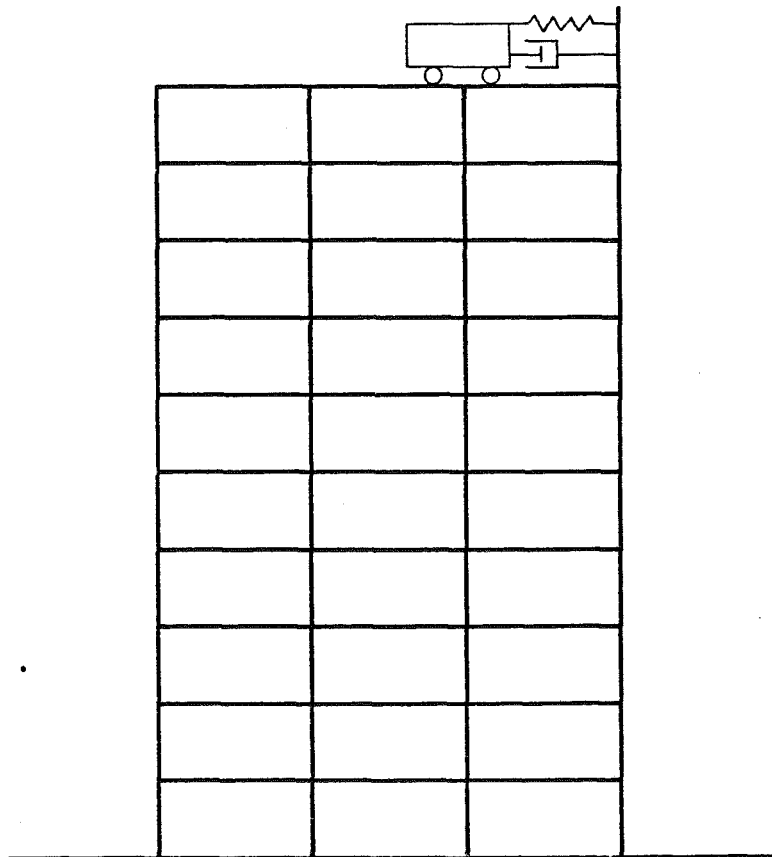


Figura 1.6 *P.T.M.D. en un edificio.*

conocidos desde el año 1909 y han sido profusamente utilizados en Ingeniería Mecánica mientras que en el campo de la Edificación y de la Ingeniería Civil fueron propuestos inicialmente para reducir las oscilaciones horizontales de estructuras esbeltas sometidas a la acción dinámica del viento habiendo sido instalado por primera vez un sistema de este tipo en el edificio World Trade Center en Nueva York. Aunque los sistemas P.T.M.D. fueron concebidos para disminuir la respuesta al viento en [30] se discute su capacidad para reducir los desplazamientos horizontales provocados por excitaciones sísmicas llegándose a la conclusión de que su utilidad es, en este sentido, escasa. En [31] se propone un nuevo tipo de P.T.M.D. en el que el bloque rígido dispone en ambas direcciones de una longitud de recorrido libre limitada por topes elásticos; de esta forma

los impactos del bloque contra los topes que limitan su recorrido producen una acción amortiguadora del movimiento de la estructura. En [32] se describe una instalación de dos P.T.M.D. en la Centerpoint Tower en Sidney (Australia) para aumentar el amortiguamiento de los dos modos superiores de vibración de dicha torre. La efectividad de los P.T.M.D. puede ser incrementada añadiendo mecanismos activos tal como se comenta más adelante en el subapartado 1.3.4.

Como comentarios que resuman la efectividad de los sistemas de control pasivo puede decirse que:

- En general deben ser sustituidos o reparados después de que una excitación violenta los ha puesto en funcionamiento.
- Normalmente reducen únicamente la respuesta del primer modo propio de vibración.
- La capacidad para reducir la respuesta es limitada.
- Su efectividad depende de que la excitación exterior responda a las características esperadas puesto que los sistemas pasivos carecen de la facultad de adaptarse a excitaciones de características inesperadas y, en presencia de las mismas, su efecto puede ser inútil o incluso perjudicial.

La efectividad de algunos sistemas pasivos puede ser mejorada añadiendo a los mismos mecanismos propios de sistemas activos.

1.3 SISTEMAS DE CONTROL ACTIVO DE ESTRUCTURAS.

En el presente apartado se muestra una visión general del campo del control activo de estructuras. En el subapartado 1.3.1 se definen los conceptos de control automático que se utilizan en el contexto de las estructuras. En el subapartado 1.3.2 se describen los elementos que constituyen un sistema de control activo de estructuras: sensores que miden continuamente la respuesta dinámica de la estructura, ordenador que calcula el valor de las fuerzas de control mediante un procedimiento numérico denominado algoritmo de control y mecanismos actuadores que ejercen dichas fuerzas sobre la estructura. En el subapartado 1.3.3 se presentan las estrategias de control que se han utilizado en el campo del control activo de estructuras para generar el valor de las fuerzas de control mientras que en el subapartado 1.3.4 se describen los mecanismos actuadores que han sido considerados para materializar dichas fuerzas.

1.3.1 Conceptos básicos de control automático.

El **Control Automático** es una rama de la **Ingeniería de Sistemas** que se ocupa del diseño de sistemas capaces de actuar en tiempo real sobre un proceso físico para conseguir que su evolución temporal siga unas especificaciones dadas. El comportamiento de los procesos objeto de control se representa mediante **sistemas dinámicos**, entendiéndose por tales, entes cuyo estado se caracteriza mediante los valores que toman un conjunto de parámetros y variables que evolucionan en el tiempo dependiendo de la interacción con el exterior y de las interacciones internas entre sus partes. En la figura 1.7 se muestra un esquema representativo de las variables que definen básicamente la relación de un sistema dinámico con el exterior. Se distinguen unas variables de **entrada** cuyos valores son manipulables, variables de **perturbación** formadas por magnitudes no manipulables y variables de **salida** que representan la respuesta y cuyos valores se suponen accesibles, es decir pueden ser medidos.

En los sistemas dinámicos se define un conjunto de variables denominadas **variables de estado**, caracterizadas por la propiedad de que, conociendo sus valores en un instante determinado t_0 , es posible predecir la evolución del sistema en cualquier intervalo futuro $[t_0, t]$ a partir de los valores de la entrada y la perturbación en dicho

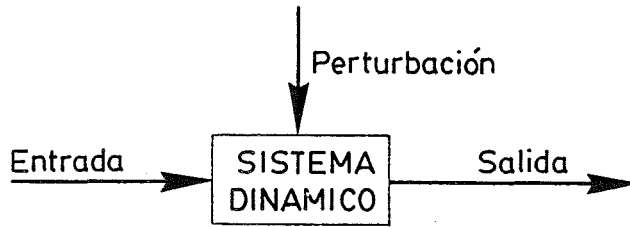


Figura 1.7 *Sistema dinámico.*

intervalo. El valor de las variables de estado en cada instante define el **estado del sistema** y el dominio de dichas variables se denomina **espacio de estado**.

Se denomina **controlador** al sistema que manipula los valores de las variables de entrada del sistema para que la salida del mismo alcance unos valores asignados denominados **consigna**.

Los sistemas de control pueden operar básicamente de dos formas: en bucle abierto (también conocido como lazo abierto) y en bucle cerrado (lazo cerrado). En lazo abierto el controlador manipula los valores de la entrada siguiendo las indicaciones de la consigna pero sin conocer los valores de la salida producida. En la figura 1.8 se muestra un esquema de control en lazo abierto. La falta de información de la salida hace que un control en lazo abierto no pueda corregir los efectos de las perturbaciones. Se trata de una acción de control en general ineficiente.

En lazo cerrado el controlador conoce los valores de la salida a través de una realimentación (feedback) y, de acuerdo con dichos valores y con las indicaciones de la consigna, determina los valores de la entrada siguiendo un proceso denominado **estrategia de control**. En la figura 1.9 se muestra un esquema de control en lazo cerrado.

En un lazo cerrado de control se define la **estabilidad** de la acción de control

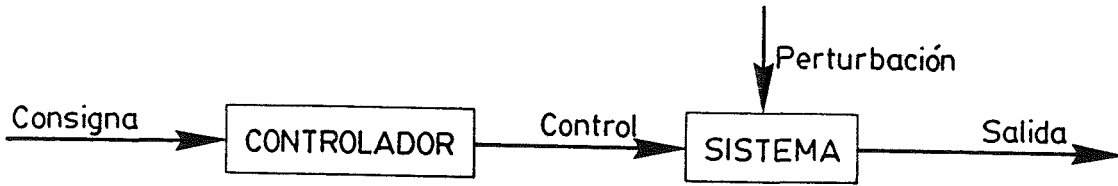


Figura 1.8 Control en bucle abierto.

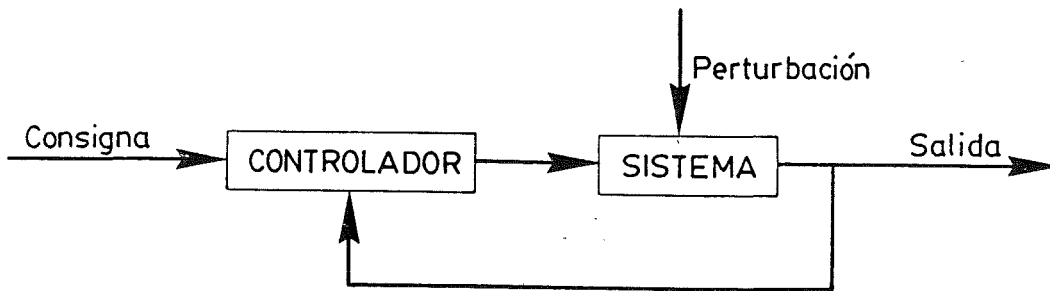


Figura 1.9 Control en bucle cerrado.

como la propiedad que hace que el comportamiento dinámico del sistema controlado sea estable. La **robustez** del control es la propiedad que asegura el mantenimiento de la eficacia de la acción de control frente a modificaciones en los parámetros del sistema o en los que definen la propia estrategia de control.

Para el diseño y posterior análisis del controlador se considera el sistema real representado por un sistema dinámico ideal utilizando técnicas de **modelización** y de **simulación**.

Para modelizar el comportamiento de un sistema real es necesario efectuar las

siguientes operaciones:

- Separar el sistema de su entorno.
- Elegir un **modelo físico** que represente su comportamiento, lo cual implica la elección de las variables del sistema que tienen una influencia significativa.
- Establecer un **modelo matemático**, es decir una relación matemática que describa la variación temporal de la salida dependiendo de la entrada y de las perturbaciones.

El proceso de simulación consiste en obtener los valores de las variables de salida para valores conocidos de la entrada y de la perturbación. Se trata, pues, de predecir el comportamiento del sistema bajo control para poder analizar el efecto positivo del controlador.

1.3.2 Morfología de un sistema de control activo de estructuras.

En la aplicación del Control Automático al diseño de sistemas de control activo de estructuras, su evolución temporal se representa, de acuerdo con el esquema de modelización y simulación descrito en el subapartado 1.3.1, mediante sistemas dinámicos en los que la perturbación corresponde a la excitación exterior, la entrada son fuerzas aplicadas a la estructura para controlar su comportamiento y las variables de salida son las características de la respuesta que se desea controlar (habitualmente desplazamientos, velocidades y aceleraciones expresados en coordenadas generales o en coordenadas modales). Puesto que el comportamiento dinámico de las estructuras se rige mediante ecuaciones diferenciales de segundo orden, su estado queda definido, por ejemplo, por los valores de los desplazamientos y de las velocidades. Dichas variables de estado se consideran accesibles (es decir, medibles) en la presente Tesis. La consigna contiene los valores deseados de la respuesta que, en el contexto de las estructuras, son generalmente nulos correspondientes al estado de equilibrio.

Un sistema de control activo de estructuras es un sistema en lazo cerrado que consta básicamente de unos sensores que miden la respuesta de la estructura, un

controlador que calcula el valor de las fuerzas de control y unos mecanismos actuadores que ejercen dichas fuerzas sobre la estructura. En la figura 1.10 se representa un esquema del funcionamiento de dicho lazo cerrado.

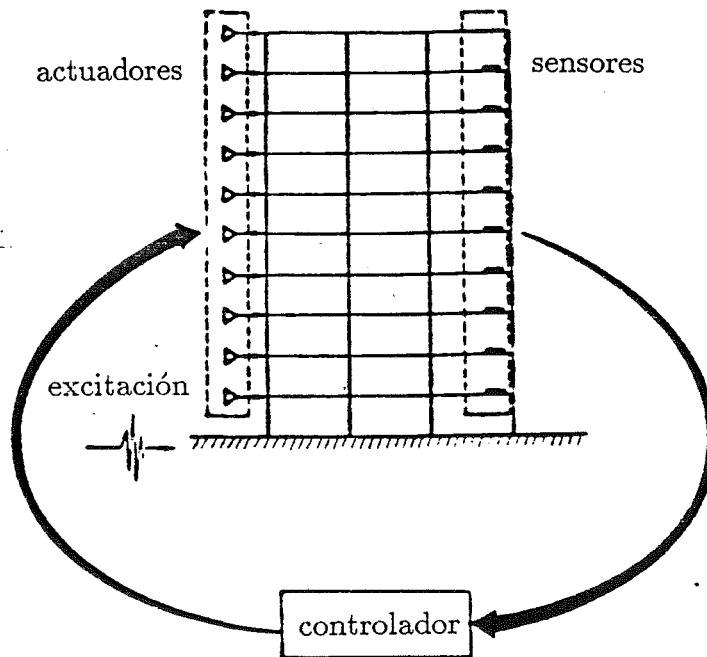


Figura 1.10 Esquema de un sistema de control activo de estructuras.

A continuación se describen los elementos que intervienen en el lazo cerrado descrito en la figura 1.10:

- *Sensores.* Miden continuamente la respuesta de la estructura contenida en el vector de salida y_0 y la transforman en una señal analógica que puede representarse en un vector y_1 .
- *Controlador.* El controlador, a partir de la respuesta de la estructura contenida en el vector y_1 , determina, mediante un proceso de cálculo denominado **algoritmo de control**, una señal de control representada en un vector u_1 .

- *Actuadores.* Son dispositivos mecánicos que interpretan la señal de control \mathbf{u}_1 y ejercen sobre la estructura un sistema de fuerzas denominado fuerzas de control cuyas características están contenidas en un vector \mathbf{u}_0 . El tiempo de respuesta de los mecanismos actuadores, es decir, el tiempo que transcurre desde que éstos reciben la señal \mathbf{u}_1 hasta que aplican las fuerzas de control a la estructura introduce un desfase que debe ser tenido en cuenta en la generación del algoritmo de control. Dicho intervalo de tiempo se denomina **tiempo de retardo**.

El controlador puede ser implementado mediante una instrumentación analógica. En dicho caso el problema de control se plantea en tiempo continuo y consiste básicamente en formular una ley que genere $\mathbf{u}_1(t)$ en función de $\mathbf{y}_1(t)$. Si el estado del sistema definido por los valores del vector $\mathbf{x}_1(t)$ es medible dicha ley de generación puede formularse equivalentemente en los siguientes términos:

$$\mathbf{u}_1(t) = -\mathbf{D}(t)\mathbf{x}_1(t) \quad (1.1)$$

en donde $\mathbf{D}(t)$ es la **matriz de ganancia**.

Debido al espectacular desarrollo de los ordenadores digitales en los últimos años, es cada vez más frecuente la introducción de un ordenador digital en el lazo de control. Esta es la tendencia actual en el control automático de sistemas, donde el concepto de control digital está sustituyendo al de control analógico.

En la figura 1.11 se muestra un esquema de control digital activo de estructuras. La señal analógica \mathbf{x}_1 es muestreada por un convertidor analógico-digital (A/D) antes de entrar en el ordenador y la señal digital \mathbf{u} que sale del mismo se transforma en la señal analógica \mathbf{u}_1 en un convertidor digital-analógico (D/A).

En un esquema de control digital el problema de control se plantea en tiempo discreto y consiste básicamente en formular un algoritmo de control que calcule en tiempo real y en cada instante de muestreo k el valor de la secuencia discreta de control $\mathbf{u}(kT)$ en función de la secuencia discreta $\mathbf{x}(kT)$. T es el período de muestreo que

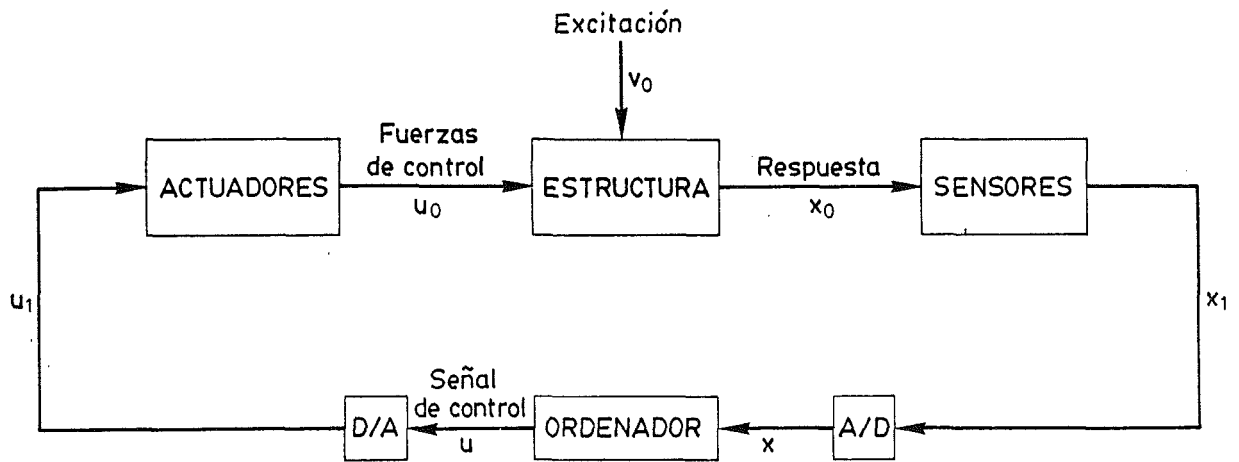


Figura 1.11 Diagrama de bloques de un sistema digital de control activo de estructuras.

gobierna el lazo de control. Dicho algoritmo puede formularse, de forma equivalente a (1.1), según:

$$u(k) = -D(k)x(k) \quad (1.2)$$

en donde se ha omitido la escritura de T . $D(k)$ es la matriz de ganancia en tiempo discreto.

1.3.3 Estrategias de control utilizadas en el control activo de estructuras.

Para construir sistemas de control activo de estructuras se han considerado distintas estrategias tomadas de la teoría de control, siendo las más relevantes, la estrategia clásica de realimentación negativa, el control óptimo, la asignación de polos y, más recientemente, el control predictivo. A excepción de la realimentación clásica, las demás estrategias pertenecen a la Moderna Teoría de control.

- *Control por realimentación negativa clásica.* El valor de la señal de control se obtiene a partir de la diferencia entre la salida del sistema y un valor de referencia. Dicha diferencia se conoce con el nombre de error. La señal de control suele elegirse proporcional al error, a su derivada, a su integral a lo largo del tiempo o a una combinación de dichas magnitudes. La acción de control generada a partir de un esquema de realimentación presenta los siguientes inconvenientes: la reducción de la respuesta es limitada, aparecen problemas de inestabilidad que exigen un ajuste previo de los parámetros, y la estrategia es únicamente aplicable a sistemas con un solo grado de libertad. Dichos inconvenientes limitan la aplicabilidad de dicha estrategia al control activo de estructuras [33-35]. Esta estrategia es la que implementan los servomecanismos.

- *Control óptimo.* Las fuerzas de control se hallan minimizando un función de coste cuadrática que suele ser proporcional a la energía total desarrollada en la estructura a lo largo de todo el intervalo de tiempo que dura la excitación. En esta energía suele incluirse también el trabajo realizado por las fuerzas exteriores de control. Este planteamiento en tiempo continuo conduce a una expresión similar a (1.1) en que el vector que contiene a las fuerzas de control que deben aplicarse a la estructura se halla como producto de una matriz de ganancia $D(t)$ por el vector de estado $x_1(t)$. El valor de la matriz de ganancia se obtiene resolviendo una ecuación matricial denominada ecuación de Riccati cuya solución iterativa a partir del instante final conduce, generalmente, a un valor estacionario de forma que la expresión (1.1) se transforma con suficiente aproximación en

$$u_1(t) = -D x_1(t) \quad (1.3)$$

El cálculo de la matriz de ganancia D representa un notable consumo de tiempo de cálculo. No obstante, puesto que los cálculos que conducen a la matriz de ganancia dependen únicamente de las características de la estructura, para estructuras con comportamiento lineal pueden, con suficiente aproximación, hacerse una sola vez (off-line) en la vida de la misma [33,36-56].

- *Control por asignación de polos.* La estrategia de control consiste en determinar una matriz de ganancia de forma que la ecuación que rige en espacio de estado la evolución del sistema en lazo cerrado tenga unos polos (raíces del polinomio característico) iguales a unos valores prefijados por el diseñador. Si el sistema cumple unas condiciones de controlabilidad muy generales siempre puede hallarse una matriz de ganancia constante que satisfaga las exigencias anteriores, pero dicha matriz no es única y para las distintas matrices de ganancia que generan los mismos polos la respuesta dinámica del sistema es muy diferente [34,37,41,51,57-66].
- *Control predictivo.* El control predictivo fue formulado inicialmente en tiempo discreto en [67,68] como una estrategia de control consistente en predecir, en cada instante de muestreo, un valor de la salida para el instante siguiente y obtener la señal de control imponiendo que la salida predicha sea igual a una salida deseada. La salida se predice en cada instante a partir de su valor real (el cual se supone medible) en el instante anterior mediante un modelo discreto que simula la evolución del sistema. Dicho modelo se denomina **modelo predictivo**. Con posterioridad [69-71] se amplió el alcance de las predicciones efectuadas por el modelo predictivo definiendo en cada instante k otro instante futuro $k + \lambda$ denominado **horizonte de predicción**. En cada instante el modelo predictivo predice, a partir de la salida real del sistema, la secuencia de salidas en los instantes futuros anteriores al horizonte de predicción. La acción de control es generada en cada instante minimizando una función de coste [71] definida en el intervalo de predicción $[k, k + \lambda]$. La estrategia de control predictivo ha sido utilizada generalmente en distintas aplicaciones [72-77]. Recientemente se ha aplicado para el diseño de sistemas de control de estructuras [78-83].

1.3.3 Estrategias de control utilizadas en el control activo de estructuras.

Para construir sistemas de control activo de estructuras se han considerado distintas estrategias tomadas de la teoría de control, siendo las más relevantes, la estrategia clásica de realimentación negativa, el control óptimo, la asignación de polos y, más recientemente, el control predictivo. A excepción de la realimentación clásica, las demás estrategias pertenecen a la Moderna Teoría de control.

- *Control por realimentación negativa clásica.* El valor de la señal de control se obtiene a partir de la diferencia entre la salida del sistema y un valor de referencia. Dicha diferencia se conoce con el nombre de error. La señal de control suele elegirse proporcional al error, a su derivada, a su integral a lo largo del tiempo o a una combinación de dichas magnitudes. La acción de control generada a partir de un esquema de realimentación presenta los siguientes inconvenientes: la reducción de la respuesta es limitada, aparecen problemas de inestabilidad que exigen un ajuste previo de los parámetros, y la estrategia es únicamente aplicable a sistemas con un solo grado de libertad. Dichos inconvenientes limitan la aplicabilidad de dicha estrategia al control activo de estructuras [33-35]. Esta estrategia es la que implementan los servomecanismos.

- *Control óptimo.* Las fuerzas de control se hallan minimizando una función de coste cuadrática que suele ser proporcional a la energía total desarrollada en la estructura a lo largo de todo el intervalo de tiempo que dura la excitación. En esta energía suele incluirse también el trabajo realizado por las fuerzas exteriores de control. Este planteamiento en tiempo continuo conduce a una expresión similar a (1.1) en que el vector que contiene a las fuerzas de control que deben aplicarse a la estructura se halla como producto de una matriz de ganancia $D(t)$ por el vector de estado $x_1(t)$. El valor de la matriz de ganancia se obtiene resolviendo una ecuación matricial denominada ecuación de Riccati cuya solución iterativa a partir del instante final conduce, generalmente, a un valor estacionario de forma que la expresión (1.1) se transforma con suficiente aproximación en

$$u_1(t) = -D x_1(t) \quad (1.3)$$

El cálculo de la matriz de ganancia D representa un notable consumo de tiempo de cálculo. No obstante, puesto que los cálculos que conducen a la matriz de ganancia dependen únicamente de las características de la estructura, para estructuras con comportamiento lineal pueden, con suficiente aproximación, hacerse una sola vez (off-line) en la vida de la misma [33,36–56].

- *Control por asignación de polos.* La estrategia de control consiste en determinar una matriz de ganancia de forma que la ecuación que rige en espacio de estado la evolución del sistema en lazo cerrado tenga unos polos (raíces del polinomio característico) iguales a unos valores prefijados por el diseñador. Si el sistema cumple unas condiciones de controlabilidad muy generales siempre puede hallarse una matriz de ganancia constante que satisfaga las exigencias anteriores, pero dicha matriz no es única y para las distintas matrices de ganancia que generan los mismos polos la respuesta dinámica del sistema es muy diferente [34,37,41,51,57–66].
- *Control predictivo.* El control predictivo fue formulado inicialmente en tiempo discreto en [67,68] como una estrategia de control consistente en predecir, en cada instante de muestreo, un valor de la salida para el instante siguiente y obtener la señal de control imponiendo que la salida predicha sea igual a una salida deseada. La salida se predice en cada instante a partir de su valor real (el cual se supone medible) en el instante anterior mediante un modelo discreto que simula la evolución del sistema. Dicho modelo se denomina **modelo predictivo**. Con posterioridad [69–71] se amplió el alcance de las predicciones efectuadas por el modelo predictivo definiendo en cada instante k otro instante futuro $k + \lambda$ denominado **horizonte de predicción**. En cada instante el modelo predictivo predice, a partir de la salida real del sistema, la secuencia de salidas en los instantes futuros anteriores al horizonte de predicción. La acción de control es generada en cada instante minimizando una función de coste [71] definida en el intervalo de predicción $[k, k + \lambda]$. La estrategia de control predictivo ha sido utilizada generalmente en distintas aplicaciones [72–77]. Recientemente se ha aplicado para el diseño de sistemas de control de estructuras [78–83].

Si se comparan las cualidades de las tres estrategias anteriores, la comparación resulta ventajosa para el control predictivo [83] puesto que, frente al control óptimo, presenta una formulación más genérica de la que resultan unas expresiones más sencillas. Ello resulta especialmente ventajoso en estructuras con comportamiento no lineal o en estructuras cuyas constantes dinámicas de masa, amortiguamiento y rigidez son desconocidas o conocidas con imprecisión, puesto que en dichos casos es preciso calcular "on-line" en cada instante de muestreo el valor de la matriz de ganancia a partir de los resultados de ensayos de identificación. El principal inconveniente del control por asignación de polos radica en la indeterminación en la obtención de la matriz de ganancia.

Las estrategias de control descritas en el presente subapartado pueden ser formuladas en coordenadas generales o en coordenadas modales en cuyo caso el control recibe el nombre de **control modal**. El control modal es imprescindible en estructuras continuas difícilmente discretizables espacialmente en modelos de masas concentradas (tales como tableros de puentes, chimeneas metálicas, etc.) y es conveniente en estructuras grandes en las que el comportamiento dinámico puede describirse con un número reducido de modos propios de vibración (tales como edificios que incorporan en su estructura un núcleo rígido).

El control modal puede, a su vez, ser formulado de dos maneras: **control modal acoplado** (o global) y **control modal desacoplado** (o independiente conocido por las siglas IMSC correspondientes en lengua inglesa a "Independent Modal System Control").

- En el control modal acoplado se ejerce un número determinado de fuerzas de control para controlar un número superior de modos propios de vibración de la estructura [54,60,62,84,85]. Puesto que las coordenadas modales no son medibles es preciso diseñar **observadores** para estimar su valor a partir de mediciones de la respuesta de la estructura [86]. En el control modal acoplado los modos residuales no controlados pueden ser excitados por las fuerzas modales de control apareciendo fenómenos de inestabilidad conocidos en la literatura anglosajona con el nombre de "spillover" [87-90]. Para evitar la inestabilidad de los modos residuales se han

formulado algoritmos de control que incorporan criterios de estabilidad de dichos modos [34,59] y en otras ocasiones se han utilizado funciones de Green y otros procedimientos para asegurar la ausencia de spillover [26,27,85].

- En sistemas desacoplables en coordenadas modales puede generarse una acción de control independiente para cada modo propio ejerciendo un número de fuerzas de control igual al número de modos que se desea controlar. En este caso los modos no controlados no resultan afectados y no aparecen fenómenos de spillover [42,59,91,92].

1.3.4 Mecanismos actuadores utilizados en el control de estructuras.

En los sistemas de control activo de estructuras se han sugerido distintos procedimientos para ejercer la acción de control sobre la estructura. En [93] se proponen procedimientos basados en distorsionar adecuadamente la estructura (aplicación de incrementos de temperaturas a algunas barras, movimientos de apoyos, modificación de las longitudes de las barras, etc.) pero dichos métodos son únicamente aplicables a los problemas que el autor denomina "cuasi-estáticos" en los que los desplazamientos son muy lentos. En los casos habituales la acción de control consiste en la aplicación de fuerzas de control que se ejercen sobre la estructura mediante dispositivos actuadores incorporados a la misma. En [35] se proponen dispositivos electromecánicos para aplicar las fuerzas de control sobre la estructura. Sin embargo, los dispositivos más comúnmente propuestos se basan en principios mecánicos. Dentro de este último grupo los mecanismos actuadores propuestos pueden ordenarse en los cuatro grupos siguientes:

- *Deflectores aerodinámicos de geometría variable.* En edificios altos se consideran deflectores móviles conocidos en la literatura anglosajona como "aerodynamical appendages" instalados en su parte superior para reducir los desplazamientos producidos por el viento. La posición de los deflectores puede gobernarse de forma continua y, al modificarse el perfil que presentan al viento, varía la fuerza que éste ejerce sobre ellos, pudiéndose generar de esta forma una acción de control continuada [33,38,94]. En la figura 1.12 se representa una instalación de deflectores móviles en la parte superior de un edificio.

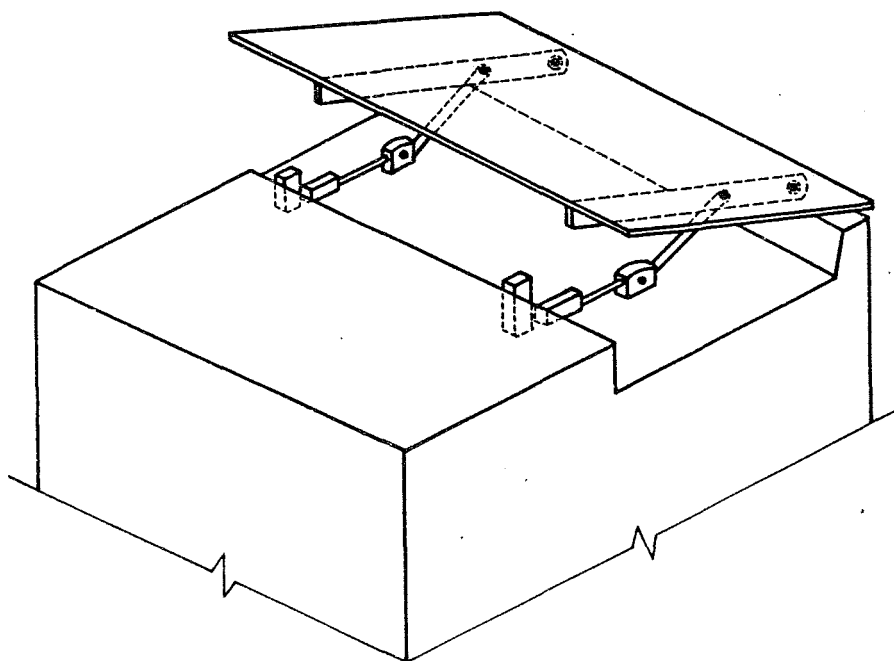
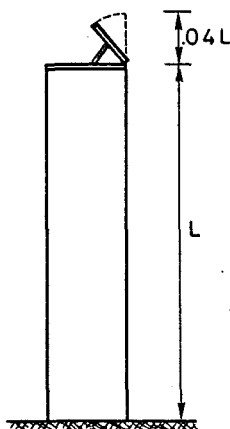


Figura 1.12 Deflectores aerodinámicos móviles instalados en la parte superior de un edificio.

La utilidad de los deflectores móviles para reducir la respuesta eólica de los edificios sin un consumo excesivo de energía ha sido verificada mediante simulación numérica [94] y mediante ensayos en modelo reducido [38]. En la actualidad se

está construyendo en Singapur un edificio que incorpora este tipo de sistemas de control activo. Los deflectores de geometría variable han sido propuestos también para disminuir las oscilaciones laterales por torsión de tableros de puentes [95]. En la figura 1.13 se muestra un esquema de este tipo de instalaciones.

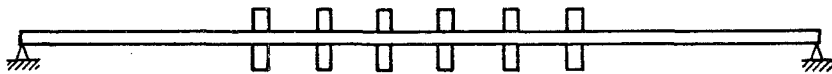


Figura 1.13 Deflectores aerodinámicos móviles instalados en un tablero de puente.

- *A. T. M. D.* Los dispositivos pasivos de absorción dinámica P.T.M.D. situados en la parte superior de edificios altos o torres de comunicación pueden transformarse en sistemas activos instalando actuadores hidráulicos que controlan el movimiento del bloque rígido respecto del edificio. En la figura 1.14 se representa un sistema A.T.M.D. instalado en una estructura de edificación.

Las fuerzas ejercidas por el bloque sobre el edificio varían con la posición de los actuadores hidráulicos y, controlando el movimiento de éstos, es posible ejercer una acción efectiva de control sobre el edificio. Los sistemas activos resultantes se conocen por las siglas A.T.M.D. que corresponden en idioma inglés a “active tuned mass dampers” [28,29,96]. La utilidad de los sistemas A.T.M.D. para reducir la respuesta eólica de las estructuras es superior a la de los sistemas P.T.M.D. aunque recientemente [97] se ha discutido (a partir de resultados obtenidos en ensayos numéricos) la efectividad del sistema P.T.M.D. para disminuir la respuesta a vibraciones forzadas, de forma que el autor considera únicamente su utilidad para amortiguar las vibraciones libres de la estructura y sugiere su utilización conjunta con otros sistemas de control activo. En [98] el mismo autor propone un método de diseño de sistemas A.T.M.D. en el que se tienen en cuenta las conclusiones

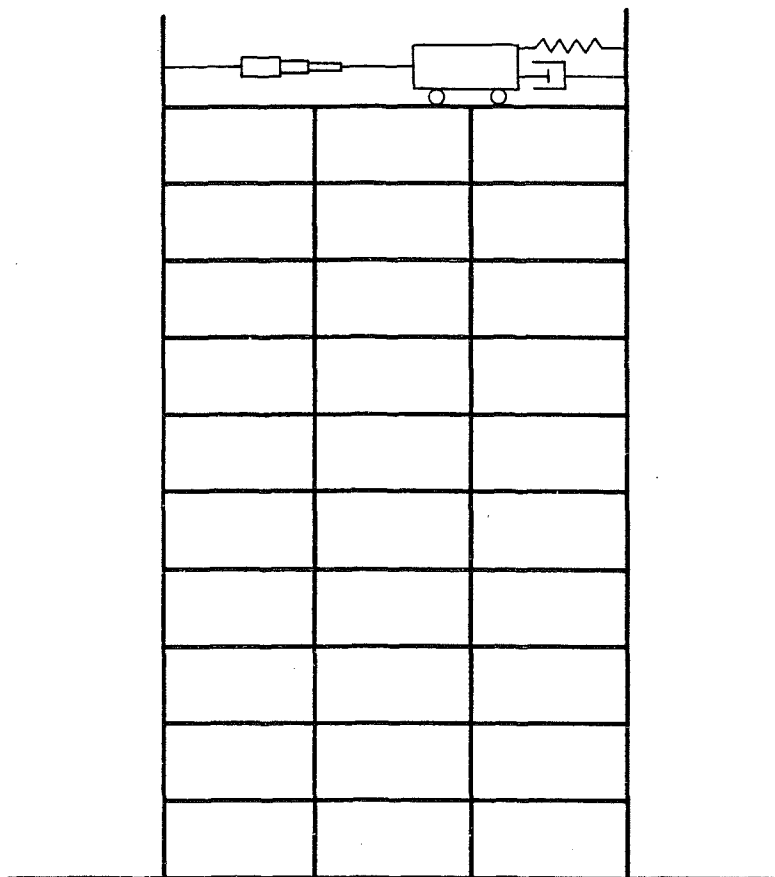


Figura 1.14 *A.T.M.D. en un edificio.*

expuestas en [97]. En [99] se describe un dispositivo T.M.D. instalado en el edificio Citicorp Center en New York, el cual incorpora actuadores hidráulicos y un ordenador analógico para controlar de forma activa el movimiento del bloque rígido. En [100] se describe una instalación similar en el edificio John Hancock en Boston. En la Canadian National Tower en Toronto existe otra instalación de este tipo.

- *Cables activos.* Son tirantes que se fijan a la estructura de forma que su tensión puede ser modificada de forma continua mediante mecanismos adecuados. Dichos

mecanismos son habitualmente cilindros hidráulicos cuyo movimiento se gobierna mediante servoválvulas alimentadas por un circuito hidráulico a presión. Las fuerzas internas que se generan son utilizadas para disminuir las deformaciones de la estructura. Los cables activos fueron propuestos independientemente por Freyssinet en 1960 y por Zetlin en 1965 y posteriormente ha sido recomendado su uso en edificios altos y en chimeneas metálicas para reducir las vibraciones horizontales provocadas por los seísmos y el viento y en tableros de puentes para reducir principalmente las oscilaciones verticales generadas por el paso de vehículos [35,57-59,65,101-104]. En la figura 1.15 se muestran sistemas de cables activos instalados en estructuras de edificación y en chimeneas metálicas.

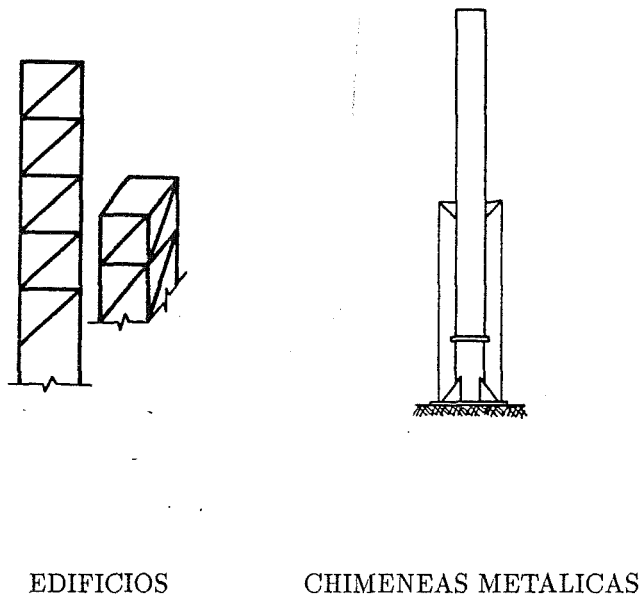


Figura 1.15 *Sistemas de control mediante cables activos en edificios y chimeneas metálicas.*

En la figura 1.16 se muestran sistemas de control de las oscilaciones verticales de puentes mediante cables activos.

- *Máquinas neumáticas generadoras de pulsos.* El movimiento de una estructura puede ser controlado eficazmente ejerciendo sobre ella fuerzas cuyo valor se

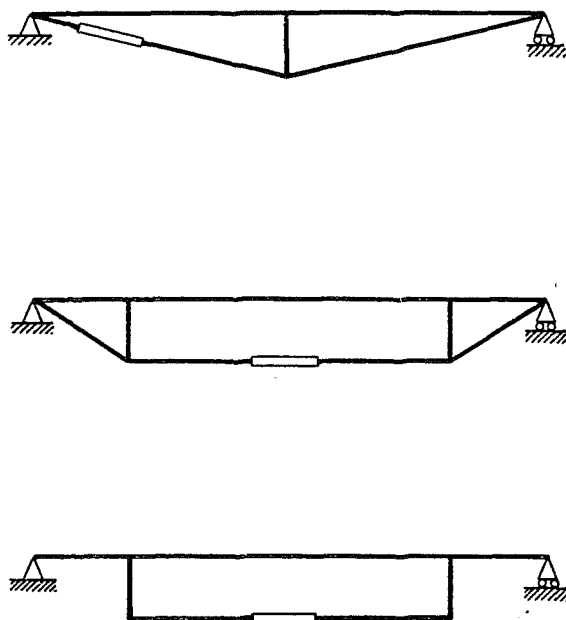


Figura 1.16 *Sistemas de control mediante cables activos en tableros de puentes.*

mantiene constante durante un cierto intervalo de tiempo. Dichas fuerzas se denominan pulsos y pueden ser generadas por máquinas neumáticas mediante la eyección de un chorro de gas a presión. En [40,41,56,65,66,105-111] se ha propuesto el uso de máquinas generadoras de pulsos para controlar las vibraciones horizontales de edificios esbeltos sometidos a excitaciones sísmicas o eólicas. En la figura 1.17 se muestra un esquema de un edificio controlado activamente mediante máquinas neumáticas generadoras de pulsos.

En la University of Southern California se han desarrollado experiencias sobre un modelo a escala reducida de una estructura de edificación en el que se han instalado máquinas neumáticas generadoras de pulsos [111]. Los resultados de los ensayos confirman la utilidad del sistema de control para reducir la respuesta dinámica del modelo experimental a una excitación sísmica.

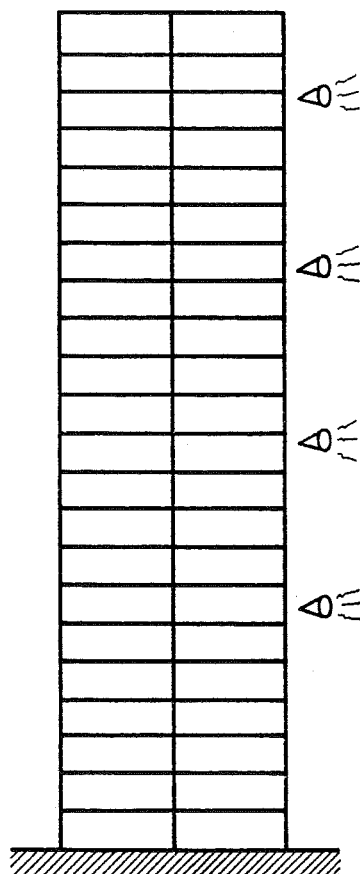


Figura 1.17 Sistema de control activo de un edificio mediante máquinas neumáticas generadoras de pulsos.

- *Masas auxiliares suspendidas.* Para controlar las oscilaciones verticales de tableros de puentes se ha propuesto en [60,95] instalar en los mismos masas suspendidas mediante resortes e interconectadas cada una de ellas con el tablero por mecanismos capaces de generar dos fuerzas verticales opuestas de forma que una de ellas es absorbida por las oscilaciones de la masa suspendida y la otra actúa como fuerza activa de control. En la figura 1.18 se muestra un esquema ilustrativo de un sistema de control de este tipo.

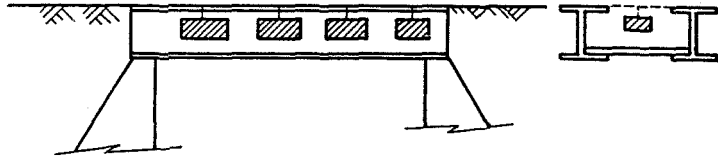


Figura 1.18 Sistema de control activo de un tablero de puente mediante masas auxiliares suspendidas.

- *Amortiguadores auxiliares.* Para controlar las oscilaciones verticales de tableros de puentes colgantes se ha propuesto en [60,95] instalar en los cables verticales de suspensión amortiguadores (conocidos en lengua inglesa como “dash-pots”) y mecanismos activos capaces de ejercer fuerzas de control modificando la tensión de los cables. En la figura 1.19 se representa un esquema de un sistema de control de este tipo.

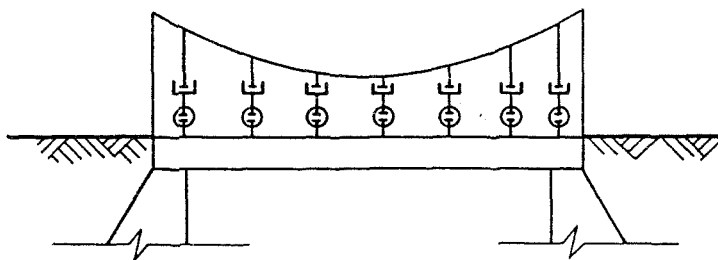


Figura 1.19 Sistema de control activo de un tablero de un puente colgante mediante amortiguadores auxiliares.

- *Cojines neumáticos.* Para controlar activamente los desplazamientos verticales de vigas de hormigón armado y aprovechar al máximo la resistencia del hormigón

se ha propuesto recientemente [112-115] el uso de barras de acero pretensado ancladas a ambos extremos de la viga y dispuestas a lo largo de su longitud de forma que su configuración longitudinal puede ser modificada variando la presión del aire contenido en unos cojines neumáticos intercalados entre las barras y la viga. Modificando la altura de los cojines con suficiente rapidez es posible ejercer una acción activa de control, especialmente bajo el paso de vehículos. En la figura 1.20 se describe un sistema de cojines neumáticos instalados en una viga experimental, modelo a escala reducida de un tablero de puente.

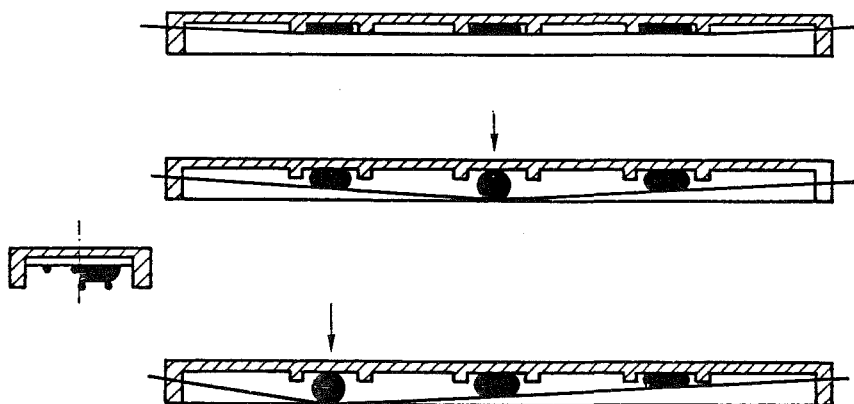


Figura 1.20 Sistema de control activo de un tablero de puente mediante cojines neumáticos.

La efectividad del sistema propuesto ha sido contrastada mediante ensayos experimentales.

Los mecanismos actuadores que presentan una mayor potencialidad para controlar simultáneamente las oscilaciones sísmicas y eólicas de estructuras son los cables activos y las máquinas generadoras de pulsos.

1.4 SISTEMAS SEMI-ACTIVOS.

Los sistemas de control activo precisan un importante aporte de energía para gobernar el movimiento de los actuadores. Si la energía utilizada es hidráulica deben disponerse instalaciones de almacenamiento capaces de mantener una presión de alimentación constante y, en presencia de una excitación dinámica violenta, son frecuentes las interrupciones en el suministro de energía eléctrica por lo cual no suele ser posible suministrar fluido a presión constante durante mucho tiempo. Para obviar estas limitaciones se proponen sistemas semi-activos que se caracterizan por consumir una cantidad ínfima de energía durante su actuación. Los sistemas semi-activos se distinguen de los sistemas pasivos en que reciben información on-line de la respuesta de la estructura y de los sistemas activos en que no precisan un aporte exterior de energía en cuantía apreciable.

Para mejorar el rendimiento de los elementos pasivos de absorción dinámica (P.T.M.D.) se ha propuesto un sistema semi-activo en el que los amortiguadores intercalados entre el bloque rígido y el edificio están formados por pistones cuyo movimiento puede ser frenado obturando el paso de un fluido viscoso por un orificio mediante una válvula de control. De esta forma se obtienen diferentes valores del amortiguamiento según la acción de la válvula y se puede generar una fuerza de control variable cuya única limitación es que su sentido ha de ser necesariamente opuesto al del movimiento relativo entre el bloque rígido y la estructura. La energía consumida es mínima puesto que únicamente es preciso controlar el movimiento de la válvula. Este sistema se representa mediante las siglas **S.A.T.M.D.** correspondientes en lengua inglesa a "semi-active tuned mass dampers" Los rendimientos obtenidos son comparables a los de los sistemas totalmente activos y superiores a los de los sistemas pasivos [116]. En [117] se propone un sistema semi-activo para controlar las oscilaciones de puentes y edificios esbeltos provocadas por el viento en que los mecanismos actuadores son cables de arriostamiento.

1.5 SISTEMAS DE CONTROL HÍBRIDOS.

En los apartados anteriores se ha puesto de manifiesto que cada sistema de control tiene unas limitaciones que reducen su aplicabilidad para resolver todos los problemas dinámicos que pueden afectar a una estructura concreta. Parece, pues, una solución natural combinar en una misma estructura distintos sistemas de control de forma que se complementen adecuadamente. Los sistemas resultantes se denominan **sistemas híbridos**.

En [97,95] se proponen sistemas híbridos de control de edificios altos utilizando simultáneamente cables activos, deflectores aerodinámicos móviles y T.M.D.

Una de las perspectivas más interesantes en el campo de los sistemas híbridos es la colaboración entre sistemas activos y pasivos. Ambos tipos de sistemas presentan limitaciones complementarias que restringen frecuentemente su campo de utilización: los sistemas pasivos no suelen ser aplicables a grandes estructuras por las importantes fuerzas dinámicas que entran en juego y por el riesgo de comprometer la estabilidad general de la estructura, mientras que los sistemas activos tienen un coste muy elevado debido, especialmente, a la importante cantidad de energía que se precisa para generar las fuerzas de control. En [118] se proponen, para modelos experimentales de estructuras de edificación, combinaciones de sistemas activos y pasivos que obvian ambas limitaciones: mediante sistemas de aislamiento de base se disminuyen las oscilaciones de la estructura y mediante cables activos se controlan los movimientos de pequeña amplitud que no han sido filtrados por el sistema pasivo.

REFERENCIAS.

- 1 Reinhorn, A.M. y Manolis, G.D., "Current state of knowledge on structural control", *The shock and vibration digest*, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., Vol. 17, N^o. 10, (1985).
- 2 Yao, J.T.P., "Identification and control of structural damage", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 757-778 (1979).
- 3 "Structural Control", *Proc. International IUTAM Symp. Struc. Control*, Leipholz, H.H.E., Editor, North Holland, Amsterdam (1979).
- 4 Jagadish, K.S., Raghu Prasad, B.K., y Vasudeva Rao, P., "The inelastic vibration absorber subjected to earthquake ground motions", *Intl. J. Earthquake Engrg. Struc. Dynam.*, 7, pp. 317-326 (1979).
- 5 Fintel, M. y Kahn, F.R., "Shock absorbing soft story concept for multistory earthquake structures", *Amer. Concrete Inst. J.*, Title N^o 66-29 (1969).
- 6 Mahin, S.M. y Williams, E.M., "Computer controlled seismic performance testing", *Second ASCE-EMD Specialty Conf. Dynam. Response Struc.*, Atlants, CA (1981).
- 7 Zuk, W., "The past and future of active structural control systems", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 779-794 (1979).
- 8 Yao, J.T.P., "Concept of structural control", *ASCE J. Struc. Div.*, 98 (ST7), pp. 1567-1574 (1972).
- 9 Balas, M.J., "Trends in large space structure control theory: fondest hopes, wildest dreams", *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-27, pp. 522-535 (1982).
- 10 Kelly, J.M., "Control devices for earthquake resistant structural design", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 391-414 (1979).

- 11 Skinner, R.L., "Base isolated structures in New Zealand", *Proc. 8th World Conf. Earthquake Engrg.*, V, San Francisco, CA, pp. 927-934 (1984).
- 12 Dimitrov, N., y Pocanschi, A., "Passive structural control by means of connections with adaptable parameters", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 160-171 (1987).
- 13 Kelly, J.M., Skinner, R.L., y Heine, A.J., "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", *Bull. New Zealand Natl. Soc. Earthquake Engrg.*, 5 (3) (1973).
- 14 Ryuiti, O., "Experiment on earthquake construction using roller type damper", *Journal of Architectural Institute of Japan*, Vol. 32, (1941).
- 15 Ryuiti, O., "Practical use of seismofree foundation", *Journal of Architectural Institute of Japan*, Vol. 47, (1956).
- 16 Caspe, M.S., "Earthquake isolation of multi-storey concrete structures", *Journal of the American Concrete Institute*, N^o. 11, pp. 923-933 (1970).
- 17 Nazin, V.V., "Buildings on gravitational seismoisolation system in Sebastopol", *Sixth Symposium on Earthquake Engineering*, University of Roorke, India, Vol. 1, pp. 356-368 (1978).
- 18 Bhatti, M.A., Pister, K.S., y Polak, E., "Optimization of control devices in base isolation systems for aseismic design", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 127-138 (1979).
- 19 Robinson, W.H. y Tucker, A.G., "A lead rubber shear damper", *Bull. New Zealand Natl. Soc. Earthquake Engrg.*, 10 (3), pp. 151-153 (1977).
- 20 Eighth World Conference on Earthquake Engineering, "Base isolation and mechanical systems for response reduction", *Proc. 8th WCEE*, V, Section 7.5, San Francisco, CA, pp. 925-1070 (July 1984).

- 21 Tarics, A.C., Way, D., y Kelly, J.M., "The implementation of base isolation for the foothill communities and Justice Center, country of San Bernardino, California", Report to NSF and the Country of San Bernardino, Reid and Tarics Associates and University of California, Berkeley (Nov. 1984).
- 22 Buckle, I.G., "Applications of base isolation and other control devices", *Forum on structural applications of protective systems for earthquake hazard mitigation*, The National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, N.Y. (1987).
- 23 Hirsch, G., "Critical comparison between active and passive control of wind induced vibrations of structures by means of mechanical devices", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 313-340 (1979).
- 24 Hirsch, G., "Practical experiences in passive vibration control of chimneys (conclusions from wind tunnel and full scale tests)", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 278-296 (1987).
- 25 Ayorinde, E.O. y Warburton, G.B., "Minimizing structural vibrations with absorbers", *Earthquake Engrg. Struc. Dynam.*, 8, pp. 219-236 (1980).
- 26 Warburton, G.B., "Optimum absorber parameters for minimizing vibration response", *Intl. J. Earthquake Engrg. Struc. Dynam.*, 9, pp. 251-262 (1981).
- 27 Warburton, G.B., "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters", *Int. J. Earthquake Engrg. Struc. Dynam.*, 10, pp. 381-401 (1982).
- 28 Lund, R., "Active damping of large structures in winds", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 459-470 (1979).
- 29 Yang, J.N. y Samali, B., "Control of tall buildings in along-wind motion", *ASCE J. Struc. Engrg. Div.*, 109 (EM1), pp. 50-68 (1983).

- 30 Chowdhury, A.H., Iwuchukwu, M.D. y Garske J.J., "The past and future of seismic effectiveness of tuned mass dampers", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 105-127 (1987).
- 31 Deghanyar, T.J., Masri, S.F., Miller, R.K. y Caughey, T.K., "On-line parameter control of nonlinear flexible structures", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 141-159 (1987).
- 32 K., Kwok "Damping increase in building with tuned mass damper", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, Vol. 110, N^o. 11, (1984).
- 33 Soong, T.T. y Skinner, G., "Experimental study of active structural control", *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 107 (EM6), pp. 1057-1067 (1981).
- 34 Abdel-Rohman, M. y Leipholz, H.H.E., "Active control of flexible structures", *ASCE J. Struc. Div.*, 104 (ST8), pp. 1251-1266 (1978).
- 35 Roorda, J., "Experiments in feedback control of structures", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 629-662 (1979).
- 36 Robinson, A.C., "A survey of optimal control of distributed parameter systems", *Automatica*, 7, pp. 371-388 (1971).
- 37 Soong, T.T. y Chang, M., "On optimal control configuration in theory of modal control", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 723-738 (1979).
- 38 Klein, R.E. y Salhi, H., "The optimal control of wind induced structural vibrations using active appendages", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 415-430 (1979).
- 39 Abdel-Rohman, M. y Leipholz, H.H.E., "General approach to active structural control", *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 105 (EM6), pp. 1007-1023 (1979).

- 40 Masri, S.F. y Stafford, F.B., "Optimization procedure for pulse-simulated response", *ASCE J. Struc. Div.*, 107 (ST9), pp. 1743-1761 (1981).
- 41 Masri, S.F., Bekey, G.A., y Caughey, T.K., "Optimum pulse control of flexible structures", *J. Appl. Mech.*, Trans. ASME, 48, pp. 619-626 (1980).
- 42 Calico, R.A., Jr. y Tnyfault, D.V., "Decoupled large space structure control", AIAA/ASME/ASCE/AHS 25th Struc., *Struc. Dynam. Matls. Conf.*, AIAA Dynam. Specialists Conf., 2, pp. 390-395 (1984).
- 43 Grabacki, J., "Minimum deformability desing and control of constraints", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 281-296 (1979).
- 44 Hallauer, W.L., Skidmore, G.R., y Gehling, R.N., "Modal-space active damping of a plane grid: experiment and theory", AIAA/ASME/ASCE/AHS 25th Struc., *Struc. Dynam. Matls. Conf.*, AIAA Dynam. Specialists Conf., 2 pp. 306-316 (1984).
- 45 Hyland, D.C., "Comparison of various controller-reduction methods: suboptimal vs. optimal projection", AIAA/ASME/ASCE/AHS 25th Struc., *Struc. Dynam. Matls. Conf.*, AIAA Dynam. Specialists Conf., 2, pp. 381-389 (1984).
- 46 Schafer, B. y Holzach, H., "Experimental research on flexible beam modal control", AIAA/ASME/ASCE/AHS 25th Struc., *Struc. Dynam. Matls. Conf.*, AIAA Dynam. Specialist Conf., 2, pp. 317-326 (1984).
- 47 Venkayya, V.B. y Tischler, V.A., "Frequency control and the effect on the dynamic response of flexible structures", AIAA/ASME/ASCE/AHS 25th Struc., *Struc. Dynam. Matls. Conf.*, AIAA Dynam. Specialists Conf., 2, pp. 431-441 (1984).
- 48 Wang, P.K.C. y Sarina, J.C., "Control for reflector vibrations in large spaceborne antennas by means of movable dampers", *J. Appl. Mech.*, Trans. ASME, 50, pp. 669-673 (1983).

- 49 Yang, J.N., "Application of optimal control theory to civil engineering structure", *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 101 (EM6), pp. 819-838 (1975).
- 50 Abdel-Rohman, M. y Leipholz, H.H.E., "Stochastic control of structures", *ASCE J. Struc. Div.*, 107 (ST7), pp. 1313-1325 (1981).
- 51 Abdel-Rohman, M., "Active control of large structures", *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 108 (EM5), pp. 719-730 (1982).
- 52 Abdel-Rohman, M. y Leipholz, H.H.E., "Automatic active control of structures", *ASCE J. Struc. Div.*, 106 (ST3), pp. 663-677 (1979).
- 53 Panagiotopoulos, P.D., "Optimal control of unilateral structural analysis problems", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 545-562 (1979).
- 54 Yang, J.N. y Lin, M.J., "Building critical-mode control: nonstationary earthquake", *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 109 (EM6), pp. 1375-1389 (1983).
- 55 Dehghanyar, T.J., Masri, S.F., Miller, R.K., Bekey, G.A. y Caughey, T.K., "Sub-optimal control of non-linear flexible space structures", *NASA/ACC Workshop Ident. Control Flexible Space Struc.*, San Diego, CA (1984).
- 56 Garibotti, J.F., "Requirements and issues for the control of flexible space structures", AIAA/ASME/ASCE/AHSM 25th Struc., *Struc. Dynam. Matls. Conf.*, AIAA Dynam. Specialist Conf., 2, pp. 338-347 (1984).
- 57 Yang, J.N. y Giannopoulos, F., "Active control and stability of cable-stayed bridge", *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 105 (EM4), pp. 677-694 (1979).
- 58 Vilnay, O., "Design of modal control structures", *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 107 (EM5), pp. 907-915 (1981).
- 59 Ng, C.K. y Inman, D.J., "Active control of decoupled underdamped systems", AIAA/ASME/ASCE/AHS 25th Struc., *Struc. Dynam. Matls. Conf.*, AIAA

- Dynam. Specialists Conf., 2, pp. 192–200 (1984).
- 60 Soong, T.T. y Chang, J., “Control, isolation and damping”, *Shock Vib. Bull.*, U.S. Naval Res. Lab., Proc. 52, P1.4, pp. 47–54 (1982).
- 61 Inman, D.J. y Andry, A.N., “The nature of the temporal solutions of damped distribution systems with classical normal modes”, *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, 49, pp. 867–870 (1982).
- 62 Juang, J.N., Sae-Ung, S., y Yang, J.N., “Active control of large building structures”, *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam pp. 663–676 (1979).
- 63 Martin, C. y Soong, T.T., “Modal control for multistory structures”, *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 102 (EM4), pp. 613–623 (1976).
- 64 Dehghanyar, T.J., Masri, S.F., Miller, R.K., Bekey, G.A., y Caughey, T.K., “An analytical and experimental study into the stability and control of nonlinear flexible structures”, *4th Virginia Polytech. Inst. State Univ./AIAA Symp. Dynam. Control Large Struc.*, Blacksburg, VA (1983).
- 65 Udwadia, F. y Tabaie, S., “Pulse control-single degree of freedom system”, *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 107 (EM6), pp. 997–1009 (1981).
- 66 Udwadia, F. y Tabaie, S., “Pulse control of structures and mechanical systems”, *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 107 (EM6), pp. 1011–1028 (1981).
- 67 Martín Sánchez, J.M., “Contribución a los sistemas adaptativos con modelo de referencia a partir de la teoría de hiperestabilidad”, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, (1974).
- 68 Martín Sánchez, J.M., “A new solution to adaptive control”, *Proc. of the IEEE*, Vol. 64, N^o 8, pp. 1209–1218 (1976).
- 69 Martín Sánchez, J.M., “Adaptive-predictive control system (C.I.P.)”, European

- Patent Application N^o 811026210-2206, Fecha de prioridad: 7 de Abril (1980).
- 70 Rodellar, J., "Diseño óptimo del bloque de consigna en el sistema de control adaptativo-predictivo", Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona, (1982).
- 71 Martín Sánchez, J.M. Reply to "Comments on a new solution to adaptive control", Proceeding Letters, *Proc. of IEEE*, (1977).
- 72 Martín Sánchez, J.M., "A globally stable APCS in the presence of bounded noises and disturbances", *IEE Trans. Autom. Con.*, vol. AC-29, N^o 5, pp. 461-464 (1984).
- 73 Martín Sánchez, J.M., "Realizaciones del control adaptativo-predictivo en los dominios industrial y aerospacial", *Mundo Electrónico*, 71 pp. 13-19 (1978).
- 74 Martín Sánchez, J.M., "Moderna teoría de control; método de control adaptativo-predictivo: teoría y aplicaciones", Fundación Juan March, Madrid, (1977).
- 75 Martín Sánchez, J.M., "Adaptive-predictive control method", USA Patent, N^o 4197576, Fecha de prioridad, 4 de Agosto (1976).
- 76 Martín Sánchez, J.M. y Shah, S.L., "Multivariable adaptive-predictive control of a binary distillation column", *Automatica*, Special Issue on Adaptive Systems, (1984).
- 77 Rodellar, J. y Martín Sánchez, J.M., "Nueva dimensión del control industrial: el controlador SCAP", *Mundo Electrónico*, 100, pp. 83-90 (1980).
- 78 Rodellar, J. y Barbat, A.H., "Active control of building structures under measured seismic loads", *Engineering Computations*, Vol. 2, pp. 128-134 (1985).
- 79 Rodellar, J. y Martín Sánchez, J.M., "Predictive structural control", *Proceedings of the II International Symposium on Structural Control*, University of Waterloo, Ontario, Canada, (1985).
- 80 Rodellar J., Barbat A.H. y López Almansa F., "Experiencias de control antisísmico

de estructuras”, *Trobades científiques de la Mediterrània*. Xarxes sísmiques: Instrumentació i aplicació a la sismotectònica, Mahón, (1986).

- 81 Rodellar, J. y Barbat, A.H., “Digital control of structures subjected to seismic actions”, *Proc. of Numerical Methods in Engrg.: Theory and Applications*, A.A. Balkema Publ., Vol.1, pp. 281–290 (1985).
- 82 Rodellar, J. y Barbat, A.H., “Control digital predictivo de la respuesta sísmica de estructuras”, *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 1(1), pp. 53–66 (1985).
- 83 Rodellar, J., Barbat A.H. y Martín Sánchez, J.M., “Predictive control of structures”, *J. Engrg. Mechanics, Div. ASCE*, Vol. 113, N^o 6, pp. 797–812 (1987).
- 84 Yang, J.N. y Giannopoulos, F., “Active control of two cable-stayed bridge”, *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 105 (EM5), pp. 795–810 (1979).
- 85 Yang, J.N. y Lin, M.J., “Optimal critical mode control of building under seismic load”, *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 108 (EM6), pp. 1167–1185 (1982).
- 86 Abdel-Rohman, M., Leipholz, H.H.E., y Quintana, V., “Design of reduced-order observers for structural control systems”, *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 57–78 (1979).
- 87 Balas, M.J., “Toward a (more) practical control theory for distributed parameter systems”, *Control and Dynamic Systems, Advances in Theory and Applications*, C.T. Leondes, Editor, 18, (1982).
- 88 Leipholz, H.H.E., “Control of continuous systems: fighting spillover”, *Seminar Lecture, Earthquake Engrg. Lecture Series*, State University of New York at Buffalo (1984).
- 89 Meirovitch, L. y Baruh, H., “Effect of damping on observation spillover instability”, *J. Optimiz. Theory Applic.*, 35 (1), pp. 31–44 (1981).

- 90 Weeks, C.J., "Static shape determination and control of large space structures: a large space antenna", *J. Dynam. Syst., Meas. control, Trans. ASME*, Vol. 106, pp. 267-272 (1984).
- 91 Meirovitch, L. y Oz, H., "Active control of structures by modal synthesis", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 505-522 (1979).
- 92 Meirovitch, L. y Silverberg, L.M., "Control of structures subjected to seismic excitation", *J. Engr. Mech. Div. ASCE*, Vol. 109, N^o. 2, pp. 604-618 (1983).
- 93 Holnicki-Szulc J., y Mróz., Z., "Active control of stresses and deflections of elastic structures by means of imposed distortions", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 297-317 (1987).
- 94 Chang, J.C.H. y Soong, T.T., "The use of aerodynamics appendages for tall building control", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 199-209 (1979).
- 95 Leipholz, H.H.E., Abdel-Rohman, M., "Control of structures", Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, (1986).
- 96 Chang, J.C.H. y Soong, T.T., "Structural control using active tuned mass dampers", *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 106/6 (EM6), pp. 1091-1098 (1980).
- 97 Abdel-Rohman, M., "The feasibility of active control of tall buildings", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 1-16 (1987).
- 98 Abdel-Rohman, M., "Design of active T.M.D. in tall buildings", *Journal of Buildings and Environment*, Pergamon Press, England, pp. 191-195 (1984).
- 99 Petersen N.R., "Design of large scale tuned mass dampers", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 581-596 (1979).

- 100 "Tuned mass dampers steady sway of skyscrapers in wind", *Engineering New Record*, pp. 28-29 (1977).
- 101 Roorda, J., "Tendon control in tall structures", *ASCE J. Struc. Div.*, 101 (ST3), pp. 505-521 (1975).
- 102 Zuk, W., y Clark, R.H., "Kinetic Architecture", Van Nostrand Reinhold Co., New York, (1970).
- 103 Carotti, A., de Miranda, M., y Turci, E., "An active protection system for wind induced vibrations of pipe-line suspension bridges", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 76-104 (1987).
- 104 Yang, J.N. y Giannopoulos, F., "Active tendon control of structures", *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 104 (EM4), pp. 551-568 (1978).
- 105 Lin, R.C., "Pulse control for a two-degrees-of-freedom system", Master's Project, Dept. Civil Engrg., State University of New York, Buffalo (1984).
- 106 Masri, S.F., Bekey, G.A., y Caughey, T.K., "On-Line control of non-linear flexible structures", *J. Appl. Mech., Trans. ASME*, 49, pp. 877-884 (1982).
- 107 Masri, S.F., Bekey, G.A., y Udwadia, F.E., "On-line pulse control of tall buildings", *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, North Holland, Amsterdam, pp. 471-492 (1979).
- 108 Prucz, Z., Soong, T.T., y Reinhorn, A.M., "Pulse control of deep water off-shore structures", Paper 84-012, *ASCE ann. Convention*, Atljanta, GA (1984).
- 109 Prucz, Z., Soong, T.T., y Reinhorn, A.M., "An analysis of pulse control for simple mechanical systems", Paper N^o 4-WA/DSC-3, *Ann. Winter Mtg., ASME*, New Orleans, LA (1984).
- 110 Soong, T.T., Reinhorn, A.M., y Yang, J.N., "Standardized model for structural

- control experiments and some experimental results”, *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 669–693 (1987).
- 111 Miller, R.K., Masri, S.F., Dehghanyar, T.J., y Caughey, T.K., “Active vibration control of large civil structures”, *AIAA 26th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Orlando, Florida (1985).
- 112 Domke, H., “Increase in efficiency and reliability of load bearing members by active deformation control (surveys, advantages and restraints of ADC in civil engineering)”, *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 172–191 (1987).
- 113 Busch, W. y Witte, B., “Reference measuring systems as a constructional element of load-bearing assemblies with ADC”, *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 192–198 (1987).
- 114 Bouten, H. y Meyr., H., “Control design for ADC-girder”, *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 199–214 (1987).
- 115 Backé, W. y Forster I., “Fluid-technical unit for active control of deformations”, *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 215–220 (1987).
- 116 Hrovat, D., Barak, P., y Robins, M., “Semi-active vs passive or active tuned mass dampers for structural control”, *ASCE J. Engrg. Mech. Div.*, 109 (EM3), pp. 691–701 (1983).
- 117 Klein R.E., y Healey., M.D., “Semi-active control of wind induced oscillations in structures”, *Structural Control*, H.H.E. Leipholz, Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 354–369 (1987).
- 118 Reinhorn, A.M., “Hybrid systems – combined passive and active control”, *Forum*

on structural applications of protective systems for earthquake hazard mitigation,
The national center for earthquake engineering research, State University of New
York, Buffalo, N.Y. (1987).