

SISTEMAS DE CONTROL DE ESTRUCTURAS DE EDIFICACION POR CABLES ACTIVOS

FRANCISCO LOPEZ ALMANSA*

y

JOSE RODELLAR**

**Escuela de Arquitectura,
Universidad Politécnica de Cataluña,
Barcelona, España*

***Escuela de Ingenieros de Caminos,
Universidad Politécnica de Cataluña,
Barcelona, España*

RESUMEN

En este artículo se propone un sistema de control activo de estructuras de edificación sometidas a excitaciones dinámicas (sísmicas o del viento) en el que los mecanismos actuadores son cables activos. La originalidad de la propuesta radica en la forma de instalar los cables activos en la estructura de los edificios objeto de control. La efectividad del sistema de control para reducir las oscilaciones horizontales de edificios con un coste razonable de energía es analizada mediante ensayos numéricos sobre dos edificios de 23 plantas cuyas estructuras son representativas de las tipologías estructurales más comúnmente utilizadas en edificios de esa altura. Se analiza exhaustivamente la robustez del sistema de control simulando numéricamente experiencias de control en situaciones límite. El análisis de los resultados obtenidos permite concluir que los cables activos son útiles para constituir sistemas de control de edificios de altura media, especialmente si su comportamiento dinámico horizontal es más similar al de una viga que al de un pórtico por existir pantallas verticales de rigidización.

SUMMARY

In this paper a control system by active tendons is proposed and its effectiveness to reduce the dynamic response of building structures with a reasonable cost of energy is tested by means of numerical experiments considering two 23-story buildings (called B_1 and B_2) subjected to seismic and wind excitations. B_1 is a frame building while B_2 is a shear wall building. The dynamic behaviours of buildings B_1 and B_2 are representative of those of the different types of structures most commonly used in buildings of about this number of floors. The results of the numerical experiments allow to conclude that active cables are useful to constitute a feasible, reliable and robust control system of medium-high buildings and that they are more effective in buildings with a dynamic behaviour similar to the one of building B_2 .

Recibido: Mayo 1988

INTRODUCCION

Un sistema de control activo estructural tiene la finalidad de minimizar la respuesta de estructuras sometidas a excitaciones dinámicas, estando esencialmente basado su funcionamiento en el esquema de control digital en lazo cerrado descrito en la Figura 1.

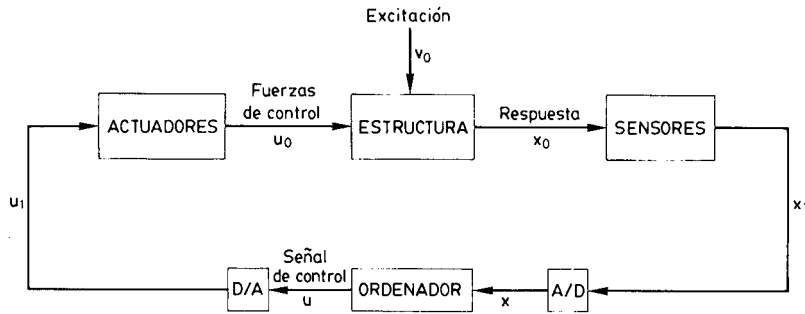


Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema de control activo de estructuras.

Los sensores miden de forma continua la respuesta de la estructura x_0 proporcionando una señal eléctrica analógica x_1 la cual es transformada en una secuencia en tiempo discreto x por el convertidor analógico-digital (A/D). El ordenador digital calcula la señal de control en tiempo discreto u usando un algoritmo numérico denominado algoritmo de control. La señal digital de control u es transformada en una señal u_1 en tiempo continuo por el convertidor digital-analógico (D/A). Finalmente, los mecanismos actuadores interpretan el valor de u_1 y ejercen las fuerzas de control u_0 sobre la estructura.

Para controlar las vibraciones horizontales de edificios sometidos a cargas dinámicas han sido propuestos (en el contexto del esquema descrito en la Figura 1) distintos mecanismos actuadores siendo los cables activos unos de los dispositivos sugeridos con mayor insistencia^{1,2,3,4}, consistiendo éstos en tirantes cuya tensión puede ser modificada continuamente mediante mecanismos servohidráulicos.

En¹ se propone un esquema de colocación de los cables activos en estructuras de edificación y se analiza numéricamente la capacidad de dicho sistema de control para reducir la respuesta de un edificio de 40 plantas sometido a la acción dinámica del viento. En² se desarrolla el mismo proceso para un edificio de 8 plantas sometido a excitaciones sísmicas. En^{1,2} el algoritmo de control está basado en un esquema clásico de realimentación (feedback). En³ se proponen otros sistemas de control de estructuras de edificación por cables activos y se analiza numéricamente su efectividad para reducir las oscilaciones horizontales debidas al viento. En⁴ se describe un modelo experimental de un edificio de 3 plantas controlado por cables activos y se presentan algunos resultados basados en ensayos experimentales de simulación de excitaciones sísmicas los cuales ponen de manifiesto la utilidad del sistema de control presentado para disminuir la respuesta del modelo. En^{3,4} el algoritmo de control está basado en la teoría de control óptimo.

En este trabajo se propone un esquema más general de colocación de los cables activos en los edificios y se presentan distintas experiencias numéricas con el objeto de analizar la utilidad de dicho sistema de control para reducir las oscilaciones horizontales de edificios sometidos a acciones dinámicas sísmicas y del viento.

Se consideran dos edificios de 23 plantas denominados, respectivamente, B_1 y B_2 [5]. La estructura resistente del edificio B_1 está formada exclusivamente por pórticos de acero de nudos rígidos mientras que el edificio B_2 tiene un núcleo central que actúa como pantalla y condiciona casi de forma exclusiva su rigidez frente a acciones horizontales. Los comportamientos dinámicos de los edificios B_1 y B_2 son sustancialmente distintos y son representativos de los comportamientos de los tipos de estructuras utilizadas habitualmente en edificios de altura media:

- Edificio B_1 . La deformación horizontal está producida especialmente por el esfuerzo cortante sobre los pórticos resultando unas curvas deformadas sinuosas (propias de estructuras aporticadas) en las que la influencia de los modos propios de orden superior al primero es apreciable.
- Edificio B_2 . La deformación horizontal está producida fundamentalmente por el momento flector sobre el núcleo rígido resultando, en consecuencia, curvas deformadas de aspecto menos sinuoso que en las estructuras aporticadas y en las que la contribución del primer modo propio es casi la única importante.

Las características del comportamiento dinámico de los edificios B_1 y B_2 condicionan de forma decisiva el rendimiento de los sistemas de control instalados en ellos.

El lazo cerrado de control mostrado en la Figura 1 se simula mediante un modelo matemático en tiempo discreto⁶ en el que se toman en consideración todos los elementos que lo constituyen. El algoritmo de control se basa en la estrategia de control predictivo⁷ en cuya formulación se tiene en cuenta el tiempo de respuesta de los mecanismos actuadores⁸. En las experiencias numéricas de simulación se considera excitación sísmica y del viento. Para analizar la realizabilidad del sistema de control propuesto en el presente trabajo en cada experiencia numérica se obtienen los valores de 6 índices que proporcionan información exhaustiva sobre las sollicitaciones que actúan sobre sus elementos. Para verificar su robustez se llevan a cabo distintas experiencias numéricas en condiciones de saturación de los mecanismos actuadores por cables activos.

DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL POR CABLES ACTIVOS

Las fuerzas horizontales de control u_0 se ejercen sobre la estructura del edificio a través de un número m de mecanismos actuadores cada uno de los cuales está formado por cables activos, es decir cuya tensión puede ser modificada rápidamente por cilindros hidráulicos cuyo movimiento se gobierna mediante servoválvulas. Los actuadores se instalan de forma que las fuerzas de control actúan sobre el edificio en distintas plantas. Cada actuador i genera una fuerza de control u_{0i} a partir de la señal de control u_1 . La Figura 2 muestra dos posibles esquemas de un actuador i ($i = 1, \dots, m$)⁵.

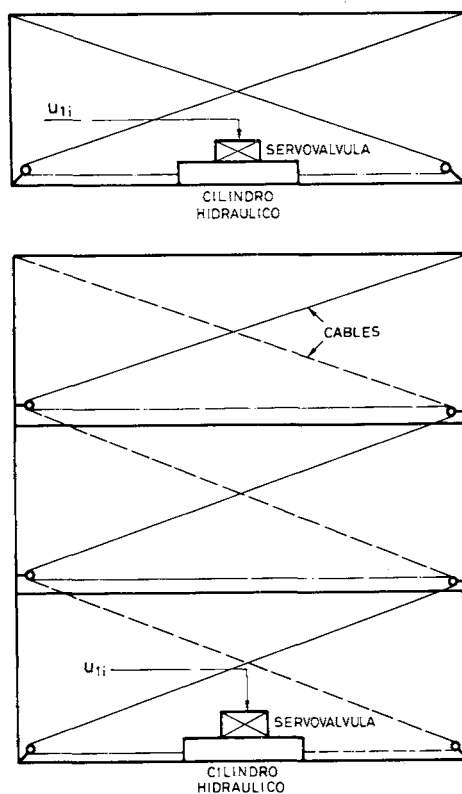


Figura 2. Mecanismos actuadores por cables activos.

Cada uno de los dos mecanismos actuadores mostrados en la Figura 2 está formado por dos cables que se fijan a un forjado por uno de sus extremos, deslizan sobre un número variable de poleas según se indica en dicha Figura y son solidarios por sus extremos opuestos con el movimiento del émbolo de un cilindro hidráulico cuya carcasa está fijada al forjado de una planta situada a un nivel inferior. El movimiento del cilindro se gobierna por una servoválvula a partir del valor de la componente $u_{1i}(t)$ de la señal analógica de control. Los mecanismos actuadores descritos en la Figura 2 producen un par de fuerzas horizontales $f_{hi}(t)$ que actúan sobre las plantas a las que se fijan los cables activos y un par de fuerzas verticales $f_{vi}(t)$, siendo únicamente útiles para una acción de control las componentes horizontales y correspondiendo las verticales a un efecto secundario no deseado y que, en consecuencia, conviene minimizar. La relación entre las fuerzas horizontales de control y la señal analógica que alimenta a la servoválvula puede representarse en la forma

$$f_{hi}(t) = C_{a_i} u_{1i}(t - \tau_{r_i}) \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

donde C_{a_i} es una constante que depende de factores tales como la rigidez de los cables, el ángulo de inclinación de los mismos y las constantes de calibración de la servoválvula y τ_{r_i} es el retardo causado por el tiempo de respuesta de los actuadores. Si se supone que τ_{r_i} toma el mismo valor τ_r para los m actuadores, la expresión (1) puede ser escrita

en forma matricial

$$f_h(t) = C_a u_1(t - \tau_r) \quad (2)$$

Los actuadores deben instalarse consecutivamente entre cada una de las m plantas en las que se desea ejercer fuerzas horizontales de control de forma que es necesario instalar tantos mecanismos actuadores de los tipos descritos en la Figura 2 como fuerzas de control se quiere aplicar. La Figura 3 muestra un esquema general de distribución de los cables el cual engloba a las disposiciones consideradas en^{1,2,3} como casos particulares.

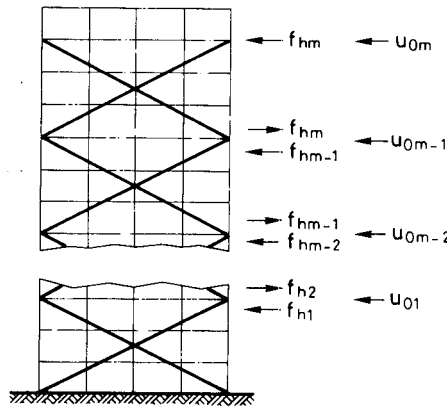


Figura 3. Colocación de los actuadores.

Las fuerzas de control $u_{0i}(t)$ son las resultantes de las fuerzas horizontales f_{hi} proporcionadas por los cables. La relación entre ambas puede ser expresada por

$$u_0(t) = H f_h(t) \quad (3)$$

donde

$$u_0 = \begin{pmatrix} u_{01} \\ \vdots \\ u_{0m} \end{pmatrix} \quad f_h = \begin{pmatrix} f_{h1} \\ \vdots \\ f_{hm} \end{pmatrix} \quad H = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ & & & \dots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

A partir de (2) y (3) se obtiene la expresión que representa el comportamiento de los mecanismos actuadores

$$u_0(t) = K_a u_1(t - \tau_r) \quad (5)$$

donde

$$K_a = H C_a \quad (6)$$

Puesto que la matriz K_a no es singular, la expresión (5) muestra que, con el esquema de colocación de los cables propuesto en la Figura 3, es posible generar la señal de control u_1 que produce un valor arbitrario de las fuerzas de control u_0 .

SIMULACION DE EXPERIENCIAS DE CONTROL

Se llevan a cabo experiencias numéricas de simulación del comportamiento dinámico controlado de los edificios B_1 y B_2 en presencia de excitaciones dinámicas provocadas por seismos o por el viento. Las instalaciones de control corresponden a sistemas de cables activos de los tipos descritos en las Figuras 2 y 3, variando el número m de fuerzas horizontales de control entre 1 (una fuerza actuando en la planta superior del edificio) y 23 (una fuerza en cada planta).

Las operaciones involucradas en el lazo cerrado de control se simulan en un ordenador digital mediante un modelo en tiempo discreto en el que se tienen en cuenta todos los elementos que intervienen en el proceso mostrado en la Figura 1⁶. En los párrafos siguientes se describen las ecuaciones que rigen el comportamiento de cada elemento y su ensamblaje en una expresión única que simula el lazo completo.

El movimiento horizontal de los edificios se rige por la ecuación

$$M \ddot{d}_0 + C \dot{d}_0 + K d_0 = f_{c_0}(t) + f_0(t) \quad (7)$$

siendo M , C y K las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, d_0 un vector que contiene los desplazamientos horizontales de las plantas y f_0 y f_{c_0} vectores que incluyen en formato adecuado las fuerzas de excitación y de control, respectivamente. Si el número de mecanismos actuadores es m , el vector 23×1 f_{c_0} que interviene en la expresión (7) se relaciona con el vector $m \times 1$ u_0 que contiene las m fuerzas de control ejercidas por los actuadores mediante la expresión

$$f_{c_0}(t) = L u_0(t) \quad (8)$$

donde L es una matriz cuyos elementos son 1 o 0 dependiendo de la presencia o ausencia de mecanismos actuadores en las plantas.

Sustituyendo (8) en (7) esta ecuación puede formularse en espacio de estado

$$\dot{x}_0 = F x_0 + G u_0 + v_0 \quad (9)$$

siendo

$$x_0 = \begin{pmatrix} d_0 \\ \dot{d}_0 \end{pmatrix} \quad v_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1} f_0 \end{pmatrix} \quad (9a)$$

$$F = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -M^{-1} K & -M^{-1} C \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1} L \end{pmatrix} \quad (9b)$$

La expresión (9) simula en tiempo continuo el comportamiento dinámico de los edificios sometidos a una excitación en presencia de unas fuerzas de control activo.

Los sensores miden continuamente la respuesta de la estructura contenida en los desplazamientos y velocidades de las plantas. El vector de estado $\mathbf{x}_0$ se transforma en 23 señales eléctricas continuas contenidas en el vector $\mathbf{x}_1$, estando ambos vectores relacionados por la expresión

$$\mathbf{x}_1(t) = \mathbf{C}_s \mathbf{x}_0(t) \quad (10)$$

donde $\mathbf{C}_s$ es una matriz 46×46 que incluye factores de calibración propios de los sensores. Ordinariamente la matriz $\mathbf{C}_s$ es diagonal y los elementos pertenecientes a la diagonal principal son distintos de cero de forma que dicha matriz es inversible.

El convertidor analógico-digital A/D muestrea en cada instante discreto el valor de la respuesta contenida en el vector $\mathbf{x}_1$. Llamando $\mathbf{x}$ al vector que incluye los correspondientes valores muestreados, la relación entre ambos vectores para un instante t de muestreo viene dada por

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}_1(t) \quad t = kT \quad (11)$$

siendo k un número entero y T el período de muestreo que gobierna la evolución del lazo de control.

El convertidor digital-analógico incorpora un dispositivo de retención para generar la señal continua $\mathbf{u}_1$ a partir de la señal discreta $\mathbf{u}$. Considerando un dispositivo de orden 0, ambos vectores se relacionan mediante

$$\mathbf{u}_1(t) = \mathbf{u}(k) \quad kT \leq t < (k+1)T \quad (12)$$

Premultiplicando la expresión (9) por la matriz $\mathbf{C}_s$ y teniendo en cuenta (10) y (5) se obtiene

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{F}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{G}_1 \mathbf{u}_1(t - \tau_r) + \mathbf{C}_s \mathbf{v}_0(t) \quad (13)$$

siendo

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{C}_s \mathbf{F} \mathbf{C}_s^{-1} \quad \mathbf{G}_1 = \mathbf{C}_s \mathbf{G} \mathbf{K}_a \quad (13a)$$

La ecuación (13) representa el comportamiento del lazo cerrado de control de la Figura 1 y puede ser resuelta en tiempo discreto mediante el procedimiento descrito en [5,9,10]. Teniendo en cuenta las fórmulas de interpolación dadas en (11) y (12) resulta

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{B} \mathbf{u}(k - n_r) + \mathbf{P}_1 \mathbf{v}(k+1) + \mathbf{P}_2 [\mathbf{v}(k+1) - \mathbf{v}(k)] \quad (14)$$

donde

$$\mathbf{A} = \exp(T \mathbf{C}_s \mathbf{F} \mathbf{C}_s^{-1}) = \exp(T \mathbf{F}_1) \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{P}_1 \mathbf{G} \quad (16)$$

$$P_1 = \int_0^T \exp(s F_1) C_s ds = F_1^{-1} (A - I) C_s \quad (17)$$

$$P_2 = -\frac{1}{T} \int_0^T \exp(s F_1) C_s s ds = F_1^{-1} \left(\frac{1}{T} P_1 - A \right) C_s \quad (18)$$

El significado y el valor de n_r vienen dados en (19a).

La bondad del modelo (14) para representar fielmente el comportamiento dinámico del sistema controlado ha sido verificada a través de comparaciones con resultados experimentales⁸.

Los resultados de cada ensayo se resumen en los valores de 6 índices denominados, respectivamente, $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$. El índice Γ_1 representa el valor medio cuadrático (r.m.s.) de los desplazamientos horizontales relativos máximos entre plantas adyacentes. Los índices Γ_2 y Γ_3 corresponden, respectivamente, al valor r.m.s. de las máximas fuerzas de control u_{0i} y al valor r.m.s. de las máximas fuerzas horizontales f_{hi} en los cables. El índice Γ_4 representa el valor r.m.s. de las máximas fuerzas verticales f_{vi} introducidas en la estructura por los cables activos. Los índices Γ_5 y Γ_6 son, respectivamente, los valores r.m.s. de los desplazamientos y velocidades máximos de los émbolos de los cilindros hidráulicos. El conocimiento de los valores de $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$ proporciona una información exhaustiva sobre los resultados de cada experiencia de control: Γ_1 mide la magnitud de la respuesta, Γ_2 es aproximadamente proporcional a la energía invertida en el proceso de control y $\Gamma_3, \dots, \Gamma_6$ representan las sollicitaciones sobre los elementos mecánicos del sistema de control. A partir de los valores de los 6 índices $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$ es posible conocer con un grado muy elevado de fiabilidad la realizabilidad práctica de los sistemas de control por cables activos propuestos en el presente trabajo.

ALGORITMO DE CONTROL

Para generar la secuencia de señales de control en tiempo discreto u , se considera un algoritmo basado en una estrategia de control predictivo⁷. Considerando un comportamiento elástico y lineal de la estructura y teniendo en cuenta el retardo τ_r introducido en el lazo de control por el tiempo de respuesta de los actuadores, la expresión que relaciona la señal de control u con la respuesta de la estructura x es^{5,8}:

$$u(k) = -D x(k) + \sum_{i=1}^{n_r} M_i u(k-i) \quad (19)$$

donde k representa el instante de muestreo, n_r es la duración del tiempo de retardo τ_r expresada en períodos de muestreo T

$$\tau_r = n_r T \quad (19a)$$

y D y M_i ($i = 1, \dots, n_r$) son matrices constantes.

Las expresiones (14) y (19) simulan numéricamente el lazo cerrado descrito en la Figura 1 para el caso en que los mecanismos actuadores son cables activos y el algoritmo de control es predictivo.

CONTROL DE LA RESPUESTA SISMICA

La efectividad sísmica de los cables activos se analiza sometiendo a los edificios B_1 y B_2 a excitaciones sinusoidales transmitidas por el terreno de cimentación. La amplitud de las sinusoides es de $0.1 g$ y su frecuencia toma distintos valores en la banda 1–31 rad/s. Los valores de los índices $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$ se representan en función de la frecuencia de la excitación, constituyendo los diagramas resultantes espectros de la respuesta sísmica controlada.

En la Figura 4 se presenta una comparación entre los valores del índice Γ_1 para los edificios B_1 y B_2 en el caso sin control.

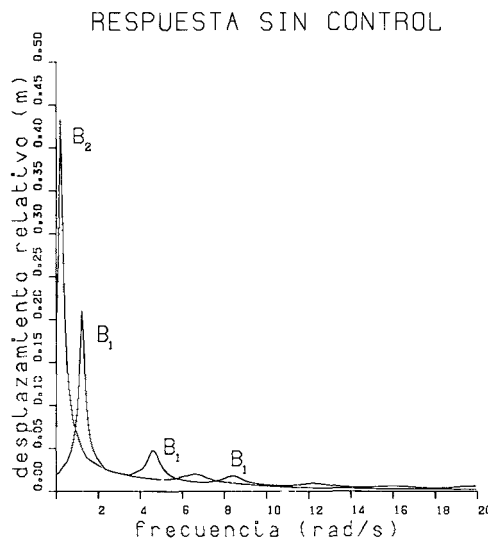


Figura 4. Valores de Γ_1 en la respuesta sísmica en ausencia de control.

La Figura 4 muestra que el edificio B_1 es más rígido que el B_2 y que en la respuesta dinámica del edificio B_2 únicamente el primer modo propio tiene una influencia significativa mientras que en el del edificio B_1 la contribución de los tres primeros modos es importante. Ello confirma las consideraciones sobre el comportamiento dinámico de ambos edificios expuestas en la introducción.

Las Figuras 5, 6 y 7 muestran, respectivamente, los valores de los índices Γ_1 , Γ_3 y Γ_5 en los edificios B_1 y B_2 para distintos valores del número m de fuerzas de control y un valor nulo del número de retardos n_r . La frecuencia de la excitación está comprendida entre 1 y 21 rad/s.

La comparación entre las Figuras 4 y 5 muestra que, en ausencia de tiempo de retardo, la acción de control producida por los cables activos genera un importante incremento de la rigidez y del amortiguamiento de la estructura que se traducen en un aumento de las frecuencias naturales y una reducción de la respuesta. Estos efectos son más importantes para valores elevados del número m de fuerzas de control y, cuando se consideran 23 fuerzas de control, la respuesta disminuye en un porcentaje del 0.1 % y las frecuencias naturales se desplazan fuera del rango de frecuencias considerado. La

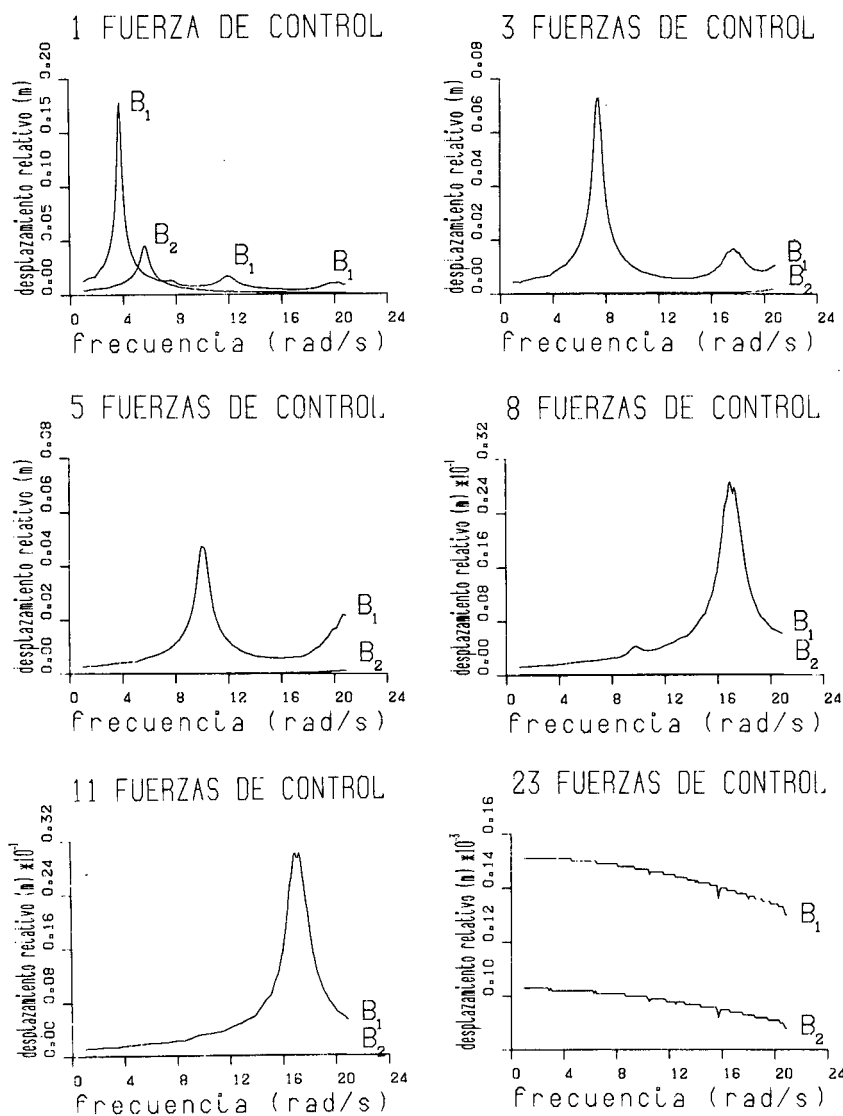


Figura 5. Valores de Γ_1 en la respuesta sísmica en presencia de control.

reducción de la respuesta y el aumento de las frecuencias naturales son más importantes en el edificio B_2 que en el edificio B_1 aunque la diferencia entre ambos casos es menor cuando se consideran 23 fuerzas de control.

La Figura 6 muestra que, cuando no se considera retardo en el lazo cerrado de control, la reducción de la respuesta de la estructura se obtiene con un coste razonable de energía y con unas fuerzas en los cables que pueden ser resistidas por éstos sin necesidad de un dimensionamiento desmesurado. La Figura 7 muestra que el desplazamiento máximo del émbolo no excede nunca de 0.40 m, lo cual constituye un valor suficientemente aceptable. A partir de curvas similares a las contenidas en las Figuras 5, 6 y 7 y correspondientes a los índices Γ_2 , Γ_4 y Γ_6 se llega a conclusiones parecidas.

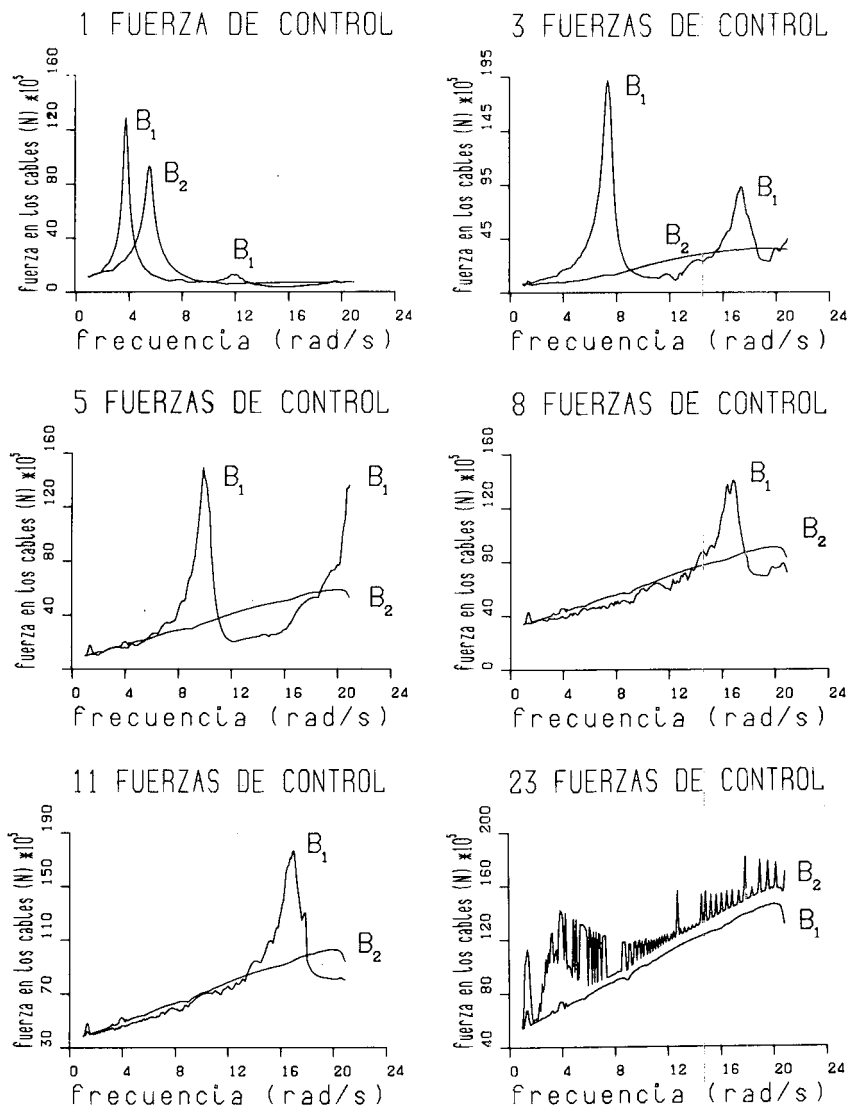


Figura 6. Valores de Γ_3 en la respuesta sísmica en presencia de control.

En la Figura 8 se muestra la influencia del número de retardos n_r en la calidad del control. En dicha Figura se representan los valores de los índices Γ_1 , Γ_3 , Γ_5 y Γ_6 para el edificio B_2 cuando n_r toma los valores $0, \dots, 4$ y el número m de fuerzas de control es igual a 3. La frecuencia de la excitación sinusoidal pertenece al rango 1–31 rad/s.

El análisis de la Figura 8 muestra que, al aumentar el tiempo de retardo, la respuesta de la estructura (representada por el índice Γ_1), las fuerzas en los cables (representadas por el índice Γ_3) y los desplazamientos y velocidades de los cilindros hidráulicos (representados por los índices Γ_5 y Γ_6) crecen y ello indica que el rendimiento del control se va deteriorando aunque mantiene en todo caso un nivel de eficiencia suficiente.

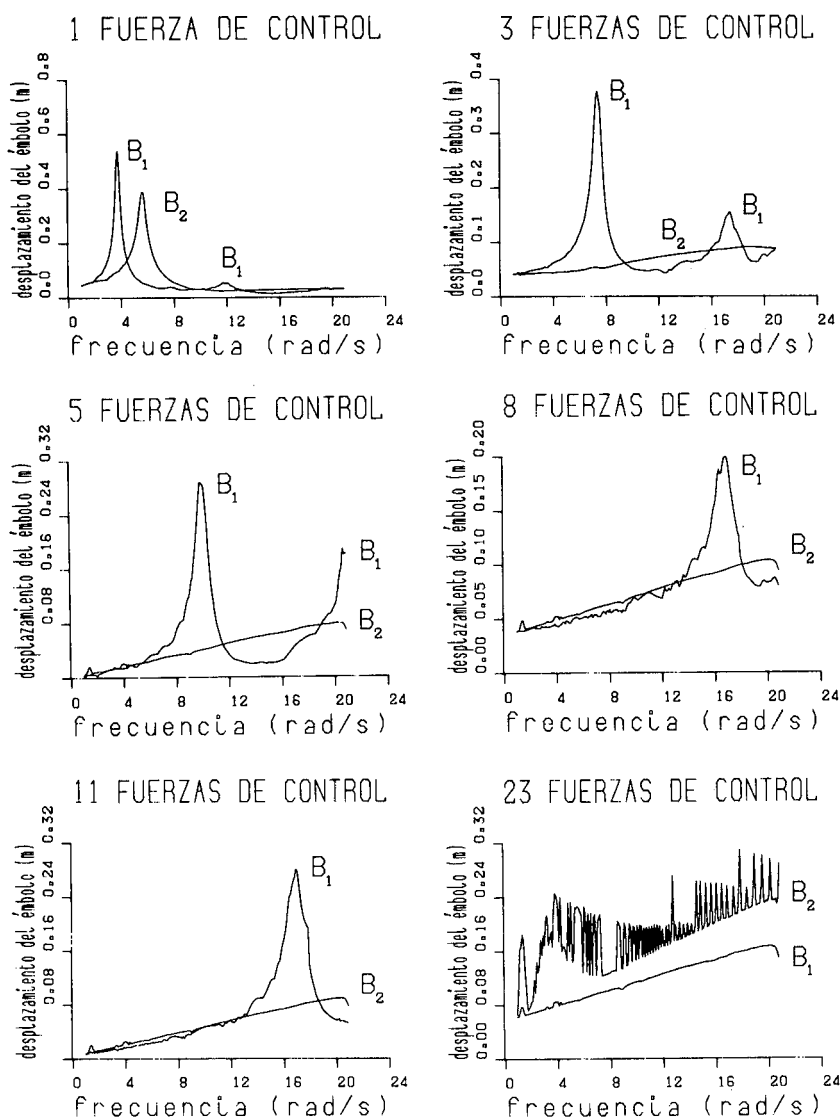


Figura 7. Valores de Γ_5 en la respuesta sísmica en presencia de control.

CONTROL DE LA RESPUESTA AL VIENTO

Se han realizado experiencias paralelas a las descritas en el apartado anterior para excitación sísmica, considerando aquí la acción dinámica del viento. La representación de los valores de los índices $\Gamma_1, \dots, \Gamma_6$ en función de la frecuencia predominante en el viento constituyen espectros de la respuesta eólica controlada.

El análisis de los resultados obtenidos permite extraer conclusiones similares a las formuladas en el apartado anterior para el caso sísmico.

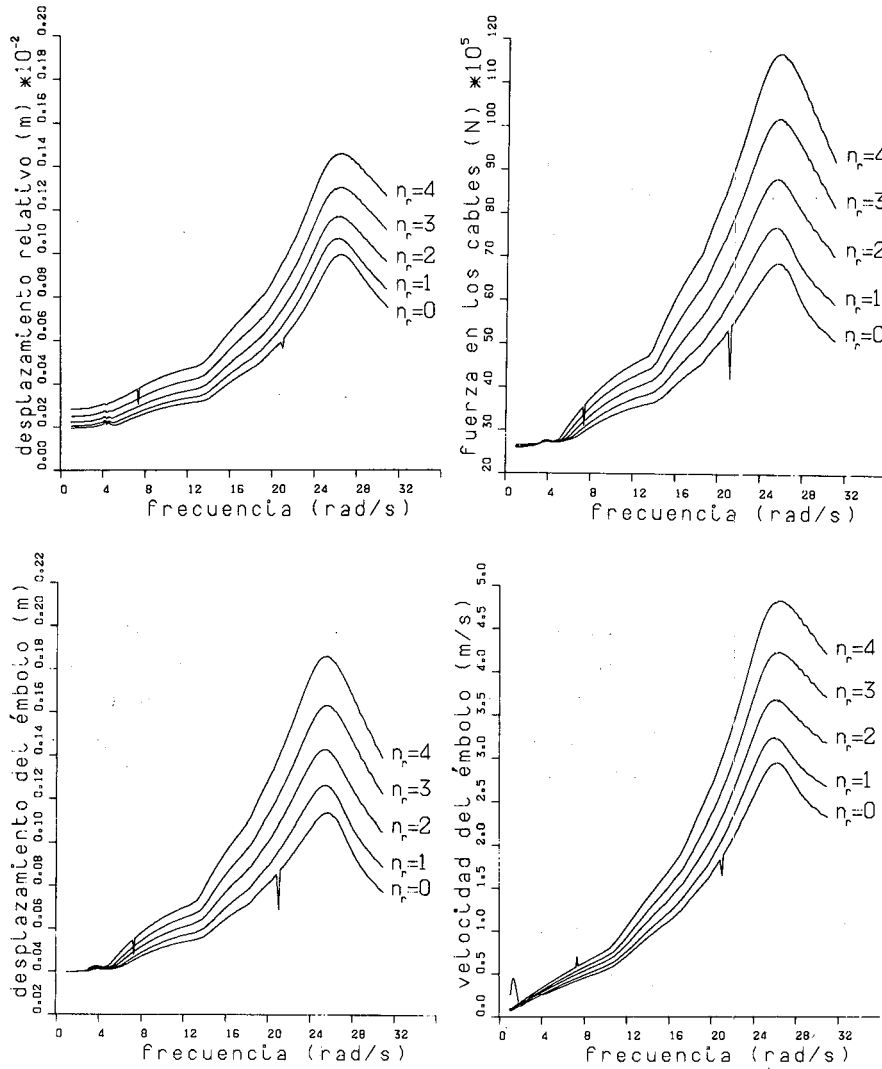


Figura 8. Valores de Γ_1 , Γ_3 , Γ_5 y Γ_6 en la respuesta sísmica del edificio B_2 en presencia de retardos. 3 fuerzas de control.

EXPERIENCIAS EN CONDICIONES CRITICAS

Se define la robustez de un sistema de control como la propiedad de mantener su rendimiento frente a fluctuaciones de las características de los elementos que lo componen. Con el fin de analizar la robustez del sistema de control de estructuras de edificación propuesto en el presente trabajo se simulan numéricamente experiencias de control bajo situaciones que superan las capacidades de respuesta de los cables activos, diciéndose en dicho caso que éstos trabajan en condiciones de saturación. Los mecanismos actuadores por cables activos descritos en la Figura 2 tienen limitado su rendimiento por tres conceptos independientes: máxima fuerza horizontal f_{hLIM} que pueden ejercer sobre la estructura, máximo desplazamiento z_{LIM} del émbolo del cilindro

hidráulico y máxima velocidad $\dot{z}_{LIM}$ del mismo. En las experiencias descritas en el presente apartado se considera el edificio B_1 controlado mediante un número m de mecanismos actuadores igual a 11 y sometido a la acción del terremoto de El Centro (California 1940). El número n_r de retardos introducidos en el lazo de control por el tiempo de respuesta de los cables activos se considera nulo.

En ausencia de acción de control el índice Γ_1 toma el siguiente valor:

$$\Gamma_1 = 0.03068 \text{ m} \quad (20)$$

En una primera experiencia con control se obtienen, sin considerar limitaciones a la evolución de los cables activos, los valores máximos de las fuerzas horizontales f_{h_i} ejercidas por los cables y de los desplazamientos z_i y velocidades $\dot{z}_i$ de los émbolos de los cilindros hidráulicos:

$$f_{hMAX} = 30\,871\,000. \text{ N} \quad z_{MAX} = 0.08496 \text{ m} \quad \dot{z}_{MAX} = 1.31777 \text{ m/s} \quad (21)$$

En las experiencias que se describen a continuación se limitan superiormente f_{hLIM} , z_{LIM} y $\dot{z}_{LIM}$ por valores inferiores a los mostrados en (21). En dicho caso los mecanismos actuadores tienen restringida su evolución y trabajan en condiciones de saturación.

En la Tabla I se describen 4 ensayos numéricos en los que la máxima fuerza horizontal f_{hLIM} que son capaces de ejercer los cables toma valores inferiores al mostrado en (21) para f_{hMAX} .

RESPUESTA DINAMICA						
EN CONDICIONES DE SATURACION DE LOS ACTUADORES						
Acelerograma: EL CENTRO 11 fuerzas de control Edificio B_1						
$f_{hLIM}(N)$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
28 10^6	0.00960	2049728.	14342408.	30615160.	0.04613	0.77425
24 10^6	0.00920	2132276.	13174168.	29268788.	0.04449	0.82679
20 10^6	0.01196	2472752.	11589764.	26884056.	0.04236	0.80358
16 10^6	0.01632	3056900.	9710204.	23441256.	0.03878	0.71033

Tabla I.

El análisis de los datos contenidos en la Tabla I muestra que, a pesar de las restricciones impuestas a los cables activos, se obtiene una apreciable reducción de la respuesta (representada por el índice Γ_1) con respecto a la que se tiene en ausencia de control en (20). Los valores de los índices $\Gamma_2, \dots, \Gamma_6$ muestran que dicha reducción se alcanza con un gasto razonable de energía y con unas solicitaciones sobre los mecanismos actuadores que pueden ser resistidos por éstos.

En las Tablas 2 y 3 se muestran los resultados de distintas experiencias numéricas similares a las presentadas en la Tabla 1. En la Tabla 2 se limita el recorrido libre de

los émbolos de los cilindros hidráulicos a valores inferiores al valor de z_{MAX} dado en (20) y en la Tabla 3 se restringe la velocidad de los mismos por debajo del valor de $\dot{z}_{MAX}$ dado en (20).

RESPUESTA DINAMICA						
EN CONDICIONES DE SATURACION DE LOS ACTUADORES						
Acelerograma: EL CENTRO 11 fuerzas de control Edificio B_1						
$z_{LIM}(m)$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
0.08	0.00992	2026216.	14859192.	30962472.	0.04648	0.76491
0.07	0.01140	2292548.	14603836.	29999076.	0.04459	0.76147
0.06	0.01336	2491888.	13389360.	27442584.	0.04060	0.82275
0.05	0.02644	2482488.	11390660.	23256200.	0.03447	0.82157

Tabla II.

RESPUESTA DINAMICA						
EN CONDICIONES DE SATURACION DE LOS ACTUADORES						
Acelerograma: EL CENTRO 11 fuerzas de control Edificio B_1						
$\dot{z}_{LIM}(m/s)$	$\Gamma_1(m)$	$\Gamma_2(N)$	$\Gamma_3(N)$	$\Gamma_4(N)$	$\Gamma_5(m)$	$\Gamma_6(m/s)$
1.30	0.00956	2027972.	14869120.	31060052.	0.04686	0.76762
1.20	0.01000	2071292.	14869120.	31060052.	0.04686	0.75086
1.10	0.01176	2296884.	14869120.	31060052.	0.04686	0.72070
1.00	0.01340	2320892.	14869120.	31060052.	0.04688	0.66790
0.90	0.01096	2732700.	15680408.	31085268.	0.04844	0.60583
0.80	0.01460	3544172.	15943972.	33326236.	0.04991	0.54181
0.70	0.02544	4142412.	18218108.	35668712.	0.05466	0.47882

Tabla III.

Los datos contenidos en las Tablas 2 y 3 muestran que, aún restringiendo fuertemente la evolución de los émbolos de los cilindros hidráulicos, puede conseguirse una apreciable reducción de la respuesta dinámica del edificio B_1 sin que ninguno de los valores de $\Gamma_2, \dots, \Gamma_6$ indique que ello se obtenga con un consumo desmesurado de energía ni con unas solicitudes excesivas sobre el sistema de control. Realizando experiencias semejantes con excitación del viento y/o sobre el edificio B_2 se obtienen resultados similares.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados mostrados en el presente trabajo y de resultados de otras experiencias numéricas similares pueden formularse las siguientes conclusiones generales acerca de las características del control de los edificios B_1 y B_2 mediante cables activos:

- La acción de control produce en general una importante reducción de la respuesta de la estructura con un dimensionamiento razonable de los cables y del resto de los elementos del sistema de control.
- En el edificio B_1 varios modos propios influyen significativamente en su respuesta mientras que en el edificio B_2 el primer modo es casi el único que tiene una influencia apreciable. Consecuentemente, es posible controlar las vibraciones horizontales del edificio B_2 con un menor número de cables. Se muestra que con una única fuerza de control actuando en la planta superior del edificio B_2 puede generarse una acción de control eficaz frente a excitaciones sísmicas o del viento.
- La acción de control es robusta frente a limitaciones del rendimiento de los actuadores y frente al retardo introducido en el lazo cerrado de control por el tiempo de respuesta de los cables activos.

Algunas de las conclusiones anteriores respecto de los edificios B_1 y B_2 pueden ser generalizadas para un conjunto más amplio de estructuras de edificación en el siguiente sentido: si el comportamiento dinámico horizontal es similar al de una estructura aporticada (como en el edificio B_1), se requiere un número considerable de fuerzas de control (y consecuentemente de cables activos) para reducir la respuesta. Sin embargo, si el comportamiento es similar al de una viga (como en el edificio B_2), se puede lograr una importante reducción de la respuesta con un menor número de cables.

REFERENCIAS

1. J.N. Yang y B. Samali, "Control of tall buildings in along-wind motion", *Journal Structural Engineering Division, ASCE*, Vol. 109 (EM1), pp. 50-68, (1983).
2. B. Samali, J.N. Yang y S.C. Liu, "Active control of seismic-excited buildings", *Journal Structural Engineering Division, ASCE*, Vol. 111 (10), pp. 2165-2180, (1985).
3. H.H.E. Leipholtz y M. Abdel-Rohman, "Control of structures", *Structural Control*, H.H.E. Leipholtz Editor, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, (1985).
4. L.L. Chung, A.M. Reinhorn y T.T. Soong, "Experiments on active control of seismic structures", *Journal Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 114 (2), pp. 241-256, (1988).
5. F. López Almansa, "Contribución al desarrollo de sistemas de control de estructuras de edificación mediante cables activos", *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Cataluña, (1988).
6. F. López Almansa, J. Rodellar y A.H. Barbat, "A simulation scheme for numerical analysis of active control systems for tall buildings", *Proc. de NUMETA 87 Conference*, Martinus Nijhoff Publishers, U.K, Dordrecht, The Netherlands, Vol. 2, T29, Swansea, Wales, (1987).

7. J. Rodellar, A.H. Barbat y J.M. Martín Sánchez, "Predictive control of structures", *Journal Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. **113** (6), pp. 797-812, (1987).
8. J. Rodellar, L.L. Chung, T.T. Soong y A.M. Reinhorn, "Experimental digital predictive control of structures", *Vibration Control and Active Vibration Suppression, ASCE*, pp. 115-120, (1987).
9. A.H. Barbat, J. Rodellar y F. López Almansa, "Cálculo de la respuesta dinámica de estructuras mediante un procedimiento de estado", *Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. **3**, no. 3, pp. 243-261, (1987).
10. F. López Almansa, A.H. Barbat y J. Rodellar, "SSP algorithm for linear and nonlinear dynamic response simulation", *Internacional Journal for Numerical Methods in Engineering*, (pendiente de publicación), (1988).