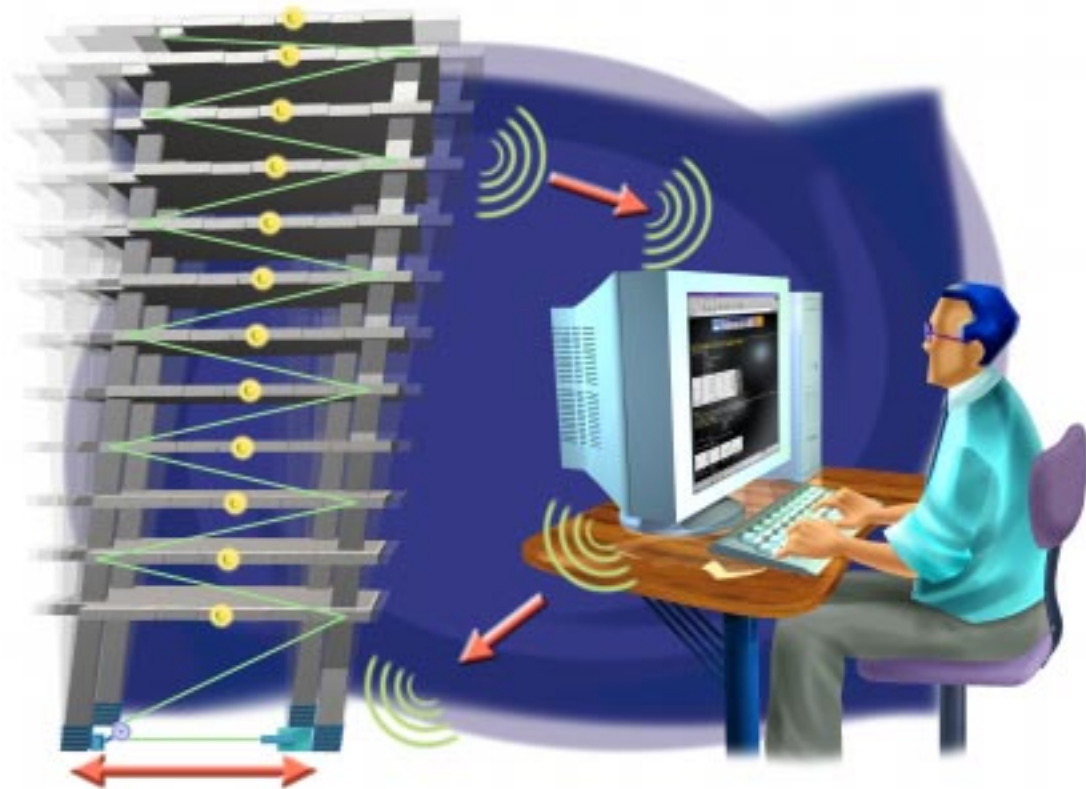




# CONTROL ACTIVO:

## INNOVACIÓN EN EL CONTROL DEL MOVIMIENTO SISMICO DE LAS EDIFICACIONES

POR: LEONARDO DUEÑAS OSORIO, INGENIERO CIVIL - U. DE LA SALLE, MAGISTER EN ING. CIVIL - U. DE LOS ANDES, MASTER EN ESTRUCTURAS - MIT.



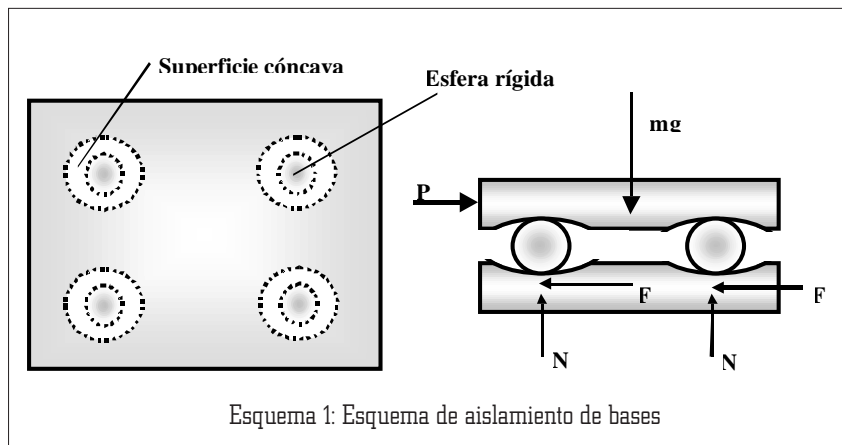
Como una evolución de las metodologías de diseño sísmo-resistente convencionales, basadas en el concepto de permitir deformaciones plásticas y degradación de la rigidez de las estructuras para disipar la energía impuesta por un sismo de gran magnitud, se encuentran estrategias de diseño alternativo como el control pasivo y el control activo del movimiento estructural. Estas alternativas pretenden mejorar la respuesta sísmica de las estructuras, manteniéndolas en un estado de operación y servicio, y cumpliendo con unos límites tolerables de deformación, velocidad o aceleración máxima, durante y después de la ocurrencia de un terremoto de magnitud considerable.

## ¿EN QUÉ CONSISTEN LOS SISTEMAS DE CONTROL DEL MOVIMIENTO SÍSMICO?

### Control pasivo del movimiento estructural

Este requiere de artefactos cuyas propiedades físicas y mecánicas sean invariables, y que además no necesiten una fuente externa de energía. Entre las estrategias más sobresalientes que conforman la gama del control pasivo, se encuentran el aislamiento de las cimentaciones, el uso de amortiguadores viscoelásticos, y la utilización de amortiguadores de masa calibrados para actuar ante una frecuencia de vibración específica. El aislamiento de las cimentaciones es un procedimiento basado en la idea de reducir la demanda sísmica en vez de incrementar la capacidad de resistencia sísmica de las estructuras. Dicha demanda, es una función de las propiedades dinámicas de la estructura, como el periodo natural de vibración y el amortiguamiento, aunque también depende de las características del suelo y de las fallas activas que amenazan una zona en particular. La capacidad, por su parte, es una función compleja de resistencia, rigidez y ductilidad dada por las propiedades de los materiales y por la configuración estructural del sistema de resistencia sísmica. Para lograr la nombrada reducción en la demanda sísmica de las estructuras, es necesario desacoplarlas del suelo al nivel de su fundación e incrementar su periodo natural de vibración a través de rodillos, esferas, sistemas de fricción tipo péndulo o tambores elastoméricos de caucho, siendo estos últimos los que han dado un empuje importante para la aplicación práctica del concepto.

Los amortiguadores viscoelásticos, por su parte, son instalados generalmente en las diagonales de la edificación, para que disipen la energía impuesta por el sismo a las estructuras a



Esquema 1: Esquema de aislamiento de bases

través de sus ciclos de histéresis; mientras que los amortiguadores de masa lo hacen al moverse en dirección opuesta a la estructura cuando ésta vibra a la frecuencia para la que el amortiguador fue calibrado. Estos últimos amortiguadores son masas concentradas que se pueden desplazar libremente en dirección horizontal, y que están ubicadas en los pisos superiores de la edificación, oponiéndose por inercia al movimiento de la estructura. La magnitud de dichas masas calibradas puede oscilar entre un 0.5% a un 5% la masa de la estructura. Una modificación al sistema de masas calibradas consiste en atar las masas a cables y suspenderlas, simulando el efecto de un péndulo. Aquí la longitud de los cables permite calibrar el periodo al cual las masas deben vibrar para oponerse al movimiento de la estructura. Por lo general las masas son contenedores con plomo, aunque de manera ingeniosa se podría utilizar la masa de los equipos y maquinaria de la edificación, como centrales de aire acondicionado o calefacción, compresores, bombas y plantas eléctricas.

Por lo anterior, cualquiera que sea el sistema pasivo seleccionado para mejorar el comportamiento sísmico de una estructura, una vez que es instalado, no puede modificar sus propiedades a través del tiempo, por lo tanto, requiere de un acertado



Amortiguadores

estimativo de las cargas de diseño y de un preciso modelo numérico de las propiedades físicas de la estructura para que su efecto sea positivo. También, su inhabilidad para cambiar dinámicamente y compensar cargas o solicitaciones inesperadas redundan en diseños muy conservadores. Además, estudios sobre el comportamiento de estructuras con control pasivo de su movimiento han demostrado que su efectividad se ve reducida por los efectos de sismo cercano, es decir, cuando la estructura se encuentra muy cerca de la falla geológica que libera la energía en forma de ondas sísmicas.

### Control Activo del movimiento estructural

Un sistema activo, en cambio, tiene la habilidad de determinar el estado actual de la estructura, decidir una serie de acciones que cambiarían su estado a uno más deseable, y ejecutar dichas acciones de una manera controlada en un periodo de tiempo muy corto. Estos sistemas de control podrían en teoría manejar cambios insospechados en su entorno, cumplir con estrictos límites de resistencia y servicio dentro de una amplia gama de condiciones de operación, y hasta compensar la falla de un número limitado de componentes estructurales. El control activo se obtiene al integrar dentro de la estructura un sistema de control constituido por un elemento de monitoreo (sistema para adquirir información), por un elemento controlador (módulo cognoscitivo que decide acciones de manera racional), y por un elemento actuador (paquete de artefactos físicos que ejecutan las acciones decididas por el controlador).

En el control pasivo la sollicitación  $p$ , es transformada en una respuesta de desplazamiento  $u$ , mediante la operación del sistema,  $h(p)$ , correspondiente a la flexibilidad de la estructura.

$$u=h(p) \tag{1}$$

La estrategia para control pasivo del movimiento, consiste en determinar una flexibilidad  $h(p)$ , tal que la respuesta de desplazamiento debido a una sollicitación esperada, esté contenida

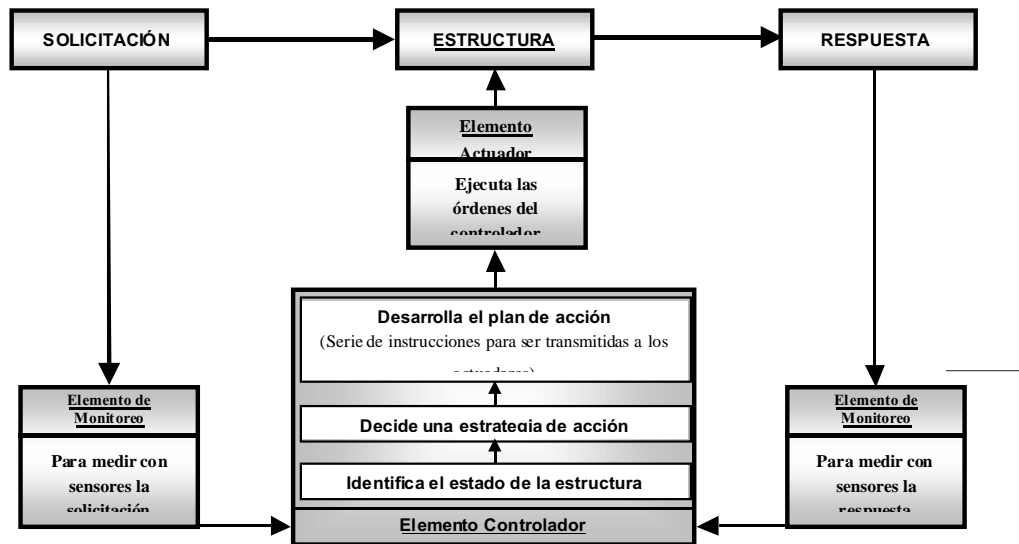


Figura No. 1. Elementos de un sistema de control activo

Esta estrategia de control es ahora viable dados los avances significativos que en los últimos diez años han tenido los materiales que reaccionan ante estímulos externos, las tecnologías de sensores y actuadores, el procesamiento de grandes volúmenes de información en tiempo real, y los sistemas de decisión inteligente.



Figura No. 2 - Diagrama para control pasivo del movimiento estructural.

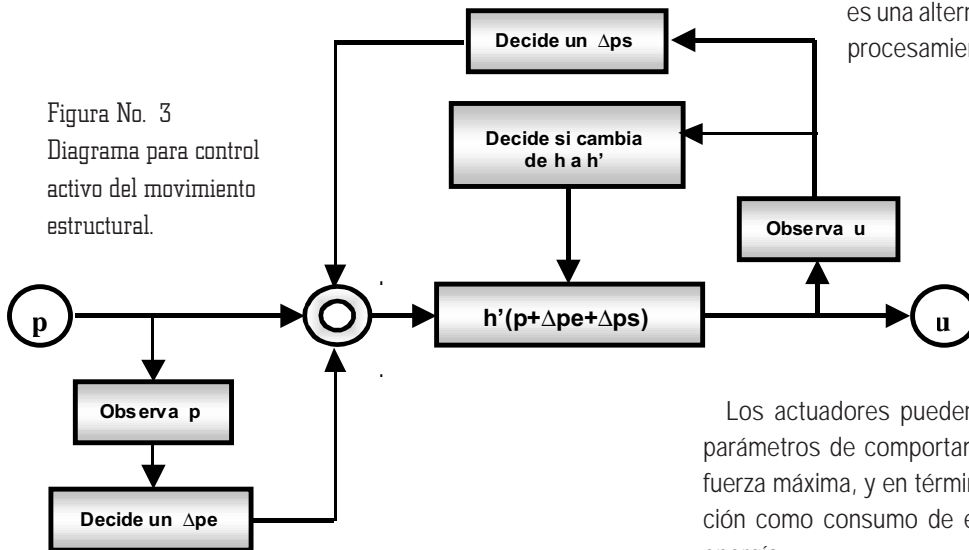
dentro de unos límites de diseño; y luego diseñar la estructura para esa flexibilidad específica.

El control activo, por su parte, involucra el monitoreo de la sollicitación y de la respuesta, para luego ajustar dicha sollicitación, posiblemente las propiedades del sistema estructural, y corregir la respuesta misma, con el fin de llevarla lo más cerca posible de los límites deseados.

### REQUERIMIENTOS COMPUTACIONALES PARA EL CONTROL ACTIVO

El elemento de monitoreo identificado previamente, emplea sensores para medir una combinación de variables relevantes para el movimiento, tales como la deformación, aceleración, velocidad, desplazamiento, y otra cantidad de variables físicas como presión, temperatura, y movimiento del terreno. Esta información es usualmente obtenida en forma de señales analógicas, que deben ser convertidas en secuencias discretas en el tiempo, y luego fusionadas con otras señales para ser transmitidas al módulo controlador. La compresión de gigantescos volúmenes de información es un factor decisivo para la efectividad de los sistemas sensores remotos de gran escala. Por lo tanto, la compresión de datos basada en «wavelets», las apretadas, de actual investigación en el Departamento de Ingeniería Civil del Instituto Tecnológico de Massachusetts, MIT, es una alternativa promisoría para el problema del procesamiento de datos.

Figura No. 3 Diagrama para control activo del movimiento estructural.



Asumiendo que las correcciones a la sollicitación, respuesta y modificaciones al sistema son introducidas instantáneamente, la relación entrada - salida para el sistema activo corresponde a:

$$u = h'(p + pe + ps) \quad (2)$$

Modificar las propiedades del sistema estructural, cuando sea posible, significa cambiar su flexibilidad y por ende su rigidez a través de variaciones en la geometría, conexiones y propiedades mecánicas de los elementos en tiempo real. Adicionalmente, se podría pensar en agregar un controlador capaz de modificar el sistema de decisión por medio de un proceso de auto-aprendizaje, lo cual conduciría a un sistema adaptativo de control activo, alcanzando el máximo nivel concebible de control del movimiento estructural.

### TECNOLOGÍAS DE ACTUADORES

Los actuadores pueden ser descritos en términos de sus parámetros de comportamiento como tiempo de respuesta y fuerza máxima, y en términos de sus requerimientos de operación como consumo de energía máximo y demanda total de energía.

*El actuador ideal es aquel capaz de generar fuerzas de gran magnitud en un periodo corto de tiempo y con una demanda de energía pequeña.*

Dado que las estructuras para obras civiles requieren fuerzas de control considerables, por el orden de meganewtons, y para excitación sísmica respuestas por el orden de milisegundos, es muy difícil encontrar el actuador que reúna simultáneamente estas características. Por ejemplo, existen actuadores lineales que generan grandes fuerzas, pero que tienen una demanda elevada de energía como los artefactos hidráulicos, electromecánicos y electromagnéticos.

Los mecanismos hidráulicos deben manejar válvulas y bombas para regular el flujo, almacenamiento y la presión, además de requerir continuo mantenimiento de sellos y empaques. Los artefactos electromecánicos generan su fuerza a través de un potente motor eléctrico que es compacto, económico y seguro

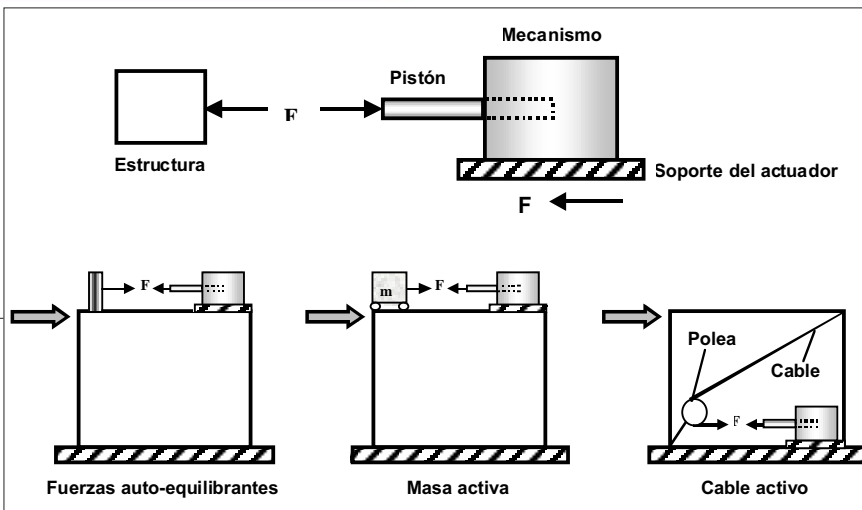


Figura No. 4 - Esquemas de aplicación de fuerza con actuadores lineales.



Figura No. 5 -Sección transversal del actuador electromagnético desarrollado en MIT.

para el medio ambiente, pero cuya capacidad está por el orden de 800kN como máximo. Los mecanismos electromagnéticos por su parte, no requieren de muchas piezas que estén en contacto unas con otras, ya que las fuerzas son generadas por campos magnéticos, por lo tanto son menos propensos a fallar, aunque hasta ahora sólo puedan generar fuerzas por el orden de kilonewtons.

#### Otros desarrollos para el control del movimiento sísmico

La investigación actual también permite pensar en actuadores que modifican la estructura del mecanismo, utilizando muy poca energía, y produciendo un incremento importante en la fuerza. Una muestra de esta tendencia se encuentra en amortiguadores viscosos que varían el área del orificio por el cual pasa el líquido viscoso de una cámara a otra cuando un pistón es movido linealmente. El mismo concepto puede ser aplicado a mecanismos que varían la rigidez, como diagonales que pueden ser totalmente rígidas o totalmente libres al variar tan solo la posición de un seguro que interconecta sus dos mitades.

Otra tendencia consiste en emplear materiales adaptativos como mecanismo de generación de fuerza, al cambiar sus propiedades o estado de una manera no convencional. Sin embargo, esta estrategia con los dispositivos actuales sólo produce fuerzas por el orden de kilonewtons, limitando su aplicabilidad en estructuras para obras civiles. Entre los más sobresalientes se encuentran los actuadores piezoeléctricos, los cuales cuando son sometidos a un voltaje experimentan una transformación molecular que resulta en una extensión o contracción, similar al efecto descrito por el módulo de Poisson al aplicar esfuerzos, es decir, si se aplica un voltaje en la dirección Z de un volumen de material, las deformaciones se evidencian en los ejes X y Y del mismo. Actualmente, las industrias aeroespacial y la de sensores para medir deformaciones, son las que estimulan y promueven su utilización.

Otro desarrollo importante se ha dado en el campo de las aleaciones con memoria de su forma. Dichas aleaciones son realizadas con metales que si se deforman inelásticamente a temperatura ambiente, vuelven a su forma original si son calentados por encima de cierta temperatura. La aleación hasta ahora más exitosa corresponde al Nitinol, una mezcla de níquel y titanio. El concepto para generar fuerza depende del entrenamiento que se le dé al material, el cual a temperatura ambiente debe permanecer deformado y restringido, para que al ser calentado recuerde su estado inicial y trate de volver a su forma original, generando en tal proceso la fuerza deseada. Sin embargo, la reacción está por el orden de segundos y no milisegundos como requeriría el control de una excitación sísmica.

Adicionalmente, se encuentran en desarrollo los llamados fluidos controlables, caracterizados por tener la habilidad de cambiar su estado de fluido a semisólido en cuestión de milisegundos cuando son sometidos a un campo eléctrico o magnético.

Finalmente, aunque las estrategias mencionadas son tan solo algunas alternativas para hacer aplicable el concepto del control activo, su versatilidad y capacidad para obligar a las estructuras a permanecer dentro de estados límites de servicio y resistencia ante cualquier sollicitación inesperada, las enmarcan en un horizonte muy promisorio, que aunque en principio está siendo estudiado, investigado y aplicado principalmente por Japón y Estados Unidos, su desarrollo futuro puede tener acogida en los países Latinoamericanos sometidos a convivir con la dinámica actividad sísmica producida por las fallas del cinturón del pacífico, las cuales constantemente amenazan y ponen en riesgo el territorio Suramericano. Por lo anterior, es un deber de todos hacer que la infraestructura de cada país sea menos vulnerable a los desastres naturales, y que la decisión de innovar y probar nuevas alternativas sea parte esencial en el ejercicio de nuestras profesiones y actividades docentes.