

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 5

CONTROL DIGITAL DE EDIFICIOS MEDIANTE CABLES ACTIVOS

En el contexto del lazo de control digital activo de estructuras descrito en la figura 1.11 se han considerado distintos mecanismos actuadores capaces de interpretar la señal analógica de control u_1 y ejercer sobre la estructura las fuerzas de control u_0 .

En el presente capítulo se describe un esquema general de instalación de cables activos en estructuras de edificación para formar sistemas de control.

En el apartado 5.1 se describen distintos mecanismos actuadores formados por cables activos y en el apartado 5.2 se analizan las fuerzas que dichos mecanismos transmiten a la estructura.

En el apartado 5.3 se muestra un esquema de instalación para controlar los desplazamientos horizontales de un edificio formado por varios mecanismos actuadores por cables activos y se establece la relación entre la señal de control u_1 y las fuerzas de control u_0 .

En el apartado 5.4 se muestra un esquema de las máximas prestaciones que pueden suministrar los cables activos según sus características.

En el apartado 5.5 se relacionan las conclusiones mas relevantes del presente capítulo.

INDICE

5.1 Mecanismos actuadores por cables activos. 5.3

5.2 Fuerzas ejercidas por los cables. 5.5

5.3 Sistemas de control de edificios mediante cables activos. 5.13

5.4 Prestaciones máximas de los cables activos. 5.19

5.5 Conclusiones. 5.20

Referencias. 5.21

5.1 MECANISMOS ACTUADORES POR CABLES ACTIVOS.

Se describen en el presente apartado los elementos modulares básicos que constituyen los sistemas de cables activos para control de estructuras [1]. Dichos sistemas están formados habitualmente por la agrupación de varios actuadores similares a los representados en las figuras 5.1a y 5.1b, los cuales son útiles para controlar de forma activa los desplazamientos horizontales de una estructura de edificación.

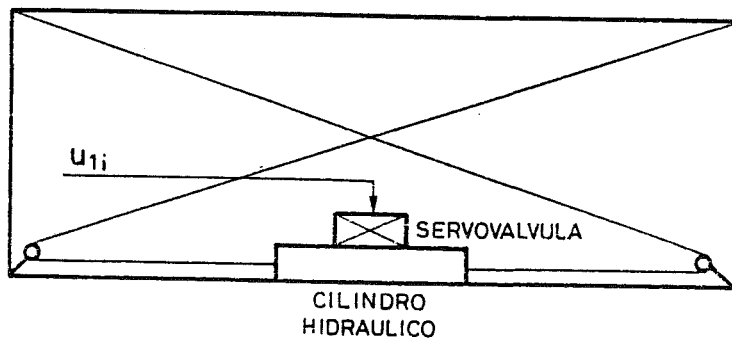


Figura 5.1a Arriostramiento mediante cables activos.

En la figura 5.1a se muestra un mecanismo actuador constituido por dos cables de atirantamiento dispuestos en forma de aspa sobre un marco rectangular formado por elementos estructurales rígidos. En una estructura de edificación los elementos verticales del marco corresponden a pilares y los horizontales son tramos de forjados.

Los cables representados en la figura 5.1a se anclan rígidamente por un extremo a los ángulos superiores del marco estructural, deslizan sobre dos poleas fijadas a las esquinas inferiores de dicho marco y se anclan por sus extremos opuestos a dos vástagos solidarios a un único émbolo perteneciente a un cilindro hidráulico de doble efecto cuyo movimiento se gobierna mediante una servoválvula alimentada hidráulicamente por un circuito a presión. Dicha servoválvula recibe la señal analógica de control u_{1i} y la interpreta para posicionar convenientemente el pistón del cilindro hidráulico y controlar

el valor de las fuerzas ejercidas por los cables sobre la estructura. Los cables se pretensan inicialmente para evitar que en algún momento su tensión se anule.

Las fuerzas transmitidas por los cables activos a la estructura dependen del desplazamiento horizontal relativo entre las plantas a las que se fijan los cables, de la posición que ocupa el émbolo del cilindro hidráulico y de la fuerza inicial de pretensado de los cables. Las componentes horizontales de las fuerzas ejercidas por los cables sobre la estructura son útiles para la acción de control, pero las componentes verticales producen únicamente una sobrecompresión, generalmente indeseable, de los pilares adyacentes a los puntos de fijación de los cables. En consecuencia, es conveniente que los cables tengan la menor inclinación posible incrementando las dimensiones horizontales del marco rectangular representado en la figura 5.1a y disminuyendo sus dimensiones verticales. Ambas operaciones tienen limitaciones obvias: los puntos de anclaje de los cables no pueden separarse horizontalmente una longitud superior a la anchura del edificio y no pueden aproximarse en sentido vertical a una distancia inferior a la altura de una planta. Por otra parte, si se instalan en un edificio mecanismos actuadores formados por cables activos muy tendidos, es preciso colocar muchos actuadores como el representado en la figura 5.1a para cubrir toda la altura del edificio, lo cual encarece las instalaciones y limita el espacio útil del edificio. Por estas razones, puede ser útil proyectar mecanismos de arriostamiento mediante cables activos distintos al mostrado en la figura 5.1a. En la figura 5.1b se presenta un esquema de colocación de cables activos que obvia las limitaciones anteriores.

En la figura 5.1b se muestra una solución alternativa a la que se representa en la figura 5.1a. Existen dos cables de atirantamiento anclados a los ángulos superiores del marco representado en la figura 5.1b, los cuales deslizan sobre poleas fijadas a las paredes verticales (de forma que éstas se disponen por parejas situadas a la misma altura en puntos coincidentes con forjados) y a los ángulos inferiores del mismo y son solidarios al émbolo de un cilindro hidráulico de doble efecto cuyo movimiento se gobierna mediante una servoválvula. Uno de los cables se representa mediante trazo continuo y el otro mediante trazo discontinuo.

La principal diferencia entre los actuadores descritos en las figuras 5.1a y 5.1b

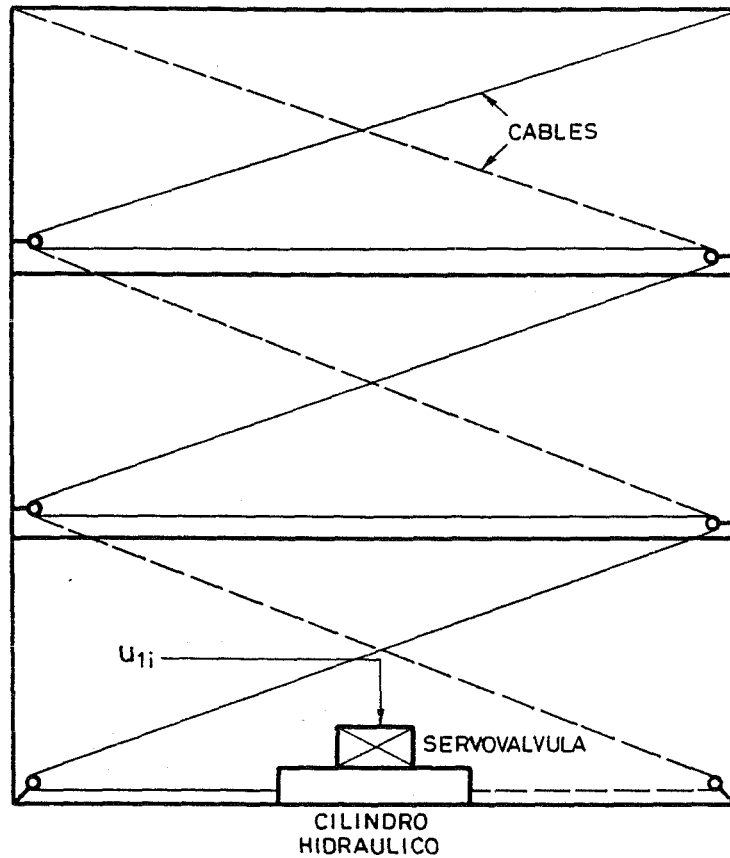


Figura 5.1b Arriostamiento mediante cables activos.

radica en que, en esta última, cada cable desliza sobre más de una polea, siendo variable el número de éstas aunque manteniéndose el esquema descrito en la figura 5.1b.

5.2 FUERZAS EJERCIDAS POR LOS CABLES.

En el presente apartado se determina el valor de las fuerzas que ejercen sobre la estructura los actuadores por cables activos descritos en las figuras 5.1 en función de las características geométricas y resistentes de los cables, de la tensión inicial con la que se pretensan, de la posición que ocupa el émbolo del cilindro hidráulico y del desplazamiento horizontal relativo entre las plantas a cuyos forjados se anclan.

En la figura 5.2a se representan las fuerzas ejercidas sobre la estructura por el actuador descrito en la figura 5.1a en un instante en que el émbolo del cilindro hidráulico ocupa la posición central inicial y no existe ningún desplazamiento horizontal relativo entre plantas. En dicho caso actúa únicamente la fuerza de pretensado $f_{inicial}$.

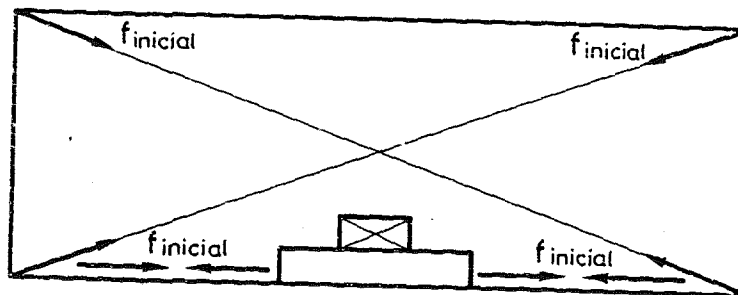


Figura 5.2a Fuerzas ejercidas por los cables en reposo.

En la figura 5.2b se representan las fuerzas ejercidas sobre la estructura por los cables mostrados en la figura 5.1b, en el mismo caso que el considerado en la figura 5.2a.

Cuando existe un desplazamiento horizontal relativo entre las plantas a cuyos forjados se fijan los cables y el pistón del cilindro hidráulico está separado de su posición inicial central, las fuerzas a que se encuentran sometidos ambos cables que forman parte de uno de los actuadores descritos en las figuras 5.1 ya no son iguales. En la figura 5.3a se muestran las fuerzas resultantes horizontales y verticales f_{h_i} y f_{v_i} que ejercen sobre

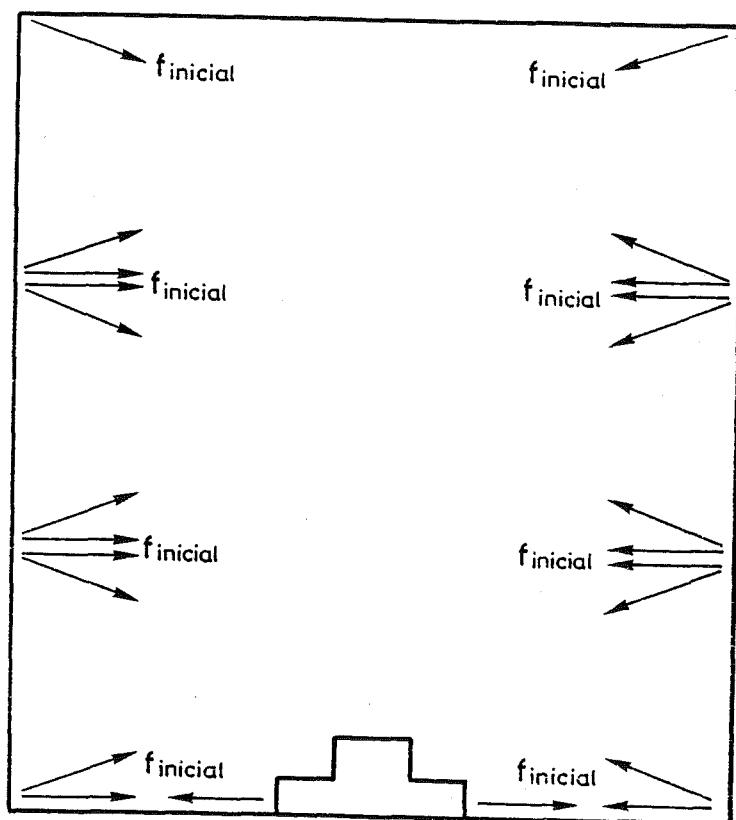


Figura 5.2b Fuerzas ejercidas por los cables en reposo.

la estructura los cables representados en la figura 5.1a. En el interior del marco se dibujan además las fuerzas f_{izq_i} y f_{der_i} que los cables ejercen directamente sobre dicho marco, mientras que las fuerzas ejercidas por los tramos horizontales de dichos cables no se muestran en la figura 5.3a porque son pares de fuerzas directamente opuestas que únicamente generan compresiones en los forjados.

Las magnitudes que intervienen en la figura 5.3a tienen los siguientes significados:

- y_i : desplazamiento horizontal relativo entre plantas
- z_i : desplazamiento del émbolo del cilindro hidráulico
- α_i : ángulo de inclinación de los cables
- f_{izqi} : fuerza en el cable anclado al extremo superior izquierdo
- f_{deri} : fuerza en el cable anclado al extremo superior derecho
- f_{hi} : fuerza resultante horizontal que actúa sobre el edificio
- f_{vi} : fuerza resultante vertical que actúa sobre el edificio

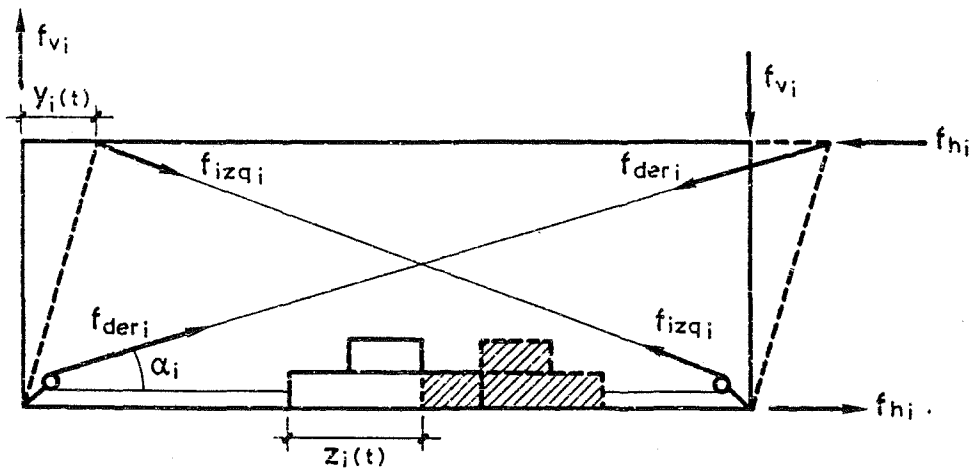


Figura 5.3a Fuerzas ejercidas por los cables.

Planteando las ecuaciones de equilibrio entre las fuerzas mostradas en la figura 5.3a se obtiene el siguiente resultado:

$$f_{hi} = (f_{deri} - f_{izqi}) \cos \alpha_i \quad (5.1a)$$

$$f_{v_i} = (f_{der_i} - f_{izq_i}) \sin \alpha_i \quad (5.1b)$$

Las componentes verticales f_{v_i} producen únicamente compresiones sobre los pilares y, si bien deben ser tenidas en cuenta en el dimensionamiento de los mismos, no son útiles para la acción de control porque no provocan desplazamientos horizontales importantes.

Las componentes horizontales f_{h_i} constituyen un par de fuerzas que produce desplazamientos horizontales relativos entre plantas y son útiles para generar una acción de control eficaz.

Para obtener el valor de las fuerzas f_{der_i} y f_{izq_i} en función de $f_{inicial}$, y_i y z_i se consideran las siguientes hipótesis:

- la deformación axil de los pilares y de los forjados es despreciable frente a la de los cables.
- no se tienen en cuenta los esfuerzos de segundo orden.
- la masa de los cables es nula.

Las ecuaciones de compatibilidad entre las deformaciones del marco y de los cables se formulan en las siguientes expresiones:

$$f_{der_i} = f_{inicial} + K_{t_i} [y_i(t) \cos \alpha_i + z_i(t)] \quad (5.2a)$$

$$f_{izq_i} = f_{inicial} - K_{t_i} [y_i(t) \cos \alpha_i + z_i(t)] \quad (5.2b)$$

donde

$$K_{t_i} = \frac{E A_i}{L_i} \quad (5.2c)$$

siendo:

E : módulo de elasticidad de los cables

A_i : sección de los cables

L_i : longitud total de cada cable

Las expresiones (5.1a), (5.2a) y (5.2b) permiten obtener el valor de la fuerza resultante horizontal f_{h_i} :

$$f_{h_i} = 2 K_{t_i} \cos \alpha_i [y_i(t) \cos \alpha_i + z_i(t)] \quad (5.3)$$

La expresión (5.3) muestra que el valor de la fuerza útil para la acción de control f_{h_i} no depende de la tensión inicial de pretensado de los cables sino únicamente de sus características geométricas y resistentes, de los desplazamientos horizontales del edificio y de la posición del émbolo del cilindro hidráulico.

En la figura 5.3b se representan las fuerzas resultantes horizontales f_{h_i} y verticales f_{v_i} ejercidas sobre la estructura del edificio por el mecanismo actuador mostrado en la figura 5.1b, cuando existen desplazamientos relativos horizontales entre plantas y el pistón del cilindro hidráulico está desplazado de su posición inicial central. De forma similar a la figura 5.3a, en el interior del marco se dibujan además las fuerzas f_{izq_i} y f_{der_i} que los cables ejercen directamente sobre la estructura, mientras que las fuerzas transmitidas por los diferentes tramos horizontales de dichos cables no se representan en la figura 5.3b porque son pares de fuerzas directamente opuestas que únicamente generan compresiones en los forjados. En la figura 5.3b se considera la misma notación que en la figura 5.3a.

Planteando las ecuaciones de equilibrio entre las fuerzas mostradas en la figura 5.3b se obtiene el siguiente resultado:

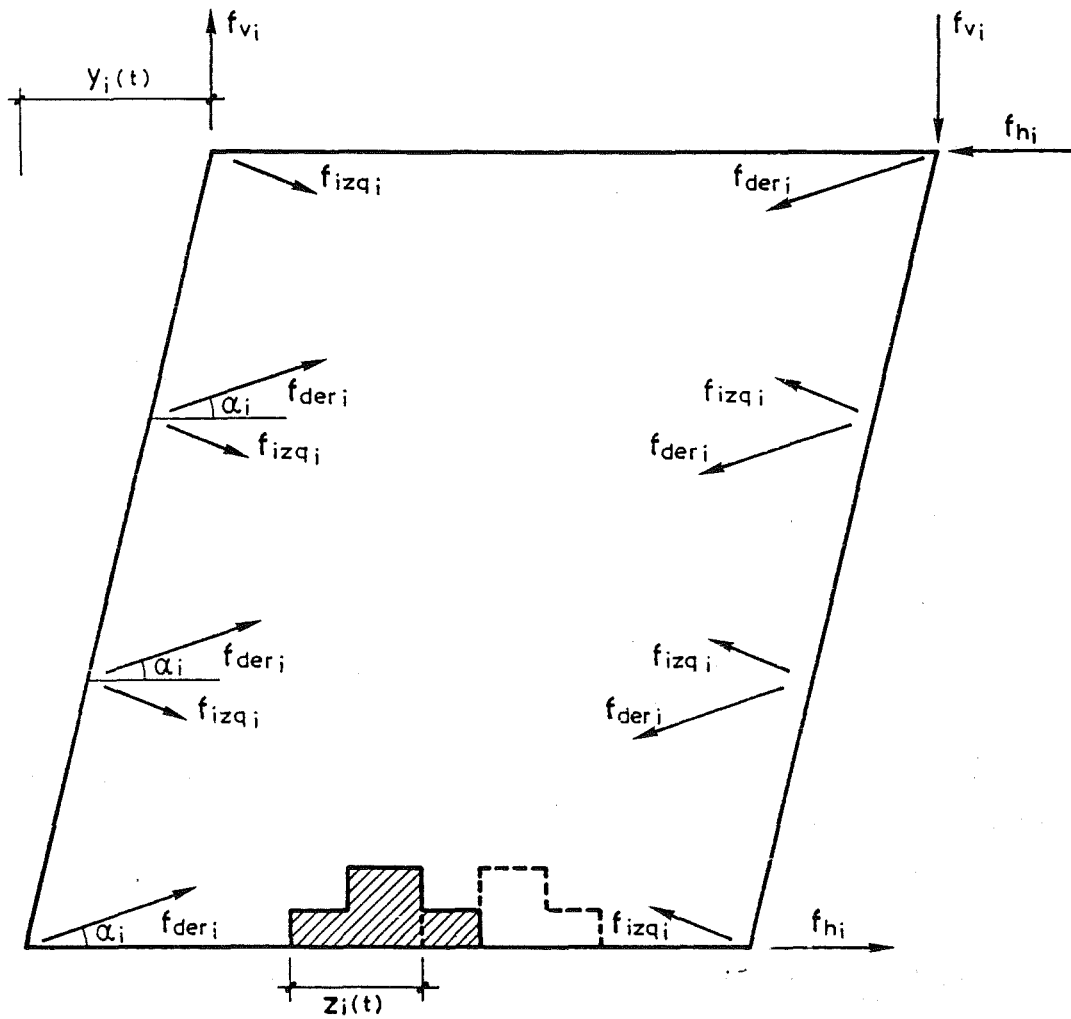


Figura 5.3b Fuerzas ejercidas por los cables.

$$f_{hi} = (f_{deri} - f_{izqi}) \cos \alpha_i \quad (5.4a)$$

$$f_{vi} = 3(f_{deri} - f_{izqi}) \sin \alpha_i \quad (5.4b)$$

Para obtener el valor de las fuerzas f_{deri} y f_{izqi} en función de $f_{inicial}$, y_i y z_i se

consideran las mismas hipótesis que en la deducción de las expresiones (5.2), resultando

$$f_{der_i} = f_{inicial} + K_{t_i} [y_i(t) \cos \alpha_i + z_i(t)] \quad (5.5a)$$

$$f_{izq_i} = f_{inicial} - K_{t_i} [y_i(t) \cos \alpha_i + z_i(t)] \quad (5.5b)$$

con los mismos significados que en las expresiones (5.2).

Las expresiones (5.4a) y (5.5) permiten obtener el valor de la fuerza resultante horizontal f_{h_i} :

$$f_{h_i} = 2 K_{t_i} \cos \alpha_i [y_i(t) \cos \alpha_i + z_i(t)] \quad (5.6)$$

La expresión (5.6) muestra que el valor de la fuerza útil para la acción de control f_{h_i} no depende de los desplazamientos horizontales relativos entre las plantas situadas entre las plantas extremas superior e inferior mostradas en la figura 5.3b, sino únicamente de los desplazamientos horizontales relativos entre dichas plantas extremas.

La comparación entre los resultados (5.3) y (5.6) muestra que los dos actuadores mostrados en las figuras 5.1 generan fuerzas resultantes horizontales que obedecen a expresiones similares.

5.3 SISTEMAS DE CONTROL DE EDIFICIOS MEDIANTE CABLES ACTIVOS.

Los mecanismos actuadores descritos en las figuras 5.1 pueden ser utilizados para construir un sistema de control activo [2] de los desplazamientos horizontales de un edificio. Dicho sistema debe ser capaz de ejercer sobre la estructura del edificio unas fuerzas horizontales cuyos valores son predeterminados en cada instante a partir de un algoritmo de control.

Para aplicar sobre la estructura del edificio en n_a puntos P_1, \dots, P_{n_a} , de la misma n_a fuerzas horizontales $u_{0_1}, \dots, u_{0_{n_a}}$, pueden disponerse n_a mecanismos actuadores por cables activos de acuerdo con la distribución representada en la figura 5.4.

En la figura 5.4 se muestra un sistema de n_a mecanismos actuadores (del tipo descrito en la figura 5.1a) dispuestos en el edificio de forma que no se superponen en sentido vertical y de forma que cada punto P_i en el que se desea ejercer una fuerza horizontal de control u_{0_i} coincide con un forjado al que se fijan los extremos superiores de los cables del mecanismo i y los extremos inferiores de los cables del mecanismo $i + 1$. Sobre la superficie superior de dicho forjado también se fija la carcasa del cilindro hidráulico perteneciente al mecanismo $i + 1$. El mecanismo actuador inferior representado en la figura 5.4 mediante el subíndice 1 es solidario por su parte inferior con la superficie del terreno.

En la figura 5.4 las magnitudes f_{h_i} y α_i tienen el mismo significado que en la figura 5.3a. Las fuerzas u_{0_i} son las fuerzas horizontales resultantes de f_{h_i} viniendo dada la relación entre ambos sistemas de fuerzas por

$$\begin{aligned}
 u_{0_1} &= f_{h_1} - f_{h_2} \\
 &\dots\dots \\
 u_{0_{n_a-1}} &= f_{h_{n_a-1}} - f_{h_{n_a}} \\
 u_{0_{n_a}} &= f_{h_{n_a}}
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

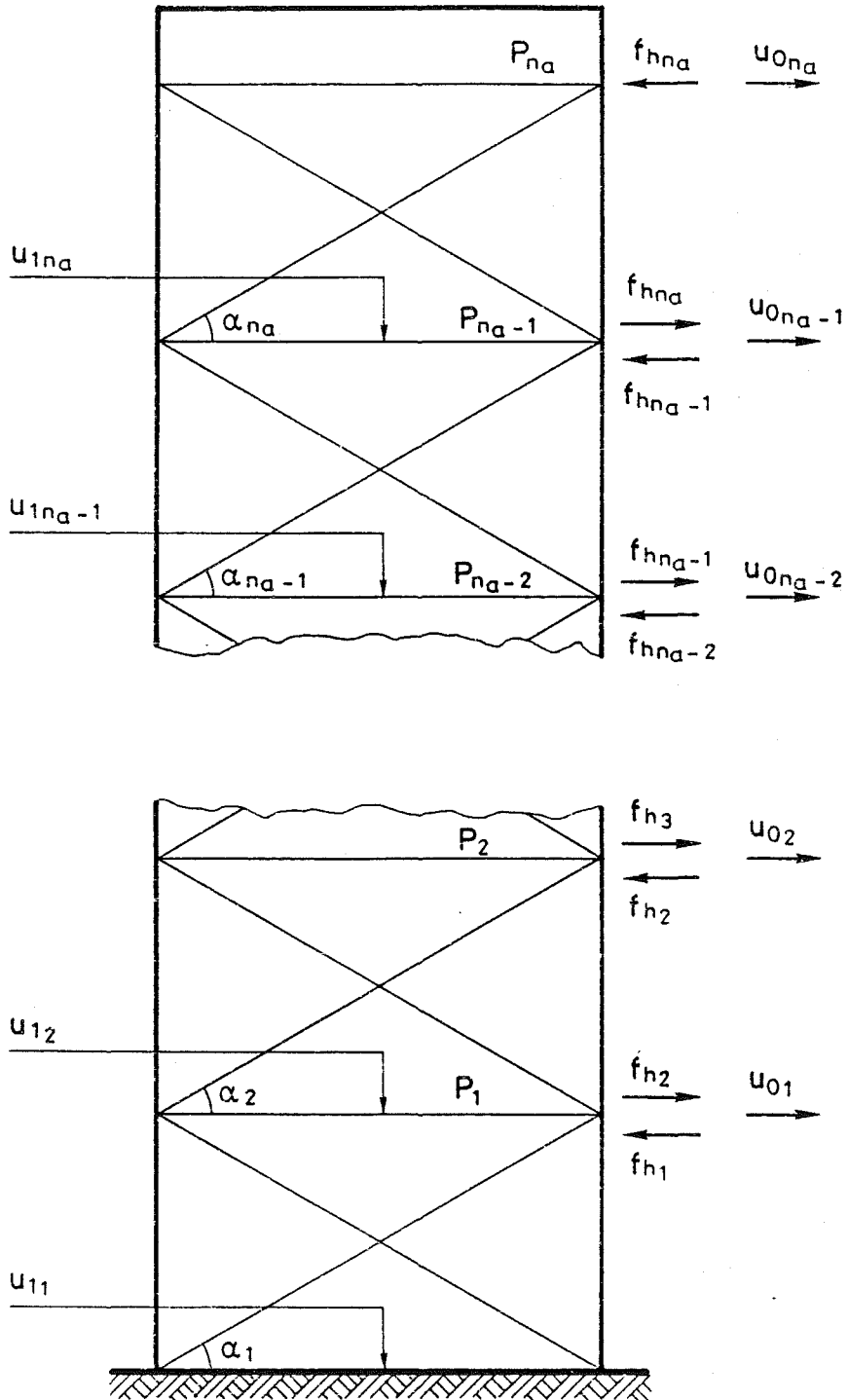


Figura 5.4 Sistema de control de un edificio por cables activos.

Las n_a expresiones escalares contenidas en (5.7) pueden ser escritas en forma matricial:

$$\mathbf{u}_0 = \mathbf{S} \mathbf{f}_h \quad (5.8)$$

siendo

$$\mathbf{u}_0 = \begin{pmatrix} u_{01} \\ \vdots \\ u_{0n_a} \end{pmatrix} \quad \mathbf{f}_h = \begin{pmatrix} f_{h1} \\ \vdots \\ f_{hn_a} \end{pmatrix} \quad (5.8a)$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \cdots & 0 & 0 \\ & & & \cdots & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.8b)$$

La inversibilidad de la matriz \mathbf{S} muestra que, dado un vector \mathbf{u}_0 de fuerzas que se desea ejercer sobre la estructura, es posible conocer a partir de (5.8) las fuerzas f_{hi} que debe generar cada actuador i de cables activos.

El sistema representado en la figura 5.4 está compuesto de mecanismos actuadores por cables activos del tipo descrito en la figura 5.1a aunque, si se utilizan sistemas del tipo descrito en la figura 5.1b las conclusiones formuladas en los párrafos anteriores conservan su validez y se obtienen unas expresiones idénticas a (5.7) y (5.8).

En el lazo digital de control descrito en la figura 1.11 se genera en cada instante de muestreo k una señal de control $\mathbf{u}(k)$ que se transforma en el convertidor D/A en una señal analógica $\mathbf{u}_1(t)$ cuyo valor se mantiene constante entre los instantes k y $k + 1$. Las instalaciones formadas por cables activos deben ser diseñadas para interpretar la señal eléctrica $\mathbf{u}_1(t)$ y mantener constante el valor de las fuerzas de control \mathbf{u}_0 mientras

no varíe el valor de la señal de control que reciben las servoválvulas. De acuerdo con la expresión (5.8), ello equivale a que el valor de las fuerzas horizontales f_{hi} ($i = 1, \dots, n_a$) ejercidas por cada pareja de cables activos se mantenga constante entre los instantes k y $k + 1$ y, consecuentemente, las servoválvulas deben ser implementadas para cumplir dicha finalidad.

En la figura 5.5 se muestra el funcionamiento de un conjunto servoválvula-cilindro hidráulico perteneciente en el esquema mostrado en la figura 5.4 a un actuador representado mediante el subíndice i .

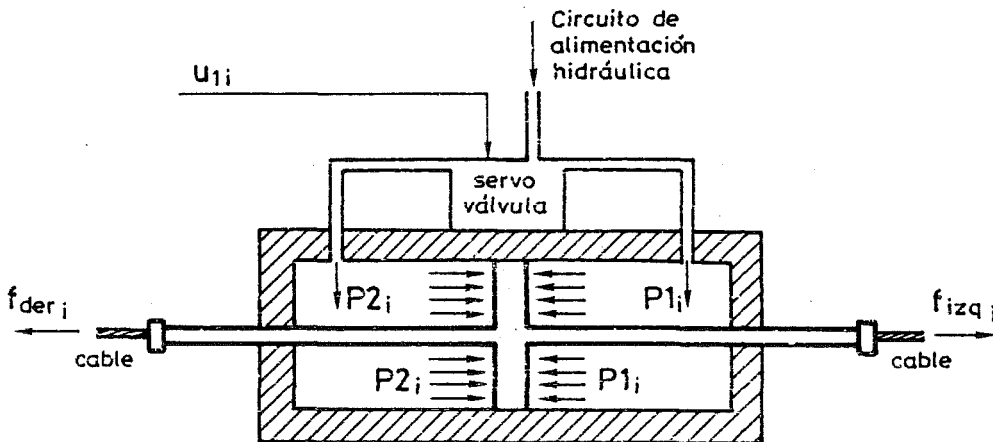


Figura 5.5 Servoválvula y cilindro hidráulico.

En la figura 5.5 P_{1i} y P_{2i} representan las presiones del fluido a ambos lados del émbolo y el resto de las magnitudes allí representadas se expresan de acuerdo con la notación considerada en las figuras 5.3.

La ecuación de equilibrio horizontal del pistón puede formularse, despreciando su masa, en la siguiente igualdad:

$$f_{der_i} - f_{izq_i} = (P_{2_i} - P_{1_i}) S_{e_i} \quad (5.9)$$

en donde S_{e_i} es la sección del émbolo i .

La servoválvula se implementa de forma que la diferencia de presión suministrada en un instante t es proporcional al valor de la señal analógica $u_{1_i}(t - \tau_{r_i})$ transmitida en el instante $t - \tau_{r_i}$, siendo τ_{r_i} el tiempo de respuesta. Dicha relación de proporcionalidad puede escribirse de la forma

$$(P_{2_i} - P_{1_i})(t) = K_{S_i} u_{1_i}(t - \tau_{r_i}) \quad (5.10)$$

en donde K_{S_i} es un factor de proporcionalidad característico de la servoválvula i .

A partir de las igualdades (5.10), (5.9) y (5.1a) (o equivalentemente (5.4a)) se deduce la expresión

$$f_{h_i}(t) = K_{a_i} u_{1_i}(t - \tau_{r_i}) \quad (i = 1, \dots, n_a) \quad (5.11)$$

en la que K_{a_i} es un factor de proporcionalidad característico de cada actuador i :

$$K_{a_i} = K_{S_i} S_{e_i} \cos \alpha_i \quad (5.11a)$$

En el caso en que los tiempos de respuesta de las n_a servoválvulas se consideren iguales:

$$\tau_{r_1} = \dots = \tau_{r_{n_a}} = \tau_r \quad (5.12)$$

las n_a igualdades contenidas en (5.11) pueden ser escritas en forma matricial:

$$\mathbf{f}_h(t) = \mathbf{K}_a \mathbf{u}_1(t - \tau_r) \quad (5.13)$$

siendo

$$\mathbf{K}_a = \begin{pmatrix} K_{a_1} & & 0 \\ & \dots & \\ 0 & & K_{a_{n_a}} \end{pmatrix} \quad (5.13a)$$

Las expresiones (5.8) y (5.13) permiten escribir el siguiente resultado:

$$\mathbf{u}_0(t) = \mathbf{C}_a \mathbf{u}_1(t - \tau_r) \quad (5.14)$$

donde \mathbf{C}_a es una matriz constante e inversible dada por

$$\mathbf{C}_a = \mathbf{S} \mathbf{K}_a \quad (5.14a)$$

La expresión (5.14) relaciona la señal de control que alimenta a las servoválvulas con las fuerzas efectivas de control \mathbf{u}_0 que se ejercen sobre la estructura. Puesto que la matriz constante \mathbf{C}_a es inversible, (5.14) muestra que, conociendo el valor de las fuerzas de control \mathbf{u}_0 que se desea que actúen sobre la estructura, es posible determinar el valor de la señal de control \mathbf{u}_1 que es preciso suministrar a las servoválvulas.

5.4 PRESTACIONES MAXIMAS DE LOS CABLES ACTIVOS.

Un mecanismo actuador por cables activos similar a los descritos en las figuras 5.1 es capaz de proporcionar, en función de sus características físicas y en respuesta a la señal de control u_1 que le alimenta, unas prestaciones máximas que no puede superar. En el presente apartado se describen los valores que limitan el rendimiento máximo de los cables activos.

Para un mecanismo actuador del tipo descrito en las figuras 5.1a o 5.1b se consideran los tres valores máximos siguientes:

- f_{hLIM} *Máxima fuerza horizontal f_h ejercida sobre las plantas a las que se fijan los cables.* Las expresiones (5.10) y (5.11) muestran que el valor de f_{hLIM} depende únicamente de la máxima diferencia de presión $P_2 - P_1$ que es capaz de mantener la servoválvula. No obstante, todos los elementos mecánicos deben ser dimensionados adecuadamente y la servoválvula debe ser alimentada hidráulicamente a presión suficiente.
- z_{LIM} *Máximo desplazamiento z del pistón respecto de su posición inicial central.* El valor de z_{LIM} depende exclusivamente de las dimensiones longitudinales del cilindro hidráulico.
- \dot{z}_{LIM} *Máxima velocidad lineal de traslación \dot{z} del pistón.* El valor de la velocidad \dot{z}_{LIM} es función de las características generales de la servoválvula y del cilindro hidráulico.

Si, para ejercer sobre la estructura las fuerzas de control que se le piden, un mecanismo actuador precisa superar una de las tres limitaciones contenidas en los valores anteriores, el sistema de control responde únicamente en la medida de sus posibilidades y las fuerzas de control que actúan realmente sobre la estructura no son, en general, iguales a las fuerzas solicitadas. En dicho caso se dice que los actuadores trabajan en condiciones de saturación.

Es posible diseñar mecanismos actuadores por cables activos tales que sus

características permitan obtener valores elevados para f_{hLIM} , z_{LIM} y \dot{z}_{LIM} , aunque ello implica un coste mayor de las instalaciones. Conseguir un valor de \dot{z}_{LIM} más alto precisa un incremento muy importante en el coste mientras que el incremento no es tan importante para z_{LIM} y menos aún para f_{hLIM} . Si se instalan varios actuadores como los representados en las figuras 5.1 en paralelo el valor de f_{hLIM} es igual a la suma de los valores individuales correspondientes a cada actuador.

5.5 CONCLUSIONES.

Los mecanismos actuadores formados por cables activos son dispositivos mecánicos descritos en las figuras 5.1. Son capaces de ejercer sobre la estructura un par de fuerzas horizontales de valor predeterminado.

Agrupando los actuadores de acuerdo con el esquema descrito en la figura 5.4 se constituyen sistemas de control activo de edificios para disminuir sus desplazamientos horizontales en presencia de excitaciones dinámicas. Dichos sistemas de control pueden ser diseñados para ejercer en cada instante sobre la estructura del edificio un sistema de fuerzas horizontales cuyos valores son preestablecidos. A tal efecto, es posible hallar los valores de la señal de control que reciben las servoválvulas, de forma que las fuerzas de control ejercidas sobre la estructura coincidan con los valores deseados. Consecuentemente, el sistema de control mediante cables activos descrito en la figura 5.4 cumple el cometido asignado en el esquema general del proceso de control activo a los actuadores.

El rendimiento de los cables activos está limitado, según sus características físicas, por valores máximos que no puede superar. No obstante, es posible diseñar instalaciones capaces de suministrar prestaciones elevadas, aunque a un coste progresivamente mayor.

REFERENCIAS.

- 1 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).
- 2 Leipholz, H.H.E., Abdel-Rohman, M., "Control of structures", Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, (1986).