

# Plataforma Experimental para Control en Modelos de Estructuras Civiles

Rolando Carrera<sup>†</sup>, Luis Alvarez-Icaza<sup>‡</sup>, Mauricio Angeles<sup>§</sup>

Instituto de Ingeniería

Universidad Nacional Autónoma de México

04510 Coyoacán DF, México

**Resumen**—Se presenta un sistema integral desarrollado para hacer pruebas de identificación y control semiactivo en estructuras civiles. El sistema consta de tres partes principales: la mesa X-Y, actuada por motores lineales y sobre la cual se monta el modelo de una estructura civil; el centro de comando que opera la mesa; y el centro de adquisición de datos que también funciona como controlador cuando se cierra el lazo. Se han llevado cabo experimentos de identificación y actualmente se están montando los actuadores, uno para cada eje, para cerrar el lazo de control.

**Palabras clave:** Identificación de parámetros, control semiactivo, estructuras civiles, respuesta sísmica, motores lineales.

## I. INTRODUCCIÓN

Controlar la respuesta sísmica de estructuras civiles es importante para prevenir daños personales y económicos. Esto es particularmente cierto en regiones de alta sismicidad. El daño que pueden sufrir las estructuras depende fuertemente de las características de la excitación sísmica y de las propiedades de vibración de la estructura. En muchos casos, como por ejemplo en la Ciudad de México durante el sismo de septiembre de 1985, la interacción entre el suelo y las ondas sísmicas produjo movimientos del terreno que, además de la extraordinaria larga duración, presentaron concentraciones importantes en un rango limitado de frecuencias.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM cuenta desde hace algunos años con una mesa vibradora desarrollada *ex profeso* para hacer pruebas sísmicas en modelos de estructuras civiles de hasta 20 t. Este equipo, sin embargo, presenta algunas limitaciones para ensayar modelos con dos componentes de excitación horizontales y ortogonales, con el fin de provocar movimientos de par horizontal en la estructura, ya que la mesa vibradora sólo se mueve en un eje horizontal y en el vertical; además, el ruido inherente a los actuadores hidráulicos de la mesa vibradora afecta las mediciones. Por otro lado, dicha mesa está diseñada para realizar ensayos cuya duración puede, en algunos casos, llevar meses y disminuir su disponibilidad. Estas limitaciones motivaron el desarrollo de un equipo para realizar experimentos en especímenes de pequeña escala, para investigar técnicas de identificación y control semiactivo. En

el caso de control, la señal actuadora será la respuesta de un amortiguador magnetoreológico regulado por corriente, un amortiguador por eje; estos amortiguadores tienen por objeto disipar la energía del sismo.

Recientemente se terminó el desarrollo de la plataforma experimental que se describe en este artículo, ya que está en curso la instalación de los amortiguadores.

## II. CONFIGURACIÓN

La configuración de la estación experimental consiste básicamente de tres elementos que son dos computadoras y la mesa X-Y. La primera computadora genera los movimientos que debe seguir la mesa y la segunda es el sistema de adquisición de datos para fines de identificación o control. El esquema de la configuración puede verse en la figura 1. En la figura aparecen dos elementos más que funcionan como interfaces entre las computadoras y el proceso. A continuación se explican cada uno de los bloques que aparecen en la configuración mostrada en la figura.

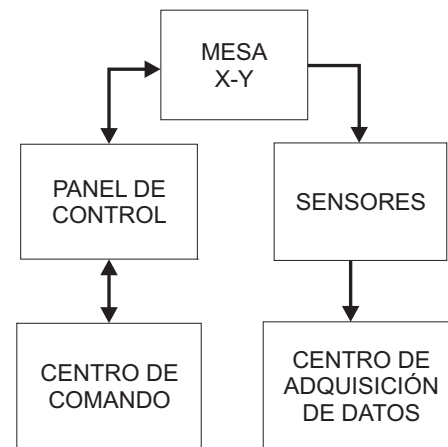


Figura 1. Diagrama funcional del sistema

### A. Centro de comando

El centro de comando es una computadora industrial Direct 470 con sistema operativo Windows 2000 y reloj de 566 MHz, y dentro de ella se encuentran tarjetas interfaces de señales analógicas de entrada-salida. Para la comunicación y programación de la mesa se tiene un

<sup>†</sup>Técnico Académico, racm@pumas.iingen.unam.mx

<sup>‡</sup>Investigador, alvar@pumas.iingen.unam.mx, Corresponsal.

<sup>§</sup>Estudiante de posgrado, JAngelesC@iingen.unam.mx.

software especializado de los fabricantes de los motores (Parker, 2003) y (Matlab, 2006) para la generación de trayectorias de referencia para la mesa.

El centro de comando tiene dos formas de operación. En una se comunica con el actuador de los servomotores para modificar parámetros de operación, cargar el programa desarrollado para el usuario para el seguimiento de una señal externa o actualizar software del fabricante. En la otra, el centro de comando genera las señales de excitación de la mesa y son enviadas a los puertos analógicos de entrada del controlador de los servomotores vía convertidores D/A.

#### 1) Comunicación y programación de los servomotores:

La comunicación se da entre la computadora y los actuadores (Parker, 2001) de los servomotores por medio de puertos serie a una velocidad de 9600 BPS. El protocolo de comunicación lo maneja el software *Motion Planner* del proveedor, en su opción de *Terminal*.

En una primera etapa se sintonizan los parámetros de los controladores de los motores lineales. Para ello se genera una señal interna de posición cuadrada que los motores siguen y en línea se modifican los parámetros que sintonizan el controlador del motor, cuando se tiene una respuesta satisfactoria se registran esos parámetros. Esos parámetros se usan después en el programa residente que el usuario desarrolla para su aplicación. Este programa se edita con el *Program Editor* del *Motion Planner* con comandos propios (*Gemini Command Language*)

El programa residente cumple dos funciones. La primera establece los parámetros de operación de los motores y en la segunda recibe los comandos que el usuario envía a través de interruptores que se encuentran sobre el tablero del panel de control.

Las funciones que lleva a cabo el programa residente son:

- INICIO. Programa parámetros de operación y hace un barrido en toda el área de trabajo para que el operador detecte que no haya objetos que impidan la operación de la mesa.
- MANUAL. Reconoce comandos que el usuario le da por medio de interruptores de botón. Estos comandos son para desplazar la mesa en toda el área de trabajo y para dar inicio a la operación de reproducir un movimiento determinado por una señal externa.
- SEGUIMIENTO. Esta es la actividad principal de la mesa y consiste en que los servomotores entran en un lazo de seguimiento a una señal de voltaje externa, que determina los desplazamientos. El periodo de muestreo en esta opción es de 2 ms, lo que hace que el ancho de banda útil para seguimiento es 250 Hz, supeditado a una velocidad máxima de 3 m/s.

2) *Generador de movimientos y monitoreo*: El generador está constituido por un programa hecho en Simulink y que corre en tiempo real (Simulink, 2006). Este programa envía las señales de referencia a los actuadores por medio de convertidores digital-analógico que se encuentran dentro de la computadora (ver siguiente sección). Las señales que se pueden generar son las siguientes:

- ESCALÓN. Amplitud variable

- SENOIDAL. Amplitud y frecuencia variable.
- BARRIDO DE FRECUENCIA. Señal senoidal de amplitud variable y barrido de frecuencias de 0.01 a 50 Hz
- SISMO. Reproduce un sismo que se encuentra en un archivo. Este archivo se genera a partir del registro de un sismo real y, en su caso, puede ser modificado en magnitud y tiempo para que no rebase los límites físicos de la mesa, a saber, distancia y fuerza.

El periodo de muestreo para la generación de las referencias de posición anteriores típicamente es de 10 ms, pero en el caso de la reproducción de un sismo éste es variable, ya que depende de los modos de naturales de oscilación que se quiera excitar en la estructura.

El monitoreo consiste en visualizar la posición de la mesa a partir de las señales de dos sensores de posición, uno para cada eje. Estos visualizadores están contenidos en el mismo programa que genera los movimientos.

3) *Sistema de adquisición de datos*: Este sistema consiste de dos tarjetas de adquisición de datos de National Instruments ((Instruments, 2009)) y dos sensores de posición LVDT (Linear Variable Differential Transformer) de (Transtek, 2009). Una tarjeta es de convertidores D/A (PCI6023E de NI) y con ella se generan las señales de referencia para los movimientos de la mesa, la otra tarjeta es de convertidores A/D (PCI6713, (Instruments, 2009)) que sirve para leer los voltajes provenientes de los sensores de posición. La comunicación entre Simulink y las tarjetas se da de forma expedita ya que Simulink cuenta con los drivers de esas tarjetas.

## B. Panel de control

El panel de control es un gabinete metálico que contiene a los actuadores de los servomotores lineales y su fuente de alimentación. También alberga el conjunto de interruptores y focos indicadores que le permiten al usuario dar comandos a la mesa X-Y. Tiene un interruptor de emergencia que desactiva todo el sistema cuando es actuado.

1) *Actuadores de los motores lineales*: Los actuadores o drivers (Parker, 2001) contienen tanto a la fuente de voltaje para los motores como al software que controla los motores. Este software recibe comandos desde una terminal (PC conectada vía puerto serie RS232) y desde entradas digitales conectadas a interruptores en la parte frontal de panel.

2) *Interfaz usuario-programa principal*: El programa principal, residente en los actuadores, es un programa de aplicación desarrollado por el usuario. Al activar el interruptor de encendido (ON/OFF) el sistema operativo corre el programa principal (MAIN), desarrollado previamente por el usuario. Este programa consiste de dos etapas, la de recepción de comandos desde el tablero y la de seguimiento a una señal externa (en este caso generada desde una PC, sección II-A.2).

En la primera etapa, selector MANUAL/AUTO en modo MANUAL, se tiene el comando de barrido del área de trabajo, en el que la mesa recorre toda el área de trabajo



Figura 2. Panel de control

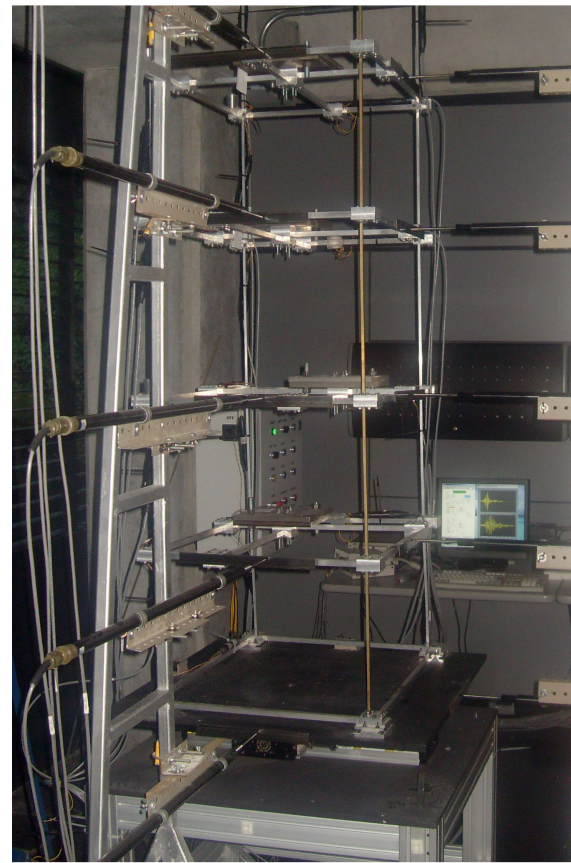


Figura 3. Plataforma experimental. En primer plano se observan los medidores de desplazamiento, luego la mesa y modelo estructural, y al fondo el panel de control y centro de comando.

para que el operador verifique que no haya obstáculos que se opongan al movimiento libre de la estructura; comandos de desplazamientos discretos ( $\pm 5$  mm) en las direcciones X-Y; y comando de inicio de operación, donde se lleva a la mesa al centro del área de trabajo y queda en espera de recibir las señales analógicas de desplazamientos.

Se entra a la segunda etapa al cambiar el selector MANUAL/AUTO en modo AUTO seguido por los comandos HOME y RUN; en ese momento el programa ignora todo comando externo y entra al segmento del programa que da seguimiento a una señal externa (*following*), que se le suministra a través de una entrada analógica de un convertidor A/D integrado al driver.

### C. Mesa X-Y

La mesa, figura 3, es una estructura de aluminio, de  $80 \times 80$  de base por 60 cm de altura, anclada a un zócalo de concreto, sobre esta mesa se tiene una placa de acero al carbón sobre la cual se encuentran los servomotores lineales, dispuestos transversalmente, y sobre el motor superior se encuentra fija una placa de aluminio, donde se fija el modelo de la estructura.

1) *Base para modelos:* Es una placa de aluminio temple 6061 de dimensiones  $75 \times 75 \times 1.25$  cm, que está fijada en el centro al motor superior. La placa tiene una trama de orificios, dispuestos cada 5 cm, que sirven para fijar la estructura a ella.

2) *Motores lineales:* Estos son servomotores lineales de Parker modelo 406T03LXR (figura 4) con aceleración y

velocidad máximas de 5 g y 3 m/s, respectivamente, y 5  $\mu\text{m}$  de resolución en la posición. Tienen un desplazamiento libre de 250 mm. Estos motores pueden proporcionar una fuerza continua de 75 N y una fuerza pico de 225 N.

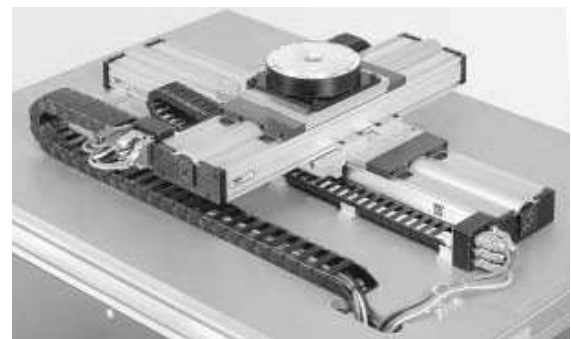


Figura 4. Disposición de los servomotores lineales.

3) *Sensores de posición:* Para medir la posición de la mesa se tiene un LVDT (Linear Variable Differential Transformer, modelo 0356 de Transtek) por cada eje. Estos sensores están conectados a la interfaz de convertidores A/D del sistema de adquisición de datos, para que el programa que monitorea la posición de la mesa tenga acceso a esa información. Como estos sensores miden desplazamientos

de  $\pm 7.5$  cm, el área de trabajo está restringida a un cuadrado de 15 cm por arista.

#### D. Modelo estructural

El modelo estructural depende del objetivo que se esté buscando en la investigación. Está supeditado a las características de la mesa, como son el área de trabajo ( $75 \times 75$  cm), peso máximo de la estructura (75 kg), máxima aceleración (5 g) y máximos desplazamientos medibles ( $\pm 7.5$  cm), principalmente.

La estructura actual, mostrada en la figura 3, es de cinco pisos con dimensiones  $60 \times 50 \times 180$  cm. Construida con varillas cuadradas de aluminio y latón, y placas de acero para simular el peso por piso. Su peso total es de 48 kg.

1) *Sensores:* Se tienen sensores de posición y aceleración en cada piso. Por cada piso se tiene un sensor de posición (LVDT) y uno de aceleración (acelerómetro fuerza-balance de 2 g, modelo US5 de CFX Technologies) en el eje X y uno de desplazamiento y dos de aceleración, para medir torsión, en el eje Y (ver figura 5, los acelerómetros son los cilindros metálicos adosados a las paredes laterales externas de las barras; los medidores de desplazamiento se observan al fondo, son barras de contacto transversales a las paredes de la estructura). En la base sólo se tienen uno de aceleración y uno de desplazamiento por cada eje. La polarización de todos los sensores es de 12 V.

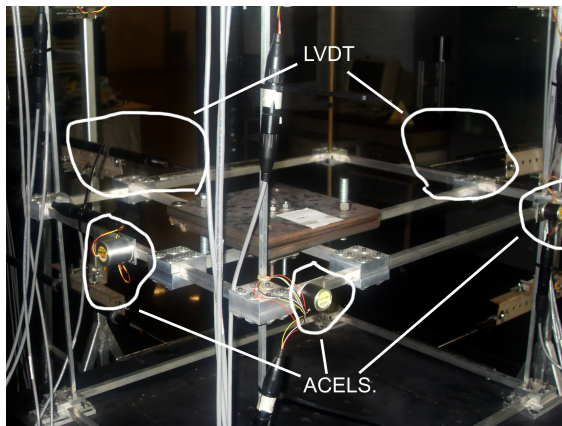


Figura 5. Disposición de acelerómetros y medidores de desplazamiento por piso.

2) *Amortiguador magnetoreológico:* Los amortiguadores magneto-reológicos son dispositivos provistos de un fluido cuya viscosidad varía dramáticamente cuando son expuestos a un campo magnético. En los dispositivos comerciales, este campo magnético se produce a través de un electroimán, por lo que la señal de control que determina la viscosidad del fluido magnetoreológico es un voltaje.

Para fines de control, se tienen dos amortiguadores magnetoreológicos (modelo RD-1005-MR de Lord Co.) anclados entre la base y el primer piso de la estructura. Estos amortiguadores funcionan como actuadores al oponerse al movimiento de la estructura y son actuados por medio de una señal de corriente.

#### E. Centro de adquisición de datos

El centro de adquisición de datos es otra computadora (Sun modelo Ultra20, 2.2 GHz) habilitada para adquirir toda la información que viene del arreglo de sensores dispuesto en la estructura. Para ello cuenta también con tarjetas de adquisición de datos y opera con el sistema operativo Linux SUSE.

1) *Procesamiento de información:* El procesamiento de la información consiste en que en cada instante de muestreo se leen los valores de voltaje provenientes de los sensores por medio de comandos a los convertidores analógico-digital, estos voltajes se convierten a unidades de desplazamiento y aceleración, para luego procesarlos en tiempo real con un algoritmo, que en este momento es un algoritmo de identificación de parámetros. Los parámetros que se identifican son los correspondientes a un modelo aproximado a la estructura real, que es un modelo de masas (pisos y carga) unidas por medio de resortes y amortiguadores (paredes, columnas y travesaños), es decir, se identifican las matrices de inercia ( $M$ ), rigidez ( $K$ ) y amortiguamiento ( $C$ ) del modelo en espacio de estados de la estructura:  $M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = B\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$ , donde  $\ddot{\mathbf{x}}$  es el vector de estado y  $\ddot{\mathbf{x}}_g$  el vector de entradas, en este caso la aceleración de la base.

El software que se usa es C (GCC de Linux) y los drivers (NIDAQmxBase de NI) para las tarjetas de adquisición de datos de National Instruments, también en lenguaje C.

2) *Lazo de control:* Además del algoritmo de identificación se tiene un algoritmo de control semiactivo que nos permite cerrar el lazo con el actuador (amortiguador magnetoreológico). Este algoritmo está desarrollado sobre la plataforma SIMULINK de Matlab. El controlador está basado en un control óptimo por modulación en frecuencia (*frequency shape*), cuyos resultados teóricos están analizados en (Alvarez-Icaza y Carrera, 2003).

3) *Tarjetas de adquisición de datos:* Se trata de dos tarjetas con convertidores analógico-digital de 16 entradas y 12 bits de resolución. Son tarjetas de National Instruments, PCI-MIO-16E-4. Para todas las tarjetas se tienen módulos de conexión (SCB-68) externos a la computadora, donde se conectan los sensores de posición y aceleración.

### III. RESULTADOS

Los servomotores lineales tienen, de forma general, dos opciones para la programación del seguimiento de trayectorias. En una los desplazamientos punto a punto son programados con un perfil de velocidad que inicia con una aceleración, sigue con un desplazamiento a velocidad constante, para terminar con una desaceleración; estos comandos de desplazamiento se asignan vía puerto serie con una cadena de valores de posición. En la otra, el servomotor es programado en un lazo de seguimiento a una señal de desplazamiento externa, dada en forma voltaje (*following*), para lo cual emplea un módulo de convertidores A/D, realizando con ello un seguimiento en tiempo real. Dado que en la primera opción el perfil de desplazamiento no coincide con la señal de referencia, esto induce una

serie de frecuencias ajenas al espectro de la señal (sismo) que está sirviendo de referencia, además de que al enviar los comandos de posición vía puerto serie, no se tiene control para un seguimiento en tiempo real; por otro lado, en la opción de seguimiento se tiene la certeza de estar reproduciendo un sismo, dada la velocidad del tiempo de muestreo. Es por ello que se eligió usar el equipo en la opción de seguimiento a una trayectoria externa.

Si bien se tiene instrumentada la mesa y la estructura con 12 sensores de desplazamiento y 17 acelerómetros, se presenta, como muestra de un ensayo, las gráficas de tres registros de aceleración correspondientes a los pisos primero, tercero y quinto en la dirección Y, figura 6. La base se excitó con una señal senoidal de 1 cm de amplitud y 1 Hz. En breve se espera obtener ya resultados de identificación de parámetros, esto es, las matrices M, C y K del modelo del edificio.

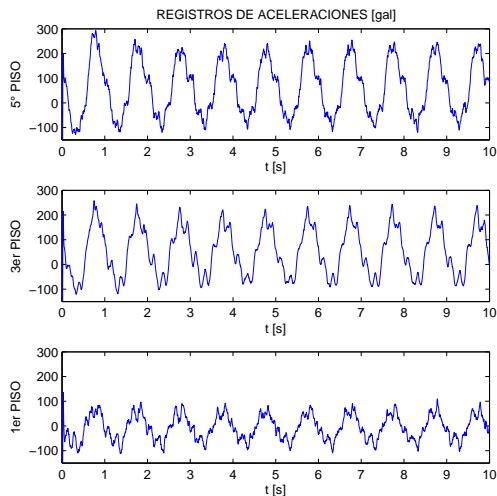


Figura 6. Registros de aceleraciones en la estructura.

Aunque no es producto de esta plataforma, la figura 7 muestra el resultado de un ensayo con una estructura en la Mesa Vibradora. La estructura estaba actuada con un amortiguador magnetoreológico, bajo un esquema de control LQR modulado en frecuencia. Lo que se observa en la figura es el desplazamiento en un eje horizontal del 5º piso, con y sin control. Se puede observar que el efecto del control disminuye el desplazamiento en aproximadamente el 50%, lo que implica una disminución de disipación de energía del 75%. Se espera obtener resultados semejantes con la Mesa X-Y.

#### IV. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con fondos de los proyectos CONACYT 47583 y UNAM-DGAPA-PAPIIT 117108.

#### REFERENCIAS

Alvarez-Icaza, L. y R. Carrera (2003). Frequency shaped semi-active control of civil structures. En: *American Control Conference ACC/CDC 2003*. Denver, Colorado. pp. 1422–1427.

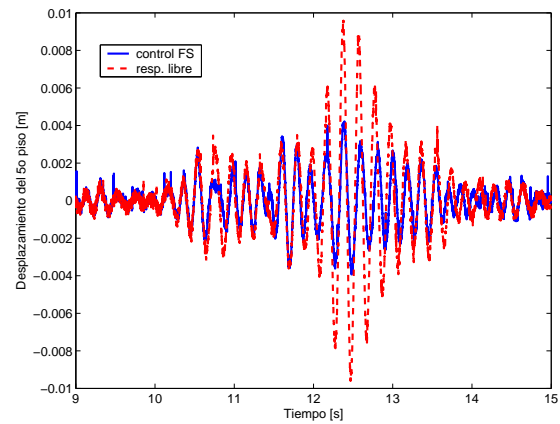


Figura 7. Registro de desplazamientos con y sin control. Sismo SCT1985.

Instruments, National (2009). *Data Acquisition*. National Instruments Corporation. Austin. <http://www.ni.com/dataacquisition/>.  
 Matlab (2006). *Matlab R2006a*. Mathworks Inc. <http://www.mathworks.com/>.  
 Parker (2001). *Gemini GV6K and GT6K Hardware Installation Guide*. Parker Hannifin Corp., Rohnert Park, CA. <http://www.compumotor.com/>.  
 Parker (2003). *Motion Planner*. Parker Hannifin Corp., Rohnert Park, CA. <http://www.compumotor.com/>.  
 Simulink (2006). *Real Time Workshop*. Mathworks Inc. <http://www.mathworks.com/products/rtw>.  
 Transtek (2009). *Gaging LVDTs*. Trans-Tek, Inc. <http://www.transtekinc.com/products/gaging-LVDTs.html>.