

PROTECCIÓN DE EDIFICACIONES UTILIZANDO SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL: UNA ALTERNATIVA PARA LOS CÓDIGOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Esp., DANIEL GÓMEZ

Ingeniero Civil, Especialista en Estructuras, Universidad del Valle, Colombia.

Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7. Profesor Auxiliar, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Ph.D, PETER THOMSON

Doctor en Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Minnesota, USA.

Director Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7. Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

RESUMEN: Las vibraciones excesivas o prolongadas en estructuras civiles, pueden producir molestias en los usuarios y daños en elementos estructurales y no estructurales. Estas vibraciones están determinadas por los parámetros dinámicos (masa, rigidez y amortiguamiento), y es modificando estas características estructurales como se minimiza la respuesta de la edificación. La disminución de la respuesta estructural es el objetivo en el diseño sismo resistente, garantizando una adecuada resistencia, rigidez y ductilidad. En los últimos años se han propuesto alternativas para disminuir la vulnerabilidad estructural, entre ellas los sistemas de control activo, pasivo, híbrido y semiactivo; implementados en estructuras flexibles (rascacielos y puentes colgantes) en Japón y Estados Unidos. Esta ponencia muestra un breve resumen histórico del desarrollo de estos sistemas de control estructural y presenta el estado del arte y estado de la práctica de esta tecnología. Además, se describen las limitaciones y ventajas de los sistemas en el contexto del diseño y rehabilitación sismo resistente de estructuras.

ABSTRACT: *Excessive or prolonged vibrations in civil structures can produce annoyances in the users and damages in structural and nonstructural elements. These vibrations are determined by the dynamic parameters (mass, stiffness and damping), and is modifying these structural characteristics what reduces the response of the structure. The reduction of the structural response is the objective in the earthquake engineering and seismic design, guaranteeing a suitable strength, stiffness and ductility. In the past years have been purposed several alternatives to diminish the structural vulnerability, among them active, passive, hybrid and semi-active control systems which have been implemented in flexible structures (skyscrapers and suspension bridges) in Japan and the United States. This paper includes a brief historical summary of the development of these structural control systems and presents the state-of-the-art and state-of-the-practice of this technology. In addition, describes the limitations and advantages of the systems in the context of the structural seismic design and retrofit.*

1. INTRODUCCIÓN

El concepto de control estructural en estructuras civiles tiene sus raíces en el trabajo empírico de John Milne, profesor de ingeniería en Japón, quien hace más de 100 años construyó una pequeña casa en madera y la colocó sobre cojinetes para demostrar que la estructura podría ser aislada del movimiento sísmico ¹. Se necesitaron los primeros cincuenta años del siglo veinte para el desarrollo de la teoría de sistemas lineales y su aplicación al campo de las vibraciones y en particular a la dinámica estructural. La motivación principal de este desarrollo era el motor de combustión interno, usado tanto en automóviles como en aviones, que producía altos niveles de fuerzas dinámicas. Durante la Segunda Guerra Mundial, conceptos tales como aislamiento, absorción, y amortiguamiento de vibraciones, fueron desarrollados y aplicados efectivamente en estructuras aeronáuticas. Después de la Segunda Guerra Mundial, la carrera armamentista y la conquista del espacio fomentaron el desarrollo de la teoría y aplicación del control estructural en problemas de seguimiento y estabilización (tracking), y problemas relacionados con estructuras flexibles espaciales. Esta tecnología rápidamente fue adaptada a la ingeniería civil en aplicaciones de protección de puentes y edificios a cargas extremas de sismos y vientos ¹.

El primer estudio conceptual sobre control estructural en ingeniería civil fue realizado por Yao en 1972 ² y, desde entonces, un gran número de investigadores ha desarrollado sistemas de control estructural para el control de la respuesta sísmica y eólica, y ha verificado el comportamiento de estos sistemas. En agosto de 1994 se realizó en Los Ángeles, EEUU, el primer Congreso Mundial sobre Control Estructural, al que asistieron 337 participantes de 15 países y fueron presentados 225 artículos técnicos sobre control estructural, conformándose ese mismo año la Asociación Internacional para Control Estructural (IASC). En los últimos años, el interés en el control estructural ha aumentado notablemente a nivel mundial y se está realizando un gran número de investigaciones con diversos intereses y metodologías con una meta común: la protección de la infraestructura civil y las personas que la usan.

En estructuras civiles, las vibraciones excesivas producidas por sismos fuertes producen daños graves en elementos estructurales y no estructurales, y pérdida de vidas humanas. Controlar la respuesta estructural ante cargas dinámicas (i.e. cargas sísmicas y eólicas) es y ha sido una necesidad para la seguridad de los usuarios y de la edificación. Actualmente, existen alternativas para disminuir la vulnerabilidad estructural, aunque desafortunadamente algunas son poco utilizadas en nuestro país debido al desconocimiento que se tiene sobre la técnica o por los altos costos que genera su implementación.

Estas investigaciones, junto con el éxito de los edificios y puentes que han sido contruidos incorporando sistemas de control estructural, prometen que en el futuro éste sea uno de los campos más importantes de la ingeniería civil.

2. DINÁMICA Y CONTROL ESTRUCTURAL

Un sistema dinámico de N grados de libertad sometido a aceleraciones en la base se rige por la ecuación de movimiento en forma matricial

$$M[\ddot{x}_s(t) + \ddot{x}(t)] + C\dot{x}(t) + Kx(t) = 0 \quad (1)$$

Esta ecuación matricial representa N ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden y gobierna la respuesta de la estructura x sometida a la aceleración en la base $\ddot{x}_s(t)$. Las matrices M , C y K representan la matriz de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura, respectivamente.

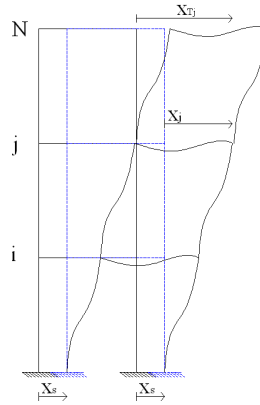


Figura 1. Sistema de N grados de libertad sometido a un movimiento en la base.

Para un desplazamiento de la base, denotado por $x_s(t)$, se obtiene un desplazamiento total (absoluto) $x_j^T(t)$ para el j -ésimo nivel de la estructura, conformado por la adición de dos efectos (ecuación 2): el desplazamiento de la base $x_s(t)$, que produce un movimiento de cuerpo rígido, y el desplazamiento relativo x_j del nivel con respecto a la nueva posición.

$$x_j^T(t) = x_s(t) + x_j(t) \quad (2)$$

Expresando la ecuación 2 en forma vectorial, donde “**1**” es un vector de orden N con cada elemento igual a 1 (Figura 1), suponiendo que todos los grados de libertad de la estructura tienen la misma orientación que el desplazamiento de la base, se obtiene:

$$x^T(t) = x_s(t)\mathbf{1} + x(t) \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que las fuerzas elásticas y de amortiguamiento sólo actúan con el movimiento relativo de la estructura, mientras las fuerzas inerciales actúan con la aceleración total; y que no todos los grados de libertad tienen la misma orientación que el desplazamiento de la base; al incluir la ecuación 3 y su segunda derivada con respecto al tiempo en la ecuación 1, y reorganizando, se obtiene:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{x}_s(t) \quad (4)$$

Donde $\mathbf{I}$ se conoce como el vector de influencia y representa el desplazamiento de los grados de libertad resultante de la aplicación estática de un desplazamiento unitario en la base.

Para modificar la respuesta de la estructura se puede variar M , C o K . Alterando estos parámetros se modifica el desplazamiento, velocidad y/o aceleración de la edificación. Sin embargo, hay parámetros que son más fáciles de variar y de controlar que otros. Las estrategias de control estructural buscan alterar éstos parámetros para minimizar las vibraciones, siendo las estrategias más utilizadas: variación de la masa y/o rigidez, aumento del amortiguamiento y aplicación de fuerzas inerciales contrarias.

2.1 Variación de la masa y/o rigidez

Para modificar las frecuencias naturales de la estructura se pueden alterar las matrices M o K (ver ecuación 5 para sistemas de múltiples grados de libertad). Resolviendo el problema de valores y vectores propios en la ecuación 5 se determinan las frecuencias y modos de vibración naturales de la estructura. La ecuación característica que se obtiene de la ecuación 5 tiene N raíces reales positivas, que corresponden al cuadrado de las frecuencias naturales del sistema.

$$[K - \omega_n^2 M] \phi_n = 0 \quad (5)$$

En la ecuación 5, ω_n y ϕ_n son la n -ésima frecuencia natural en (rad/seg) y el n -ésimo modo de vibración, respectivamente.

Variar la *masa* de la estructura no es sencillo por efectos de costo y por el peso intrínseco de los materiales utilizados en construcción. De otra parte, aumentarla para flexibilizar la estructura de tal manera que su periodo natural sea tal que la respuesta a un movimiento en la base sea casi nula (ver Figura 2), conlleva problemas de resistencia en los elementos estructurales. En estructuras muy flexibles, como rascacielos y puentes colgantes, la excitación sísmica no prima en el diseño estructural, siendo más grave el efecto del viento. Es por estas razones que en control estructural no se busca alterar la masa para disminuir la respuesta, además, este parámetro en estructuras civiles tiene gran incertidumbre y varía continuamente.

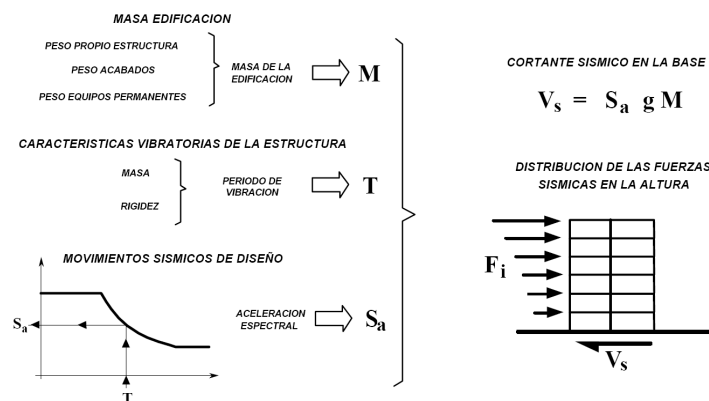


Figura 2. Obtención de la fuerza sísmica en edificios. Método FHE. (Tomado de ³)

Modificar la *rigidez* es mucho más fácil. En la práctica actual es lo que se hace cuando se obliga a una estructura a cumplir con los límites establecidos para las derivas, es decir, dotar a la edificación de una rigidez tal que cumpla con unos desplazamientos máximos. Si se compara la cortante sísmica antes y después de reforzar la estructura, es posible darse cuenta de que al cumplir con el criterio de rigidez se está sometiendo a la estructura a mayor fuerza sísmica. Al reforzar la estructura usualmente el periodo natural disminuye, haciendo generalmente que la aceleración espectral S_a aumente, generando mayor cortante basal V_s para una misma masa (ver Figura 2).

El control estructural no busca rigidizar la edificación, de otro modo, al colocar elementos de rigidez variable que modifican el periodo natural de vibración - generalmente sólo para los primeros modos- se aleja la estructura de entrar en condición de resonancia.

2.2 Aumento del amortiguamiento

La construcción de edificaciones muy flexibles, como rascacielos y puentes de grandes luces, hizo necesario considerar el incremento en el amortiguamiento efectivo de la estructura compuesto principalmente por cuatro fuentes: estructural, aerodinámico, del suelo y auxiliar; para la reducción de la respuesta ⁴.

El amortiguamiento estructural está limitado por la capacidad de disipación de energía de los materiales, generalmente concreto y acero. En estructuras flexibles, como rascacielos y puentes colgantes, el amortiguamiento aerodinámico puede contribuir a disipar energía dependiendo de la forma estructural y de la velocidad y dirección del viento. El amortiguamiento generado por la interacción suelo-estructura tiene una limitada contribución. Además, el amortiguamiento total no puede ser medido con precisión en una estructura hasta que esté completamente terminada, resultando un nivel de incertidumbre alto ⁴. En casos en que el amortiguamiento inherente es insuficiente, es posible añadir amortiguamiento auxiliar al sistema, ofreciendo un mecanismo adaptable más confiable para la disipación de la energía.

2.3 Aplicación de fuerzas inerciales contrarias

La generación de fuerzas inerciales contrarias al movimiento de la estructura es una característica de algunos dispositivos de control. Al plantear equilibrio dinámico en el problema de movimiento en la base, incluyendo la fuerza $f_c(t)$ que contrarresta el movimiento, se obtiene:

$$M[\ddot{x}_s(t) + \ddot{x}(t)] + C\dot{x}(t) + Kx(t) - f_c(t) = 0 \quad (6)$$

Y reorganizando se obtiene la ecuación de movimiento que describe el problema:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{x}_s(t) + f_c(t) \quad (7)$$

Donde $f_c(t)$ se conoce como la *fuerza de control* y es calculada a partir de la señal realimentada del sistema.

3. SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL

Las vibraciones estructurales producidas por sismos o viento pueden ser controladas mediante sistemas de control estructural. Estos sistemas son métodos alternos para disminuir las solicitaciones (fuerzas internas) de una estructura, mejorando sus propiedades dinámicas con base en esquemas de control pasivo, activo semiactivo e híbrido ⁵:

- **Control pasivo:** Un sistema de control pasivo no requiere una fuente externa de potencia. Los dispositivos de control pasivo producen fuerzas en respuesta al movimiento de la estructura. La energía total en un sistema estructural controlado pasivamente, incluyendo los dispositivos pasivos, no aumenta por dichos dispositivos.
- **Control activo:** Un sistema de control activo requiere de una fuente externa de potencia para alimentar los actuadores que aplican fuerzas a la estructura. Estas fuerzas pueden ser usadas tanto para suministrar como para disipar energía en la estructura. En un sistema de control activo con retroalimentación, las señales enviadas a los actuadores de control son función de las respuestas (normalmente movimientos) de la estructura, medidas con sensores físicos.
- **Control semiactivo:** Los sistemas de control semiactivo son una clase de sistemas de control activo para los que la energía externa requerida es de menor orden de magnitud que para los sistemas convencionales. Normalmente los dispositivos de control semiactivo no suministran energía mecánica al sistema estructural (incluyendo estructura y actuadores) y, por lo tanto, se garantiza la estabilidad tipo entrada-acotada salida-acotada (BIBO). Estos dispositivos frecuentemente son considerados como dispositivos pasivos controlables.

- **Control híbrido:** Los sistemas de control híbrido son sistemas que emplean una combinación de sistemas pasivos y activos. Por ejemplo, una estructura acondicionada con amortiguadores viscoelásticos y un amortiguador activo de masa en la parte superior del edificio; o una estructura aislada en la base con actuadores controlados activamente para mejorar su comportamiento.

3.1 Control pasivo

Los sistemas pasivos de control estructural (Figura 3) emplean dispositivos pasivos que responden al movimiento de la estructura y disipan la energía vibratoria del sistema estructural. Estos sistemas, que incluyen aisladores de base, amortiguadores viscoelásticos y amortiguadores de masas, han sido empleados en la construcción sismo resistente de más de 720 estructuras en países como Estados Unidos, Japón, Nueva Zelanda, Italia, Canadá, China y Colombia⁶.

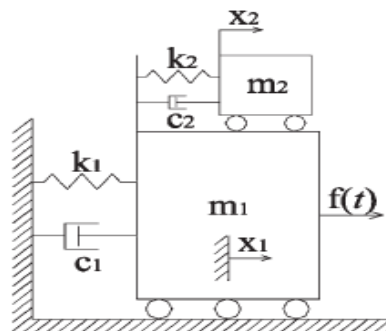


Figura 3. Representación de un sistema de control pasivo.⁷

3.1.1 Aislamiento de la base

En Estados Unidos y Nueva Zelanda, los sistemas pasivos de aislamiento de la base se han convertido en una estrategia aceptada de diseño y reforzamiento sísmico para puentes y edificios bajos y de mediana altura. El aislamiento de la base se logra al colocar algún tipo de capa flexible entre la estructura y la cimentación, lo que aumenta el período fundamental de la estructura y lo aleja de los períodos predominantes del suelo. Los cojinetes elastómeros son el sistema más comúnmente utilizado para el aislamiento, y en países como Italia, Estados Unidos, Japón y Nueva Zelanda, esta técnica es aceptada como una estrategia de diseño y reforzamiento sismo resistente para edificios bajos y de mediana altura⁸.

Un ejemplo de la efectividad de la técnica de aislamiento de la base es el hecho de que de los 10 hospitales afectados en el terremoto de Los Ángeles (enero de 1994), sólo el hospital con aislamiento de base, University of Southern California Teaching Hospital (Figura 4), continuó en servicio ⁵. Durante el sismo de Los Ángeles, la aceleración pico del suelo fue de 0.49 g, mientras que las aceleraciones dentro del edificio estuvieron entre 0.10 g y 0.13 g.



Figura 4. USC Teaching Hospital (USA). Foto: P.W. Clark

En Japón muchos edificios importantes están contruidos con sistemas de aislamiento, tales como el Centro de Computación de la Empresa Eléctrica Tohoku en Sendai, Provincia de Miyako (Figura 5). Un proyecto de cooperación entre el Earthquake Engineering Research Center (EERC), ahora Pacific Engineering Research Center (PEER), de la Universidad de California en Berkeley, y la Malaysian Rubber Producers Research Association (MRPRA), U.K, ha conducido a un programa apoyado por la Organización de Desarrollo Industrial de la Naciones Unidas (UNIDO) para desarrollar sistemas de aislamiento de bajo costo para países en desarrollo, y actualmente hay varios proyectos demostrativos en Indonesia, China y Armenia.



Figura 5. Empresa Eléctrica Tohoku. (Japón). Foto: P.W. Clark

Recientemente en Colombia se ha cuestionado la factibilidad de aplicar esta tecnología en el país debido a sus costos ⁹. Sin embargo, es importante que al comparar los costos de un edificio con y sin aislamiento de la base, se consideren estructuras con niveles equivalentes de protección. En Estados Unidos se estima que los costos de la construcción de un edificio nuevo con aislamiento son 6% menos que el caso de la construcción sin aislamiento y niveles equivalentes de protección ⁵. Además, estos costos sólo son iniciales y los costos de vida útil son

aún más favorables. Claro está que para el caso nacional falta considerar los costos de importación y nacionalización de los aisladores.

En la Universidad del Valle se han realizado varias investigaciones sobre sistemas de aislamiento de la base, entre las que se destacan: “Comportamiento dinámico del modelo a escala de un edificio con aislamiento de base tipo suspensión” ¹⁰ y “Aislamiento sísmico de estructuras: Desarrollo de un dispositivo de aislamiento sísmico construido con materiales nacionales” ¹¹. En la primera se estudió de manera comparativa el comportamiento dinámico de dos modelos de elementos finitos de un mismo edificio de hormigón armado; un modelo se consideró empotrado en la base y el otro aislado de ella mediante un sistema de tipo suspensión; concluyéndose que el sistema es adecuado para la reducción de la respuesta sísmica pero conviene mejorarlo con actuadores hidráulicos para evitar situaciones de resonancia. En la segunda investigación se construyeron dos dispositivos de aislamiento con la misma matriz de neopreno y diferentes fibras de refuerzo; se caracterizó su comportamiento mecánico mediante ensayos de resistencia de materiales y se concluyó que la reducción en el costo, empleando materiales y mano de obra colombiana, puede ser de hasta el 90% del costo de los dispositivos importados.

3.1.2 Disipadores pasivos de energía

Los sistemas de disipación pasiva de energía incluyen una amplia gama de materiales y dispositivos para aumentar el amortiguamiento, rigidez y capacidad estructural, y pueden ser usados tanto en el diseño de estructuras nuevas como en la rehabilitación sísmica de estructuras existentes. En general, todos estos sistemas están caracterizados por su capacidad de aumentar la disipación de energía en el sistema estructural mediante la conversión de energía cinética a calor o por la transferencia de energía entre modos de vibración. El primer método incluye dispositivos de rozamiento, fluencia de metales, transformación de fases en metales y deformación de sólidos o fluidos viscoelásticos; mientras que el segundo método incluye osciladores suplementarios. A continuación se presentan algunos de los principales sistemas:

- *Amortiguadores metálicos de fluencia:* Uno de los mecanismos efectivos para la disipación de energía introducida a una estructura por un sismo es mediante la deformación inelástica de metales. Muchos de estos dispositivos usan placas de acero blando, pero otros materiales, como plomo y materiales con memoria de forma, también han sido evaluados por investigadores con resultados prometedores⁵.



Figura 6. Ski Dome (Japón).

Las primeras aplicaciones de estos amortiguadores en estructuras civiles ocurrieron en Nueva Zelanda a finales de la década de los 70. Desde esa fecha se han instalado amortiguadores metálicos de fluencia en numerosas estructuras, incluyendo la estructura metálica del Ski-Dome en Chiba, Japón (Figura 6) y las tres torres del conjunto La Jolla, en Acapulco, México.

- *Amortiguadores de rozamiento:* El rozamiento o fricción es otro excelente mecanismo para la disipación de energía, y ha sido usado durante muchos años en frenos de automotores para disipar energía cinética de movimiento. En la Ingeniería Estructural, una amplia gama de dispositivos ha sido desarrollada, incluyendo los dispositivos Pall y los amortiguadores Sumitomo ⁵. En los últimos años se han acondicionado numerosos edificios con estos dispositivos para aumentar su protección sísmica, en particular en Canadá y Japón. Entre los numerosos casos está la estructura metálica de la Canadian Space Agency en Montreal y el Hotel Atami Korakuen en Takenaka, Japón (Figura 7).



Figura 7. Hotel Atami Korakuen (Japón)

En la Universidad del Valle se estudió el comportamiento dinámico de una estructura de acero con amortiguadores de rozamiento, empleando un simulador sísmico uniaxial ¹². A la estructura aporticada se le instalaron diagonales de acero excéntricas con elongación axial permitida mediante sujetadores graduales con los que se regula la fuerza de rozamiento. Se concluyó que las diagonales con

disipación de energía por fricción son un buen sistema para la reducción de la respuesta dinámica de la estructura, sin embargo, se recomienda examinar con más profundidad los efectos no lineales y el problema de aleteo que se presenta en diagonales esbeltas.

- *Amortiguadores viscoelásticos:* Los amortiguadores metálicos y de rozamiento son utilizados principalmente en aplicaciones sísmicas, sin embargo, existe una clase de materiales sólidos viscoelásticos que disipan energía para cualquier nivel de deformación y, por lo tanto, se usan tanto en aplicaciones sísmicas como eólicas. Su aplicación en la ingeniería civil comenzó en 1969 cuando aproximadamente diez mil amortiguadores viscoelásticos fueron instalados en las torres gemelas del World Trade Center en New York para reducir las vibraciones inducidas por viento.



Figura 8. Puente Amolanas (Chile).

Otras estructuras que han sido acondicionadas con este tipo de amortiguadores son los edificios de Columbia SeaFirst y Two Union Square en Seattle, la estación de tren Chien-Tan en Taipei, Taiwan, el edificio Santa Clara County en San Jose, California y el Puente Amolanas en Chile (Figura 8).

- *Amortiguadores de fluido viscoso:* Los fluidos también pueden ser usados para disipar energía, y numerosas configuraciones y dispositivos han sido desarrollados. Un amortiguador de fluido viscoso normalmente consiste en un pistón dentro de un cilindro lleno de un compuesto de silicona o aceite, en el que la energía es disipada mediante el movimiento del fluido viscoso dentro del cilindro. En la última década, los amortiguadores de fluido viscoso han sido incorporados en un gran número de estructuras civiles. Sólo los amortiguadores del fabricante principal de los Estados Unidos, Taylor Devices Inc., han sido instalados en 66 estructuras alrededor del mundo, incluyendo 12 amortiguadores en las torres de iluminación del Rich Stadium en Buffalo, New York, para minimizar las vibraciones producidas por viento; 100 amortiguadores en el puente Golden Gate, en San Francisco, California; y 12 amortiguadores en el puente entre las torres de las Petrona Twin Towers, Malasia (Figura 9). Otros casos pueden ser consultados en ¹³.



Figura 9. Torres Petrona (Malasia)

- *Amortiguadores de masa sintonizados:* El concepto de amortiguador de masa sintonizado (Tuned Mass Damper -TMD-) data de la década de 1940 (Den Hartog, 1947). Estos amortiguadores consisten en una masa secundaria conectada a la estructura mediante un resorte y un amortiguador. El TMD se diseña como un sistema de un grado de libertad con frecuencia natural de vibración aproximadamente igual a la frecuencia fundamental de la estructura (sintonizado). La vibración de la estructura induce a la masa a entrar en resonancia, obteniéndose la disipación de energía mediante el amortiguador de masa.

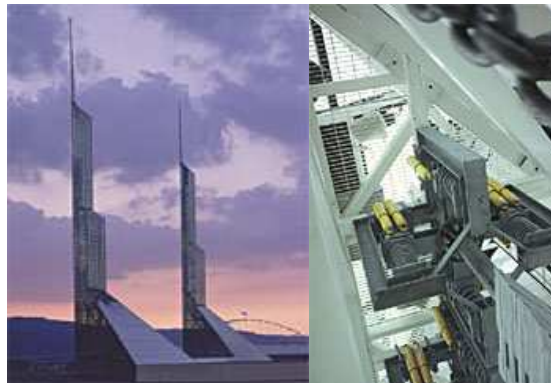


Figura 10. a) Oregon Convention Center. b) Sistema TMD implementado en el edificio.

Los TMD's han sido instalados en edificios tales como las Petrona Twin Towers (Figura 8), Malasia, y el Oregon Convention Center (Figura 10), Portland, USA, y son efectivos para reducir las amplitudes de vibraciones producidas por tráfico y viento (Fotos en ¹⁴).

- *Amortiguadores de líquido sintonizados:* Similar en concepto al TMD, el amortiguador de líquido sintonizado (tuned liquid damper -TLD-) y el amortiguador de columna de líquido sintonizado (tuned liquid column damper -TLCD-) indirectamente suministran amortiguamiento a la estructura. Un TLD absorbe energía estructural mediante el movimiento viscoso del fluido y su oleaje, mientras que en un TLCD la energía es disipada mediante el paso del líquido por un orificio.

Ejemplos de estructuras con amortiguadores de líquido sintonizado incluyen la torre del aeropuerto de Nagasaki, el Shin Yokohama Prince Hotel en Japón, y la Torre Millenium en Japón (Figura 11), proyectada para tener 840 metros de altura, utilizando agua en anillos perimetrales a diferentes alturas para minimizar las vibraciones inducidas por viento.

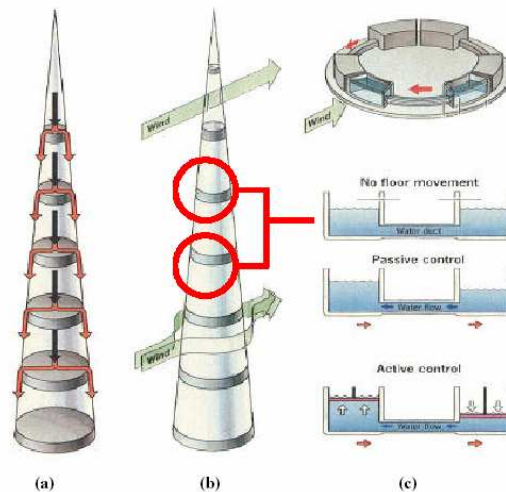


Figura 11. Torre Millenium (a construirse en Japón).

En la Universidad del Valle se estudió teórica y experimentalmente el comportamiento dinámico de un amortiguador de chapoteo sintonizado (tuned liquid sloshing damper -TLSD-) y de una estructura metálica que lo incorpora ¹⁵. Un TLSD es un tipo de TLD que mitiga la respuesta dinámica de una estructura mediante la acción de las fuerzas inerciales del fluido en movimiento. Se realizaron ensayos dinámicos en el simulador sísmico de la Universidad para calibrar el modelo matemático propuesto para el amortiguador y, adicionalmente, se realizaron ensayos con la estructura y el amortiguador, comprobando la efectividad del modelo propuesto y del sistema para la reducción de la respuesta dinámica de la estructura.

3.2 Control activo

Los sistemas de control activo son usados para atenuar la respuesta de estructuras sometidas a excitaciones internas o externas, tales como maquinaria o tráfico, vientos y sismos, para aumentar la seguridad o nivel de comodidad de sus ocupantes. Estos sistemas normalmente consisten en actuadores que imparten una fuerza o movimiento a la estructura, en dirección opuesta a la vibración (Figura 12). La acción apropiada de control se determina mediante la medición de la respuesta dinámica de la estructura. Actuadores tales como tendones activos, tirantes activos, y sistemas de amortiguadores de masa activos, que pueden emplear acción hidráulica, neumática, o electromagnética, son empleados para el control estructural activo ⁵.

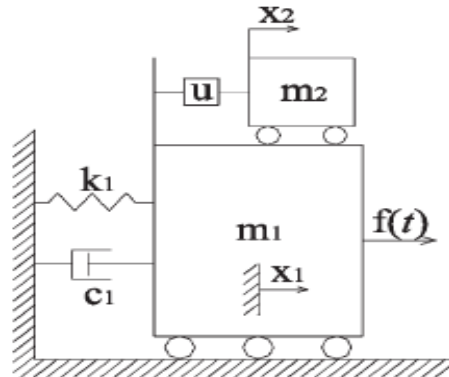


Figura 12. Representación de un sistema de control activo ⁷.

Para analizar el efecto de los sistemas de control activo en una estructura lineal bajo condiciones ideales, se considera una estructura modelada mediante un sistema discreto de N grados de libertad. La ecuación matricial de movimiento del sistema estructural se expresa mediante:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Du(t) + Ef(t) \quad (8)$$

Donde M , C y K son las matrices de dimensión $N \times N$ de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente; $x(t)$ es el vector de dimensión $N \times 1$ de desplazamiento de la estructura; el vector $f(t)$, de dimensión $N \times 1$, representa la excitación externa; y el vector $u(t)$, de dimensión $N \times 1$, representa las fuerzas de control. Las matrices D y E , de dimensión $N \times N$, definen la ubicación en la estructura de las fuerzas de control y excitación, respectivamente. Asumiendo que se usa una configuración de retroalimentación-proalimentación (feedback-feedforward), en la que la fuerza de control $u(t)$ es una función lineal de los desplazamientos $x(t)$ y velocidades $\dot{x}(t)$ de la estructura, y de la excitación $f(t)$, el vector de la fuerza de control es de la forma:

$$u(t) = G_x x(t) + G_v \dot{x}(t) + G_f f(t) \quad (9)$$

Donde G_x , G_v y G_f son las ganancias de control que pueden ser dependientes del tiempo. Sustituyendo la ecuación 9 en la ecuación 8 se tiene:

$$M\ddot{x} + (C - DG_v)\dot{x} + (K - DG_x)x = (-Mt + DG_f)\ddot{x}_s \quad (10)$$

Al comparar la ecuación 10 con la ecuación 8, se observa que el control de retroalimentación tiene el efecto de modificar dos parámetros estructurales: rigidez y amortiguamiento, de modo que la respuesta de la estructura sea más favorable ante la excitación. El efecto del componente de proalimentación modifica la excitación.

Una característica esencial de los sistemas de control activo es que requieren una fuente externa de energía para su funcionamiento y, por lo tanto, son vulnerables a cortes en el flujo eléctrico, lo que es altamente probable durante sismos. Estos sistemas pueden mejorar la respuesta dinámica de una estructura pero una de sus grandes desventajas es que también lo pueden empeorar en el sentido de que se pueden volver inestables e introducir energía cinética adicional al sistema. Otras

limitaciones del control activo es la dificultad de obtener un modelo adecuado de la estructura para el diseño del controlador y la dificultad en la medición de desplazamientos y velocidades de la estructura. Debido a lo anterior, la extensión del diseño estructural para incorporar conceptos de control con retroalimentación debe estar acompañada por un compromiso con la investigación y el desarrollo tecnológico.

En la Universidad del Valle se estudia actualmente la implementación de algoritmos inteligentes para el control de una estructura metálica con un actuador de masa activo (AMD) incorporado en la parte superior. El empleo de algoritmos inteligentes permite determinar la situación inmediata de la estructura para decidir en qué dirección y con qué aceleración se debe contrarrestar el movimiento. Se utilizan algoritmos inteligentes (redes neuronales y lógica difusa) por la capacidad que tienen para aprender la dinámica del sistema, que en muchos casos puede ser no lineal ¹⁶.

A pesar de que aún existen varios aspectos no resueltos para la aplicación de sistemas de control activo en estructuras civiles, el futuro es prometedor y se ha avanzado significativamente en la investigación de las metodologías de control activo para estructuras, incluyendo control óptimo, control estocástico, control adaptivo, control inteligente con lógica difusa y redes neuronales, control de estructura variable, y control robusto ⁵. Las estrategias híbridas y de control semiactivo tienen el potencial de proveer soluciones a varios de los retos de esta tecnología. (Fotos en ¹⁷).



Figura 13. a). Kyobashi Seiwa Building (Japón). b). Sistema AMD implementado en el edificio.

3.3 Control híbrido y semiactivo

Las estrategias de control híbrido han sido estudiadas por varios investigadores debido a su potencial de aumentar la fiabilidad y eficiencia de la estructura controlada ⁵. Un sistema de control híbrido consiste en dos o más dispositivos pasivos, activos o semiactivos. Debido a la implicación de múltiples dispositivos de control funcionando simultáneamente, los sistemas de control híbrido pueden aliviar algunas de las restricciones y limitaciones que existen cuando sólo uno de los sistemas es utilizado. Además, el sistema de control híbrido puede ser más fiable que un sistema totalmente activo, aunque muchas veces resulta siendo más complejo. La investigación en el área de sistemas de control híbrido ha sido enfocada principalmente hacia los sistemas híbridos con amortiguadores de masa (HMD) y sistemas con aislamiento de base activo ⁵. (Fotos en ¹⁷).



Figura 14. a). Shinjuku Tower (Japón). b). Sistema HMD implementado en el edificio.

El sistema híbrido con amortiguador de masa (hybrid mass damper -HMD-) es el dispositivo de control más empleado en aplicaciones de la Ingeniería Civil en escala real. Estos sistemas consisten en la combinación de un amortiguador de masa y un actuador de control activo (Figura 15). Las fuerzas del actuador son empleadas para mejorar la eficiencia del amortiguador y aumentar la robustez del sistema ante cambios en las características dinámicas de la estructura. Estos sistemas han sido empleados para reducir vibraciones en diversas estructuras, desde puentes hasta el edificio más alto del Japón ⁵. Por otro lado, los sistemas híbridos con aislamiento de la base consisten en un sistema pasivo de aislamiento de la base combinado con un actuador de control para mejorar los efectos del sistema de aislamiento. Estos sistemas son no lineales y, por lo tanto, los investigadores han desarrollado varias estrategias de control incluyendo control difuso, control basado en redes neuronales y control adaptivo.

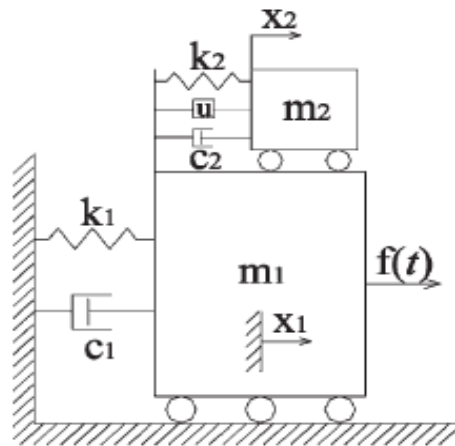


Figura 15. Representación de un sistema de control híbrido ⁷.

Los sistemas de control semiactivo han recibido mucha atención durante los últimos años debido a que ofrecen la adaptabilidad de los sistemas de control activo sin las exigencias de energía asociadas con éstos. Muchos de estos sistemas semiactivos operan con la energía de una batería, lo que puede ser muy favorable durante eventos sísmicos cuando la principal fuente de energía eléctrica puede fallar. Según las definiciones, un dispositivo de control semiactivo no puede aumentar la energía mecánica en el sistema controlado (incluyendo estructura y dispositivo), pero tiene propiedades que pueden ser variadas dinámicamente para reducir la respuesta de un sistema estructural. Por lo tanto, a diferencia de los sistemas de control activo, los dispositivos de control semiactivo no pueden desestabilizar el sistema estructural. Los sistemas semiactivos tienen un mejor rendimiento que los dispositivos pasivos y a veces aún mejor que los sistemas completamente activos, permitiendo así la posibilidad de una reducción efectiva de la respuesta de la estructura bajo una amplia gama de condiciones de cargas dinámicas ⁵.

Algunos ejemplos de estos sistemas son los dispositivos de fricción, dispositivos de líquidos controlables, amortiguadores de fluidos con orificio variable, dispositivos de aleaciones con memoria de forma, y dispositivos de fluidos controlables. La característica principal de los fluidos controlables es la habilidad que poseen para cambiar reversiblemente de un fluido viscoso lineal a un semisólido cuando son expuestos a un campo magnético o eléctrico ¹⁸. El futuro de estos fluidos para aplicaciones de control estructural es muy positivo ¹. Los amortiguadores de fluidos con orificio variable permiten alterar la resistencia del caudal de un fluido hidráulico y han sido efectivos para controlar la respuesta sísmica de edificios ⁵.

Los dispositivos de aleaciones con memoria de forma son otros sistemas con un gran potencial para el control estructural semiactivo, ya que se pueden usar como sistemas de rigidez variable ¹⁹. En la Universidad del Valle se está investigando un sistema de control semiactivo en aleación con memoria de forma (AMF) Níquel-Titanio, el cual tiene la capacidad de cambiar su rigidez en presencia de un estímulo (voltaje), con el fin de variar la frecuencia natural de la estructura dependiendo de la frecuencia de excitación, evitando la posibilidad de una situación de resonancia ²⁰.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

En los últimos 25 años de historia de control estructural han sido propuestos y desarrollados numerosos dispositivos para mejorar la respuesta de estructuras civiles sometidas a cargas dinámicas. Actualmente ningún sistema o dispositivo en particular es el mejor para todos los diseños y, en consecuencia, se han presentado una gama de alternativas en vía de desarrollo. Es importante enfatizar que esta tecnología aún está evolucionando y se esperan mejoras significativas tanto en los dispositivos como en los procedimientos correspondientes de diseño en los próximos años. En particular, la incorporación de requisitos en los códigos de construcción para la implementación de estos sistemas de control estructural es un paso que ya se está dando en países como Estados Unidos y Japón.

La era postmoderna de la Ingeniería Estructural involucrará especificaciones de la respuesta dinámica de estructuras que en muchos casos serán tan exigentes que sólo podrán ser cumplidos mediante la incorporación de control por retroalimentación o, como mínimo, mediante métodos integrados para el diseño tanto de la estructura como de los dispositivos de control. Lo anterior requiere de investigación multidisciplinaria para lograr los objetivos de proteger la infraestructura civil y la integridad de las personas que la utilizan, de los efectos de excitaciones extraordinarias de viento y sismos.

Actualmente la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, con el apoyo de Colciencias y la Universidad de Carolina del Sur (USA), lleva a cabo el proyecto “Desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo de la interacción dinámica humano/estructura para escenarios públicos”, teniendo como referente empírico el Estadio Olímpico Pascual Guerrero de la ciudad de Cali. El proyecto fue motivado principalmente por dos hechos: las NSR-98³ y el llamado de atención por parte de la ciudadanía hacia los altos niveles de vibración durante eventos públicos; y consiste en el diseño, construcción e instalación de sensores de aceleración en las tribunas con el fin de monitorear su comportamiento dinámico en condiciones normales y durante eventos públicos.

Los desarrollos tecnológicos obtenidos con el proyecto mencionado son el primer paso para un nuevo proyecto de investigación con el que se pretende explorar diversas estrategias y sistemas de control estructural, y seleccionar el más adecuado para una estructura en escala real en Colombia. Este proyecto fue presentado en la segunda etapa de selección de la convocatoria actual de Colciencias en la modalidad de Recuperación Contingente.

REFERENCIAS

- 1 Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., Skelton, R. E., Soong, T. T., Spencer, B. F., and Yao, J. T. P., Structural Control: Past, Present, and Future, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 123, No. 9, 897-958, 1997.
- 2 Yao, J.T.P., Concept of Structural Control, Journal of the Structural Division, ASCE, (ST7), 1567-1574., 1972.
- 3 Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente, NSR-98. Ley 400 de 1997.
- 4 Kareem, A., Kijewski, T., Tamura, Y., Mitigation of motion of tall buildings with specific examples of recent applications, Journal of Structural Engineering, 1999.
- 5 Thomson, P., Sistemas de control estructural. Memorias del Primer Encuentro del Acero en Colombia, Cartagena, 2001.
- 6 EERC National Information Service for Earthquake Engineering. Available: <http://nisee.berkeley.edu> (accessed July 4, 2007).
- 7 Ricciardelli, F., Pizzimenti, D., Mattel, M., Passive and active mass damper control of the response of tall building to wind gustiness, Engineering Structures, 2003.
- 8 Inman, D., Vibration with control, measurement and stability. Department of Mechanical and Aerospace Engineering State University of New York at Buffalo, New York, 1989.
- 9 Valencia, F. y Hurtado, J. E., El aislamiento sísmico: alternativa para la protección de estructuras, Noticreto, Bogotá, Asocreto, 58, 46-52., 2001.
- 10 Vanegas, J.E., Comportamiento dinámico del modelo a escala de un edificio con aislamiento de base tipo suspensión (Trabajo de Grado), Cali: Universidad del Valle, 2001.
- 11 Ramírez, E.A., Aislamiento sísmico de estructuras: Desarrollo de un dispositivo de aislamiento sísmico construido con materiales nacionales (Trabajo de Grado), Cali: Universidad del Valle, 2003.
- 12 Balanta, R., El uso de disipadores pasivos de energía para edificios (Trabajo de Grado), Cali: Universidad del Valle, 2001.
- 13 TAYLOR-DEVICES, Taylor Devices Seismic Dampers and Seismic Protection Products. Available: <http://www.taylordevices.com/SeismicDampers.htm> (accessed July 4, 2007).
- 14 RWDI Consulting Engineers and Scientists. Available: <http://www.rwdi.com> (accessed July 4, 2007).
- 15 Cruz, P.A., Implementación de amortiguadores líquidos sintonizados de chapoteo para el control de la respuesta estructural (Trabajo de Grado), Cali: Universidad del Valle, 2006.
- 16 Gómez, D., Algoritmos inteligentes para el control de la respuesta estructural empleando un amortiguador de masa activa (AMD). Tesis de Maestría en Estructuras (en preparación), Universidad del Valle, Cali, 2008.
- 17 NATHAZ, Real-Time Model Predictive Control for Structural Engineering. Available: <http://www.nd.edu/~nathaz/research/Gang.htm> (accessed July 4, 2007).
- 18 LORD MR Technology. Seismic Protection. Available: <http://www.lord.com/tabid/3354/Default.aspx> (accessed July 4, 2007).
- 19 Thomson, P. Shape Memory Alloys for Structural Control (Ph.D Thesis). Minneapolis, MN: University of Minnesota, 1997.

- 20 Escobar, L.F., Sistema de control semiactivo en aleación de memoria de forma (AMF) Níquel-Titanio. (Trabajo de Grado en preparación), Cali: Universidad del Valle, 2008.