

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 2

MOTIVACIONES Y OBJETIVOS DE LA TESIS

En el capítulo 1 se ha mostrado una visión general del campo del control de estructuras y una visión más específica y detallada del control activo de estructuras. La presente Tesis se enmarca en el contexto del control activo de estructuras de edificación.

En este capítulo se presentan las motivaciones que han sugerido la realización de esta Tesis, los objetivos que ésta se propone y su estructuración en capítulos.

En el apartado 2.1 se muestra una visión general del control activo de estructuras de edificación y una visión más detallada de los sistemas de control por cables activos señalando los principales interrogantes que limitan el desarrollo de dicho campo.

En el apartado 2.2 se definen los objetivos de la presente Tesis.

En el apartado 2.3 se describe la organización de la Tesis en los diferentes capítulos para alcanzar los objetivos expuestos en el apartado anterior.

INDICE

2.1 Control activo de estructuras de edificación.	2.3
2.2 Objetivos de la presente Tesis.	2.7
2.3 Organización de la presente Tesis.	2.10
Referencias.	2.12

2.1 CONTROL ACTIVO DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACION.

La problemática específica de los fenómenos dinámicos en las estructuras de edificación se refiere especialmente a estructuras esbeltas y a excitaciones de carácter natural tales como sacudidas sísmicas y ráfagas de viento. En dicho contexto han sido propuestos distintos sistemas de control activo para reducir las oscilaciones horizontales de los edificios. Dichos sistemas pueden clasificarse según las estrategias de control y los mecanismos actuadores que utilizan.

Las principales estrategias de control consideradas en el control activo de estructuras de edificación han sido formuladas en tiempo continuo generando sistemas de control analógicos. El control óptimo y el control por asignación de polos han sido las estrategias más frecuentemente consideradas mientras que el control predictivo, debido a su reciente formulación y a pesar de sus ventajas, no ha sido utilizado de forma generalizada en el contexto del control activo de estructuras.

Los principales mecanismos actuadores que han sido propuestos para control activo de estructuras de edificación son: A.T.M.D., deflectores aerodinámicos móviles, cables activos y máquinas neumáticas generadoras de pulsos. La utilidad de estos sistemas para reducir la respuesta del edificio ya ha sido comentada en el apartado 1.3, en donde se constata que los cables activos y las máquinas generadoras de pulsos son los mecanismos que presentan una mayor utilidad potencial para reducir los desplazamientos horizontales provocados por excitaciones sísmicas y eólicas. Por otra parte los sistemas mecánicos en que se basa el funcionamiento de los cables activos han sido ya experimentados con éxito en ensayos en modelo reducido en la State University of New York en Buffalo (N.Y.) [1-3] y utilizan únicamente elementos que pueden obtenerse fácilmente en el mercado. Por dichas consideraciones se consideran en la presente Tesis mecanismos actuadores por cables activos.

Para estructuras de edificación han sido propuestos distintos esquemas de colocación de los cables en el edificio. En [4] y [5] se presenta una disposición de los cables en la que se instalan cuatro parejas de cables activos entre plantas adyacentes tal como se muestra en la figura 2.1.

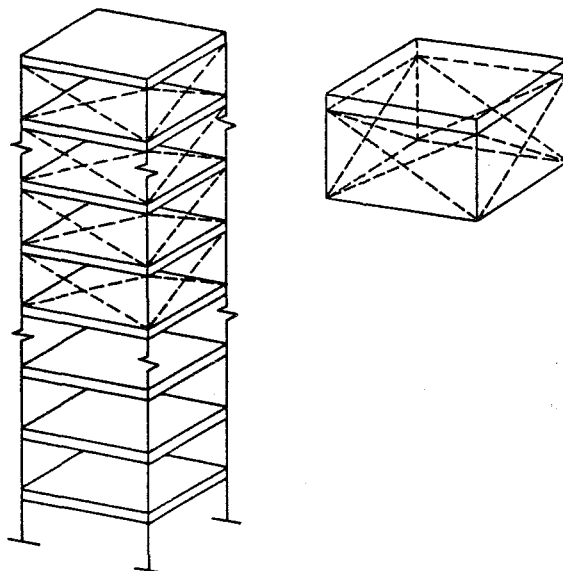


Figura 2.1 *Sistema de control de un edificio mediante cables activos.*

El movimiento de cada pareja de cables activos se gobierna por una servoválvula y un cilindro hidráulico. En [4] se analiza la utilidad de los cables activos para reducir la respuesta frente a una excitación de viento de un edificio de 40 plantas suponiendo que todos los cables son iguales y bajo dos suposiciones distintas: cables entre todas las plantas y cables únicamente en las 20 plantas inferiores. En ambos casos la respuesta del edificio resulta sensiblemente disminuida sin necesidad de que las fuerzas de control transmitidas por los cables activos adopten valores desmesurados. En [5] se estudia la efectividad del sistema de cables activos descritos en la figura 2.1 para controlar la respuesta de edificios a excitaciones sísmicas analizando el caso particular de un edificio de 8 plantas con cables entre todas las plantas contiguas comprobándose que se obtiene una importante reducción de las oscilaciones horizontales con unos valores razonables de las fuerzas de control ejercidas por los cables. En ambos casos, los valores de las fuerzas horizontales de control se obtienen a partir de esquemas analógicos de realimentación aplicados a cada mecanismo actuador instalado entre plantas contiguas, siendo la variable controlada el desplazamiento horizontal relativo entre dichas plantas.

A partir de los resultados mostrados en [4] y [5] se abren distintos interrogantes

relativos a la utilidad y viabilidad de los cables activos para reducir la respuesta dinámica de edificios. Dichos interrogantes pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Diseño de un esquema de colocación de los cables activos en el edificio con menor número de cables y de dispositivos mecánicos que controlan su movimiento a fin de obtener instalaciones más económicas y que ocupen menos espacio.
- Análisis del comportamiento del sistema de cables activos en función de las características dinámicas de los edificios. En particular, puede ser relevante la distinción entre edificios con un núcleo central rígido que condiciona el comportamiento dinámico horizontal y edificios cuya rigidez proviene únicamente de la estructura resistente formada por los pilares y los forjados. También es importante analizar la posibilidad de controlar mediante cables activos la respuesta sísmica de edificios de altura superior a 8 plantas.
- Evaluación del efecto en la estructura del edificio de las fuerzas de control transmitidas por los cables activos. Es especialmente importante analizar el efecto de las componentes verticales de dichas fuerzas, las cuales no son útiles para la acción de control y únicamente se traducen en compresiones, generalmente indeseables, sobre los pilares.
- Consideración de sistemas de cables activos constituidos por cables no necesariamente iguales.
- Obtención de las tensiones máximas en las barras de la estructura de los edificios en dos situaciones distintas: presencia de la acción de control y ausencia de la misma. A partir de estos datos es posible evaluar con precisión la disminución de las tensiones en las barras generada por la acción de control.
- Consideración de una estrategia de control en tiempo discreto en un esquema de control digital que permita obviar las limitaciones intrínsecas a los esquemas de realimentación clásica expuestas en el subapartado 1.3.3.
- Formulación de un esquema de simulación numérica del lazo cerrado de control

más completo y que tenga en cuenta todos los elementos que intervienen en el mismo.

- Análisis de la estabilidad del sistema de control y de su robustez respecto de errores en la modelización del comportamiento dinámico del edificio y en la estimación de las características del sistema de control. Es importante estudiar el comportamiento del sistema de control por cables activos cuando una excitación de superior violencia a aquella para la que dicho sistema ha sido dimensionado supera su capacidad de respuesta y no puede ejercer sobre la estructura del edificio las fuerzas de control pedidas por el algoritmo de control, reaccionando únicamente en la medida de sus posibilidades (en dicho caso se dice que los cables activos trabajan en condiciones de saturación).
- Estimación de la energía total invertida en el control y dimensionamiento de los elementos mecánicos capaces de proporcionarla y de resistir las correspondientes sollicitaciones.

En [6] y en otros trabajos de los mismos autores se propone otro esquema de instalación de cables activos en una estructura de edificación y se comprueba su eficacia para controlar las oscilaciones horizontales provocadas por el viento en edificios de 1000. *pies* de altura. En la figura 1.15 se representa un esquema de la colocación de los cables activos propuesta en [6] en la que se observa que, mediante un sistema de poleas, los cables activos ejercen una única fuerza de control horizontal en la parte superior del edificio mediante la cual únicamente es posible controlar el primer modo propio. El valor de la fuerza de control se obtiene a partir de un esquema de asignación de polos. Las principales diferencias entre los estudios contenidos en [4] y [5] por una parte y en [6] por otra parte, radican en la disposición de los cables y en que en [6] no se analiza la efectividad de los cables activos para reducir la respuesta sísmica. La mayor parte de los interrogantes abiertos por [4] y [5] continúan sin respuesta a pesar de la contribución de [6] puesto que en dicho trabajo únicamente se contemplan tres puntos no desarrollados en [4] y [5]: se toma en consideración el tiempo de respuesta de los actuadores, se considera una estrategia de control más sofisticada (aunque formulada en tiempo continuo) y se propone otra disposición de los cables activos en el edificio.

En contrapartida, se abren dos nuevos interrogantes:

- Pérdidas de tensión por rozamiento de los cables en las poleas representadas en la figura 1.15.
- Comportamiento de los modos superiores no controlados.

2.2 OBJETIVOS DE LA PRESENTE TESIS.

El objetivo de la presente Tesis es contribuir al esclarecimiento de algunos de los interrogantes formulados en el apartado 2.1 proponiendo sistemas de control de edificios mediante cables activos en los que las fuerzas de control se obtienen a partir de una estrategia de control predictivo.

Para alcanzar dicho objetivo general se plantean los siguientes objetivos particulares: definición de los sistemas de control, formulación de un esquema numérico de simulación, realización de ensayos numéricos y experimentales sobre un modelo real y realización de ensayos numéricos sobre estructuras de edificación. En los párrafos siguientes se describen los cuatro objetivos anteriores:

- 1) *Definición de los sistemas de control.* En la presente Tesis se propone un diseño de sistemas de control digital activo de estructuras de edificación haciendo especial hincapié en los elementos más problemáticos que lo constituyen: el algoritmo de control implementado en el ordenador digital y los mecanismos actuadores. En los párrafos siguientes se definen las propuestas que se hacen sobre dichos elementos:
 - *Algoritmo de control.* Se propone un algoritmo basado en una estrategia de control predictivo en la cual se tengan en cuenta el tiempo de respuesta de los mecanismos actuadores y los posibles errores de modelización de la estructura. El algoritmo se formula en coordenadas generales para considerar la respuesta global de la estructura.
 - *Mecanismos actuadores.* Se proponen actuadores formados por cables activos cuyo movimiento se gobierna mediante servoválvulas alimentadas

por un circuito hidráulico a presión. Los cables activos se instalan en los edificios de acuerdo con un esquema de colocación general que engloba a los esquemas descritos en las figuras 1.15 y 2.1 como situaciones particulares evitando la colocación de un número excesivo de poleas de forma similar a la figura 1.15. Dicho esquema permite ejercer en puntos prefijados de la estructura un sistema arbitrario de fuerzas horizontales de control lo cual le convierte en potencialmente útil para ejercer una acción de control eficaz.

El sistema de control resultante debe ser capaz de proporcionar una sensible reducción de la respuesta bajo excitaciones sísmicas o del viento con un consumo de energía razonable, con unas sollicitaciones sobre sus distintas componentes que puedan ser resistidos por éstas y sin introducir en la estructura esfuerzos indeseados cuyos valores puedan comprometer la estabilidad o resistencia de alguno de sus elementos. La acción de control debe ser estable y robusta respecto de errores en la modelización de la estructura, de errores de estimación del tiempo de respuesta de los actuadores o respecto del funcionamiento de los mismos en condiciones de saturación.

- 2) *Formulación del esquema de simulación.* Puesto que no se dispone de sistemas de control por cables activos instalados en edificios reales es preciso simular numéricamente su comportamiento dinámico. En la presente Tesis se propone un modelo numérico en tiempo discreto de la secuencia de operaciones descrita en la figura 1.11 el cual tiene en cuenta todos los elementos que intervienen en el mismo y permite tomar en consideración el tiempo de respuesta de los actuadores así como simular su funcionamiento en condiciones de saturación.
- 3) *Ensayos numéricos y experimentales sobre un modelo real.* La bondad del esquema de simulación puede constatarse comparando los resultados numéricos proporcionados por dicho esquema con los resultados obtenidos experimentalmente en la State University of New York en Buffalo. En los laboratorios de dicha universidad se han realizado experiencias de control mediante cables activos de un modelo a escala reducida de una estructura de edificación considerando para la obtención de las fuerzas de control una estrategia de control predictivo. De la

comparación entre los resultados numéricos y los experimentales puede deducirse la exactitud proporcionada por el modelo numérico y a partir de los resultados experimentales puede constatararse la utilidad de los cables activos para reducir la respuesta dinámica de la estructura. La estabilidad y la robustez de la acción de control se analizan a partir de ensayos numéricos y experimentales en los que se consideran errores en las constantes dinámicas del modelo experimental y en la estimación del tiempo de respuesta de los actuadores. La robustez respecto del funcionamiento de los actuadores en condiciones de saturación se analiza exclusivamente mediante experiencias numéricas.

- 4) *Ensayos numéricos sobre edificios.* Para analizar la utilidad y realizabilidad de los sistemas de control de estructuras de edificación considerados en la presente Tesis se estudia su instalación en tres edificios y se efectúan ensayos numéricos bajo excitaciones sísmicas y del viento. Dichos edificios son conocidos en la presente Tesis como edificios A, B, y C, están formados por 23 plantas (valor que se ha elegido como representativo de alturas frecuentes en nuestro país), y difieren entre sí únicamente por los elementos utilizados en sus estructuras resistentes las cuales son representativas de las distintas tipologías estructurales consideradas habitualmente en edificios de estas dimensiones. Para analizar la robustez respecto del funcionamiento de los actuadores en condiciones de saturación se realizan experiencias numéricas en dicho sentido.

2.3 ORGANIZACION DE LA PRESENTE TESIS.

Para desarrollar los objetivos descritos en el apartado 2.2, esta Tesis se estructura en 9 capítulos y dos apéndices. A continuación se describe brevemente el contenido de los capítulos 3 hasta 9:

- *Capítulo 3.* Se desarrolla un modelo numérico en tiempo discreto que simula en espacio de estado el comportamiento dinámico de la estructura sometida a una excitación en presencia de unas fuerzas de control activo. Se analizan exhaustivamente las condiciones de estabilidad y precisión del modelo y se muestran ejemplos de aplicación para obtener la respuesta dinámica de estructuras no sometidas a acción de control. Este capítulo corresponde al objetivo 2).
- *Capítulo 4.* Se formula la estrategia de control predictivo, se muestra su particularización en el contexto del control activo de estructuras y se estudian sus características de estabilidad y robustez. Se presentan ejemplos numéricos que muestran la utilidad del control predictivo para reducir la respuesta dinámica de estructuras. Este capítulo corresponde al objetivo 1).
- *Capítulo 5.* Se describen los mecanismos actuadores por cables activos y se proponen distintas instalaciones de control de estructuras de edificación formadas por cables activos. Se obtiene la relación biunívoca entre la señal de control que alimenta a las servoválvulas y las fuerzas horizontales de control que ejercen los cables sobre la estructura. Se describen las prestaciones de los cables activos indicando los valores límite a partir de los cuales trabajan en condiciones de saturación. Este capítulo corresponde al objetivo 1).
- *Capítulo 6.* Se construye un modelo numérico que representa el comportamiento del lazo cerrado de control descrito en la figura 1.11 ensamblando el modelo de la estructura descrito en el capítulo 3, el modelo del controlador descrito en el capítulo 4 y el modelo de los mecanismos actuadores por cables activos descrito en el capítulo 5 con los modelos que representan el comportamiento dinámico de los sensores y de los convertidores A/D y D/A. Este capítulo corresponde al objetivo 2).

- *Capítulo 7.* Se comparan los resultados obtenidos experimentalmente en la State University of New York con los resultados numéricos proporcionados por el modelo numérico descrito en el capítulo anterior para verificar la bondad de dicho modelo. Se realizan distintas experiencias numéricas para mostrar la estabilidad y robustez del sistema de control mediante cables activos y su utilidad para reducir la respuesta dinámica del modelo experimental. Este capítulo corresponde al objetivo 3).

- *Capítulo 8.* Utilizando el modelo numérico descrito en el capítulo 6 se describen varias experiencias de simulación de control mediante sistemas de cables activos de los edificios A, B y C cuando éstos se encuentran sometidos a excitaciones sísmicas y del viento. Se consideran los distintos esquemas de colocación de los cables descritos en el Capítulo 5. En cada experiencia numérica se analiza la respuesta dinámica de los edificios y el rendimiento que deben proporcionar los sistemas de cables activos para ejercer sobre la estructura las fuerzas de control. Este capítulo corresponde al objetivo 4).

- *Capítulo 9.* Se presentan las principales conclusiones que pueden extraerse de la presente Tesis y las posibles líneas futuras de investigación.

En el apéndice A se describen exhaustivamente las características de los edificios A, B y C y en el apéndice B se describe la notación utilizada.

REFERENCIAS.

- 1 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).
- 2 Chung, L.L., Reinhorn, A.M. y Soong, T.T., "Experiments on active control of seismic structures", *Third ASCE/EMD Speciality Conference on Dynamic Response of Structures*, Los Angeles, 31 de Marzo-2 de Abril (1986).
- 3 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).
- 4 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).
- 5 Samali, B., Yang, J.N. y Liu, S.C. "Active control of seismic-excited buildings", *ASCE J. Struc. Engrg. Div.*, Vol. 111, N^o. 10, pp. 2165-2180 (1985).
- 6 Leipholz, H.H.E., Abdel-Rohman, M., "Control of structures", Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, (1986).