



Ingeniería y Competitividad

ISSN: 0123-3033

inycompe@gmail.com

Universidad del Valle

Colombia

Coral, Horacio A.; Ramírez, José M.; Rosero, Esteban E.; Thomson, Peter; Gómez, Daniel;  
Marulanda, Johannio

Diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele-operable para modelos  
estructurales a pequeña escala

Ingeniería y Competitividad, vol. 12, núm. 2, 2010, pp. 95-115

Universidad del Valle

Cali, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323528007>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele-operable para modelos estructurales a pequeña escala

Horacio A. Coral\*,§, José M. Ramírez\*, Esteban E. Rosero\*, Peter Thomson\*\*,  
Daniel Gómez\*\*, Johannio Marulanda\*\*

\* Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad del Valle.

\*\* Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle.

§ horacioacoral@gmail.com

(Recibido: Marzo 19 de 2010 - Aceptado: Diciembre 06 de 2010)

### Resumen

Este artículo presenta el diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial para modelos estructurales de pequeña escala. Inicialmente, el documento muestra el diseño de cada parte del simulador hasta llegar a la construcción de todo el prototipo. Luego, se halla un modelo matemático del simulador utilizando un procedimiento de identificación en el lazo de velocidad que se valida mediante respuesta en frecuencia. A partir del modelo identificado se diseñan los controladores de los lazos de velocidad y posición, que proveen al sistema el desempeño requerido. Finalmente, se presentan varias pruebas para la validación del simulador sísmico y se describe la interfaz de control remota desarrollada en Java®, que permite al usuario definir las señales de excitación, visualizar los registros obtenidos de la prueba y observar el video en línea desde Internet.

**Palabras Claves:** Dinámica estructural, Ingeniería sísmica, Motor lineal, Simulador sísmico, Teleoperación.

CIVIL ENGINEERING

## Design, construction and control of a unidirectional tele-operated seismic simulator for testing small scale structural models

### Abstract

This paper presents the design, construction and control of a unidirectional seismic simulator for testing small-scale structural models. The design of the components and the construction process of the entire prototype are described in detail. A mathematical model of the simulator dynamics is found using an identification procedure in the velocity loop and validated using the frequency response. The identified model is used to design controllers with velocity and position loops that provide the required system performance. Finally, experimental test results of the seismic simulator are presented and a description is given of the remote control interface developed in Java®, which allows the user to define excitation signals, display data obtained during tests and watch online video over the Internet.

**Keywords:** Earthquake engineering, Linear motor, Seismic simulator, Structural dynamics, Teleoperation.

## 1. Introducción

Anualmente, en el mundo se registra en promedio un terremoto de magnitud 8 o superior y 17 terremotos de magnitudes entre 7.0 y 7.9, (USGS, 2008). como resultado, miles de personas han fallecido debido al colapso de edificios, producto de grandes terremotos como el ocurrido en 1995 en la ciudad de Kobe en Japón, el terremoto de El Centro en el Sur de California (USA) que dejó cerca del 80% de los edificios con daños y cerca del 50% de ellos tuvieron que ser demolidos, el terremoto de San Francisco (USA) en 1989 que causó cuantiosos daños en autopistas y edificios, el terremoto de Armenia (Colombia) en 1999, el terremoto del 12 de enero de 2010 en Haití, y finalmente uno de los terremotos más grandes en la historia ocurrido el 27 de febrero de 2010 en Chile con una intensidad de 8.8 grados en la escala de Richter.

Todos estos antecedentes iniciaron y fortalecieron la ingeniería sísmica en el mundo cuyos esfuerzos aún se enfocan en probar, observar y analizar los efectos de los movimientos sísmicos en estructuras reales y a escala para determinar la capacidad de elementos estructurales, el desempeño de diferentes sistemas estructurales y estudiar el efecto de dispositivos de control estructural. Todo esto con el fin de mejorar los códigos de diseño y construcción sismoresistentes.

En la actualidad, las mesas vibratorias son la aproximación más natural a los movimientos sísmicos, y la gran experiencia adquirida por el uso de simuladores sísmicos en trabajos investigativos hace que la ingeniería sísmica y su evolución se base fuertemente en la práctica (Sollogoub, 2007). los simuladores sísmicos se han desarrollado principalmente en USA y Japón iniciando desde poca capacidad de carga hasta miles de toneladas (Ogawa et al., 2001). Como prueba de lo anterior, en el mundo existen alrededor de 42 instalaciones con simuladores sísmicos de gran escala, los más relevantes son el simulador de la ciudad de Miki en Japón inaugurado en enero de 2006 con capacidad de 1,200 toneladas, y el simulador de Tadotsu también ubicado en Japón inaugurado en 1984, con capacidad de 1,000 toneladas (OECD/NEA, 2004). La Figura 1 muestra la cantidad de simuladores sísmicos en el mundo distribuidos por regiones y clasificados por su capacidad de carga (Elgamal et al., 2007).

Hoy en día, hay pocos reportes de artículos que refieran simuladores sísmicos para modelos estructurales a pequeña escala, dado que estos se pueden adquirir en empresas dedicadas al desarrollo de este tipo de equipos, como Quanser® (Quanser, 2010), sin embargo su alto precio y la no operabilidad de forma remota son unas de las carencias más relevantes.

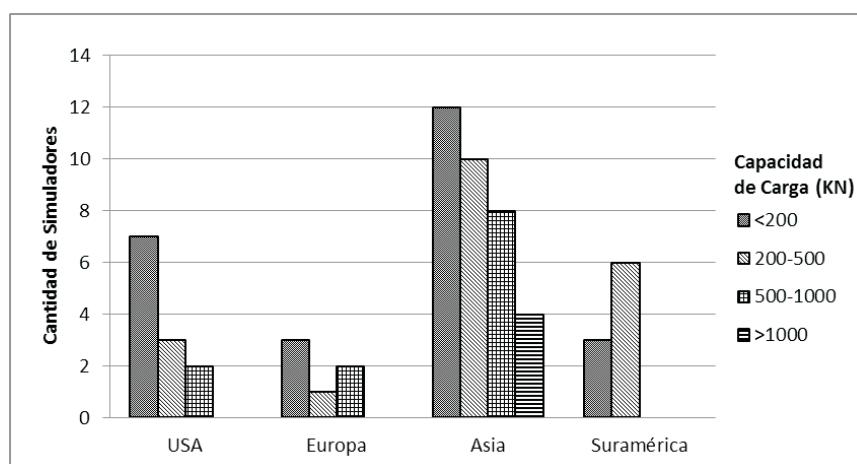


Figura 1. Cantidad de simuladores sísmicos en el mundo por regiones.

Debido a que más del 70% de la población en Colombia se encuentra ubicada en ciudades clasificadas por las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-98, 1998), como de intermedia y alta amenaza sísmica (caso de Bogotá, Medellín, Armenia, Manizales, Pereira, Cali, Buenaventura), es necesario garantizar que las edificaciones no sufran daño severo y aún peor, el colapso debido a excitaciones dinámicas. Por esta importante razón, sumada al auge que vive actualmente la Ingeniería Sísmica en Colombia, y la creciente motivación de la comunidad científica por investigar los efectos sísmicos sobre las estructuras en la búsqueda de nuevas ideas para minimizar daños y pérdidas humanas, se inició el diseño, construcción y validación de una mesa vibratoria a pequeña escala como complemento al simulador de gran capacidad de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle, pero con una característica especial en la era de las telecomunicaciones que hoy vivimos, su tele-operabilidad. Este desarrollo tecnológico sirve de apoyo a estudiantes de pregrado y postgrado en la investigación y complemento práctico de áreas tan importantes de la ingeniería como: la Ingeniería de Control, la Ingeniería Sísmica y la Dinámica Estructural.

## 2. Diseño del simulador sísmico

Dado que algunos de los efectos destructivos de los sismos son el resultado de la vibración horizontal en las estructuras (Guclu, 2006), el simulador sísmico se diseña para generar excitaciones unidireccionales. Las etapas del proceso de diseño y construcción del simulador sísmico se resumen en el diagrama de flujo de La Figura 2.

El dispositivo que mueve la mesa vibratoria consiste fundamentalmente en un motor que se desliza por medio de un sistema de rodamiento lineal y está ajustado fuertemente a una placa de aluminio o área de carga de la mesa vibratoria (donde se instala la estructura). El movimiento del motor es monitoreado y controlado por un servocontrolador que recibe una señal de referencia de desplazamiento y una señal de realimentación proveniente de un encoder lineal que mide los desplazamientos de la mesa vibratoria. La señal de referencia es generada en un computador y enviada en forma de voltaje a través de una tarjeta de adquisición y control de datos hacia el servocontrolador. La Figura 3 presenta un diagrama donde se pueden observar los componentes y el funcionamiento básico del simulador.

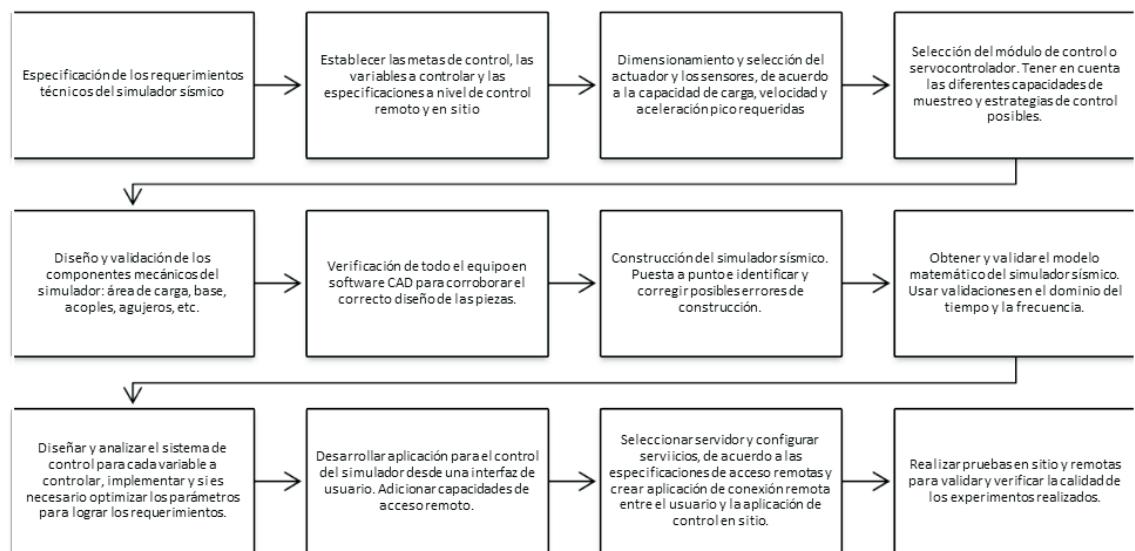


Figura 2. Diagrama de flujo de las etapas de diseño y construcción de la mesa vibratoria.

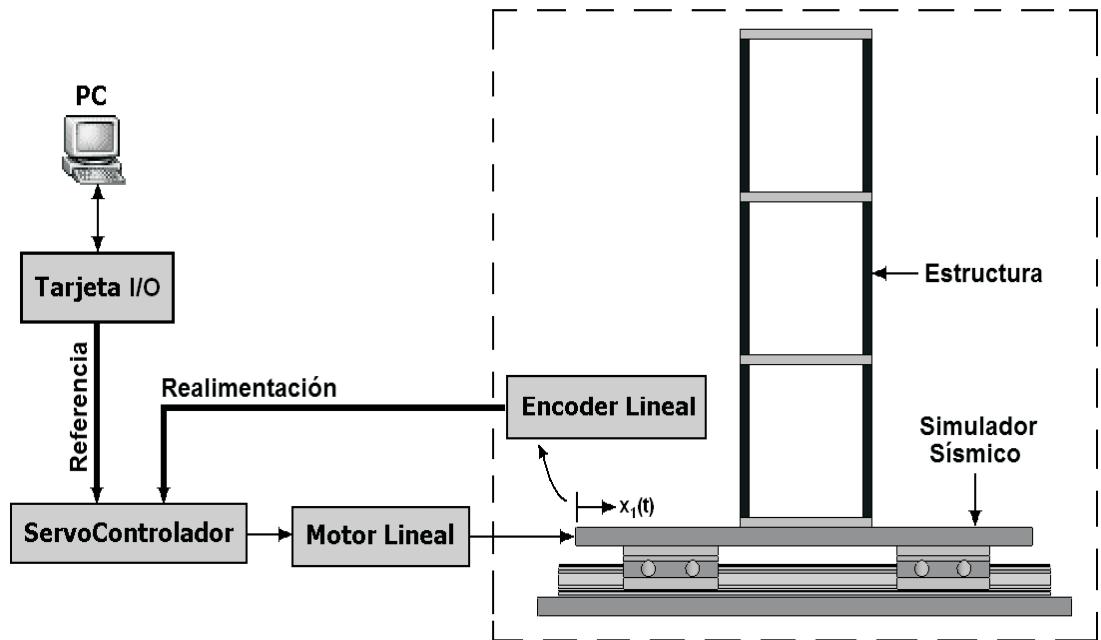


Figura 3. Diagrama esquemático de la mesa vibratoria.

## 2.1. Especificaciones técnicas

La base del diseño lo hacen las especificaciones deseadas del simulador sísmico, éstas varían para cada caso dependiendo de la calidad y precisión de la reproducción del sismo, los movimientos a realizar, la capacidad de carga y su desplazamiento, velocidad y aceleración máximas. Las características de La Tabla 1 le permiten a este simulador sísmico realizar ensayos de vibración libre, armónica, periódica y aleatoria (sismos) a estructuras pequeñas y fueron definidas para estar por encima de la aceleración máxima del suelo de cualquier sismo real conocido.

## 2.2. Sistema de rodamiento lineal

La selección del sistema de rodamiento lineal para el simulador sísmico se fundamenta en un sistema que supere los requerimientos de carga y desplazamiento del simulador, con muy baja fricción y que soporte altas velocidades. Los monorrieles lineales de perfil redondo resultaron ser una buena opción, principalmente por su bajo costo, recorrido suave, bajo valor del coeficiente de fricción y velocidades hasta 2m/s. Dado lo anterior, se selecciona un par de guías lineales de

perfil redondo con dos cojinetes en cada guía, capaz de soportar hasta 32,000n. Cada cojinete viene con un sistema de lubricación para producir la mínima fricción entre la guía lineal y el cojinete.

## 2.3. Motor lineal

Desde la introducción de máquinas de alta velocidad con tecnología DDL (Direct DriveLinear) en los 90s, los motores lineales han sido ampliamente conocidos por su aplicación en máquinas y herramientas, donde se requiere alta velocidad, alta precisión y largos desplazamientos (Yan and Shiu, 2008). Entre los motores lineales existentes, los motores lineales síncronos de imán permanente (PMLSM) son quizás los más empleados por sus méritos en alta aceleración y empuje (Gieras & Piech, 2000). Por esto, se selecciona un motor lineal como elemento para generar movimiento, además porque no requiere de elementos de transmisión como cajas reductoras, cadenas o tornillos de acople para convertir el movimiento rotacional a translacional, representando menor fricción, cero huelgos, no hay limitaciones mecánicas en aceleración y velocidad, más confiabilidad y mayor tiempo de vida del equipo (Hsue et al., 2007).

Tabla 1. Especificaciones del simulador sísmico

Especificación	Valor	Unidades
Dimensiones del área de carga	50x50x1.2	cm
Dimensiones de la base	60x50x1.2	cm
Máxima capacidad de carga	20	Kg
Recorrido máximo	15	cm
Ancho de banda	20	Hz
Aceleración pico	2.5	g's

Para iniciar la selección del motor se define la carga máxima, así:

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + 4m_4 \quad (1)$$

$$M = 20\text{Kg} + 8\text{Kg} + 0 + 4(0.3\text{Kg}) = 29.2\text{Kg} \quad (2)$$

Donde,

- $m_1$ , Masa máxima de la estructura.
- $m_2$ , Masa de la placa de aluminio.
- $m_3$ , Masa móvil del motor lineal (queda definida luego de seleccionar el motor).
- $m_4$ , Masa de cada cojinete

Luego, se calcula la fuerza requerida por el motor lineal para acelerar la carga máxima a su valor pico (ver Tabla 1):

$$F = Ma + \mu N \quad (3)$$

$$F = 29.2\text{Kg} \times 25\text{m/s}^2 + 0.016 \times 29.2\text{Kg} \times 9.8\text{m/s}^2 = 734\text{N} \quad (4)$$

Donde  $a$  es la aceleración máxima del simulador,  $\mu$  es el coeficiente de fricción entre las guías lineales y el sistema de rodamiento,  $N$  es la fuerza normal y  $F$  es la fuerza máxima requerida por el motor para cumplir los requerimientos suponiendo que el motor no tiene masa móvil. Se selecciona un motor lineal con una fuerza superior a la encontrada y se vuelve a realizar el cálculo teniendo en cuenta que a la carga máxima  $M$  se le debe adicionar la masa móvil del motor lineal.

Se selecciona un motor lineal que posee una fuerza continua y pico de 1,255N y 2,500N, respectivamente. Ahora se calcula la fuerza requerida por el motor teniendo en cuenta que la masa del motor es 14.2Kg y que el motor tiene una fuerza de atracción de 9,900N debido a su núcleo de hierro.

$$M = 20\text{Kg} + 8\text{Kg} + 14.2\text{Kg} + 4(0.3\text{Kg}) = 43.4\text{Kg} \quad (5)$$

$$f = 43.4\text{kg} \times 25\text{m/s}^2 + 0.016 \times (43.4\text{kg} \times 9.8\text{m/s}^2 + 9,900\text{N}) = 1,250.2\text{n} \quad (6)$$

del anterior cálculo se deduce que el motor seleccionado puede acelerar su propio peso junto con el sistema de rodamiento, el área de carga y

una estructura de 20kg de forma continua hasta 25m/seg<sup>2</sup> para cumplir fácilmente con sus requerimientos.

#### 2.4. Servo-controlador/amplificador

La selección del controlador/amplificador para el motor lineal se fundamenta en un servo-controlador diseñado para motores lineales que sea capaz de entregar al motor las corrientes nominal y pico que va a consumir durante su movimiento (5A y 11.3A, respectivamente).

Se selecciona un servo-controlador que puede suministrar corrientes nominal y pico de 6A y 18A, respectivamente. además tiene un sistema de control en cascada embebido para motores lineales con lazos de control de corriente, velocidad y posición, acciones feedforward de velocidad y aceleración, compensación de fricción, *cogging* y *ripple*, entrada +/-10V para setpoint externo, y tasas de muestreo para los lazos de posición, velocidad y corriente de 2,000Hz, 4,000Hz y 16,000Hz, respectivamente. la fuerza de *cogging* es una fuerza magnética desarrollada por la atracción entre los imanes permanentes y el núcleo de hierro del motor, la cual sólo depende de

la posición relativa de las bobinas del motor con respecto a los imanes. la fuerza de *ripple* es desarrollada debido a la variación periódica de la constante de fuerza del motor; es decir, cuando la posición del motor cambia, la inductancia de los devanados varía, resultando en el cambio de la constante de fuerza por el propio desplazamiento del motor (Yao and Xu, 2002).

La selección del dispositivo de realimentación está ligada a las especificaciones del servo-controlador o viceversa, en este caso, el servo provee las especificaciones, así que se selecciona un encoder lineal para medir desplazamientos hasta 21cm, salidas diferenciales tipo RS-422 y velocidad máxima de 4m/s.

#### 2.5. Área de carga, base y acoples

Con la especificación de las guías lineales, los requerimientos del área de carga (ver Tabla 1) y las dimensiones del motor lineal, se diseña la pieza donde se van a instalar las estructuras de prueba del simulador sísmico. el material seleccionado es aluminio por ser un material liviano y de rigidez suficiente para esta aplicación.

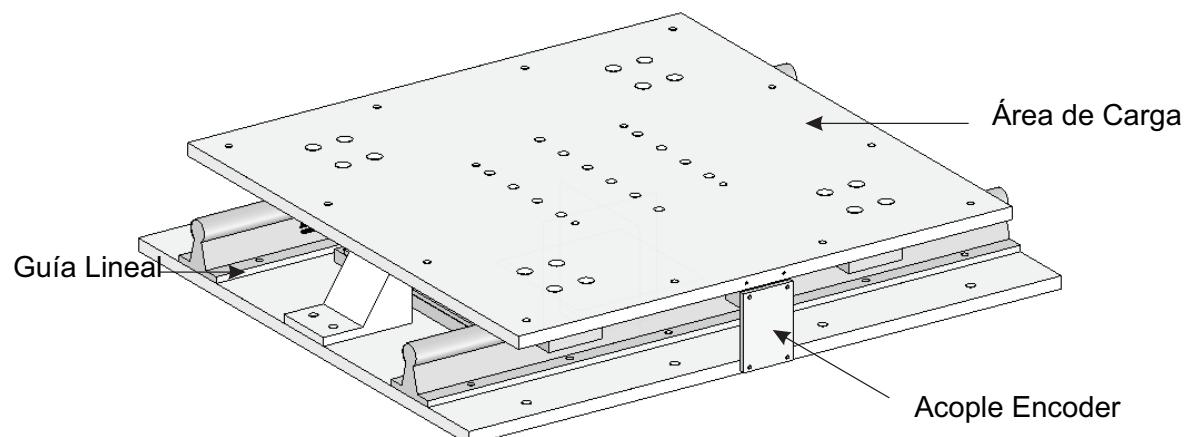


Figura 4. diseño del simulador sísmico.

Una vez diseñadas las placas de la mesa vibratoria, se diseña un acople para instalar el encoder lineal de forma que se cumplan los requerimientos de instalación. adicionalmente, se diseñan dos topes físicos dotados de espuma de alta densidad para limitar desplazamientos no deseados en el simulador. el diseño se puede detallar en la Figura 4.

Definidas, seleccionadas y diseñadas todas las piezas del simulador sísmico, se procede a validar el diseño mecánico elaborando un modelo del simulador en 3D con el fin de comprobar que ningún elemento esté en conflicto con otro o si existe alguna colisión entre piezas. luego de una detallada verificación del conjunto en 3D de la mesa vibratoria se confirma que no existen conflictos, agujeros errados o colisiones en el diseño. la Figura 5 muestra el diseño del simulador sísmico y sus partes internas.

### 3. Construcción del simulador sísmico

Una vez diseñadas y seleccionadas todas las piezas y componentes de la mesa vibratoria se procede a ensamblar e instalar cada pieza. la Figura 6 muestra una fotografía de la mesa vibratoria construida. se puede detallar el gran parecido del simulador sísmico construido al del diseño en 3D. Las Figuras 7, 8 y 9 muestran fotos que detallan los componentes del simulador sísmico.

### 4. Modelado y control

El motor considerado aquí es un motor lineal síncrono de núcleo de hierro, imán permanente y tres fases, que mueve una plataforma con rodamientos lineales. su modelo dinámico es similar al de los motores síncronos rotatorios. se asume que los devanados de las tres fases de la armadura de las guías magnéticas producen una distribución simétrica y sinusoidal, de modo que la fuerza contra-electromotriz tiene una función sinusoidal y el efecto final es despreciable. el modelo matemático está descrito por la siguiente ecuación diferencial (Famouri, 1992, Gieras & Piech, 2000, Tan et al., 2004):

$$u(t) = k_e \frac{dx(t)}{dt} + Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (7)$$

$$i(t) = \frac{1}{k_f(x)} f(t) \quad (8)$$

$$f(t) = m \frac{ddx(t)}{dt^2} + f_{load}(t) + f_{fric} \left( \frac{dx(t)}{dt} \right) + f_{cogging}(x) + f_n(t) \quad (9)$$

$$k_f(x) = \bar{k}_f + k_{fx}(x) \quad (10)$$

Donde,  $u(t)$  es el voltaje en los terminales del motor,  $i(t)$  es la corriente de cada fase de armadura,  $x(t), \dot{x}(t), \ddot{x}(t)$  son el desplazamiento, velocidad y aceleración del motor, respectivamente,  $f(t)$  es la fuerza desarrollada por el motor,  $f_{load}(t)$  es la fuerza de carga,  $f_{fric}(\dot{x})$  denota la fuerza de fricción,  $f_{cogging}(x)$  denota la fuerza de cogging,  $f_n(t)$  incluye otras incertidumbres y disturbios del sistema,  $R$  es la resistencia eléctrica de cada fase del motor,  $L$  es la inductancia eléctrica de cada fase del motor,  $k_e$  es la constante de fuerza contra-electromotriz,  $k_f$  es la constante de fuerza del motor incluyendo sus variaciones debido al ripple,  $m$  es la masa móvil del simulador sísmico. La Figura 10 muestra el diagrama de bloques del motor incluyendo sus no linealidades.

Para motores lineales de núcleo de hierro, el modelo matemático de las Ec.(7) a Ec.(10) es muy común, ya que debido a su particular estructura se generan fuerzas como cogging y ripple.

El sistema de control del simulador sísmico que se encuentra embebido en el servocontrolador posee tres lazos de control en cascada, estos son de

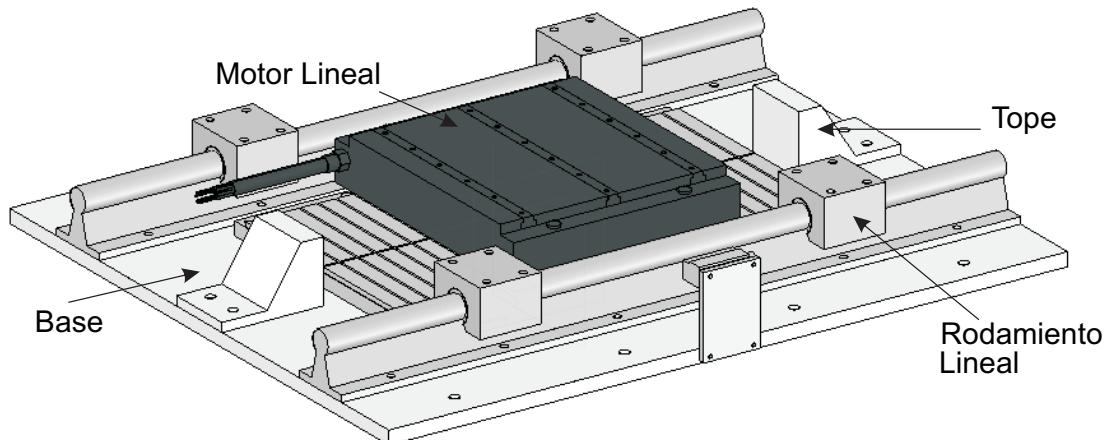


Figura 5. Partes internas del diseño del simulador sísmico.



Figura 6. Fotografía del simulador sísmico.

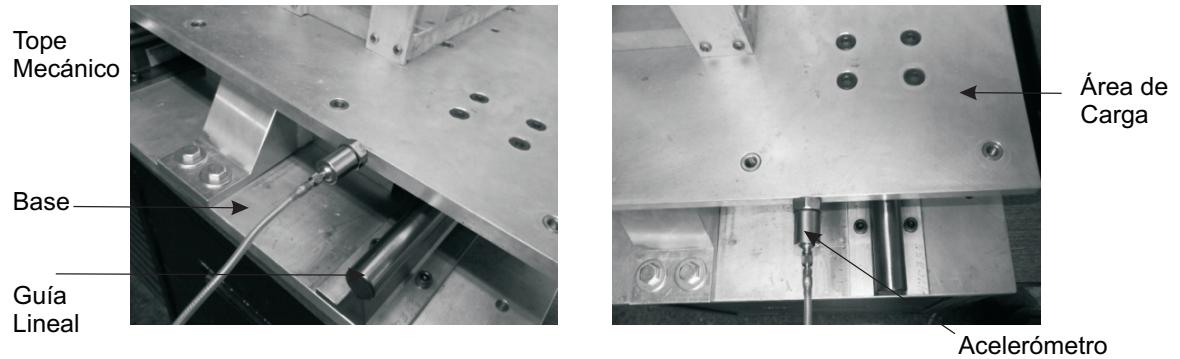


Figura 7. Fotos del simulador sísmico detalle 1.

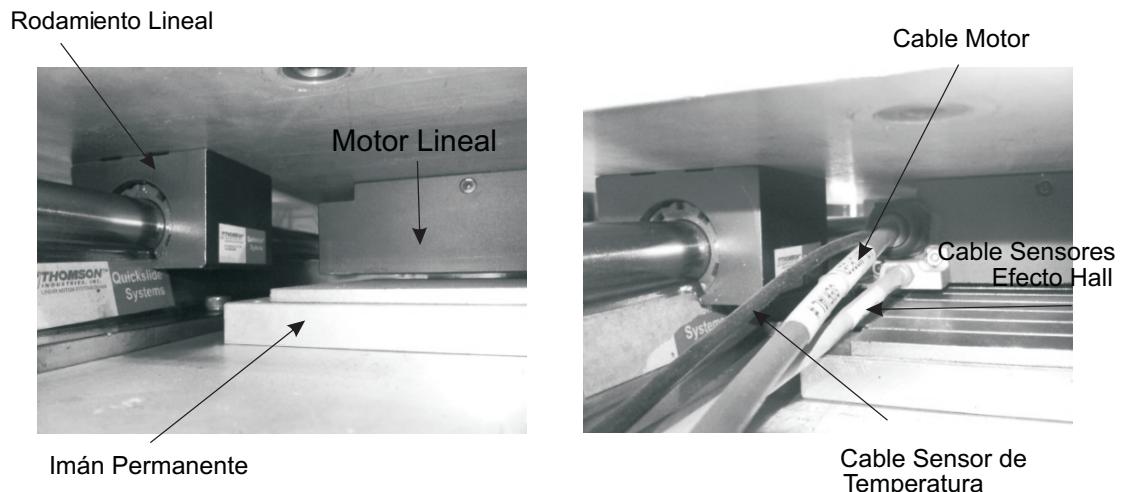


Figura 8. Fotos del simulador sísmico detalle 2.

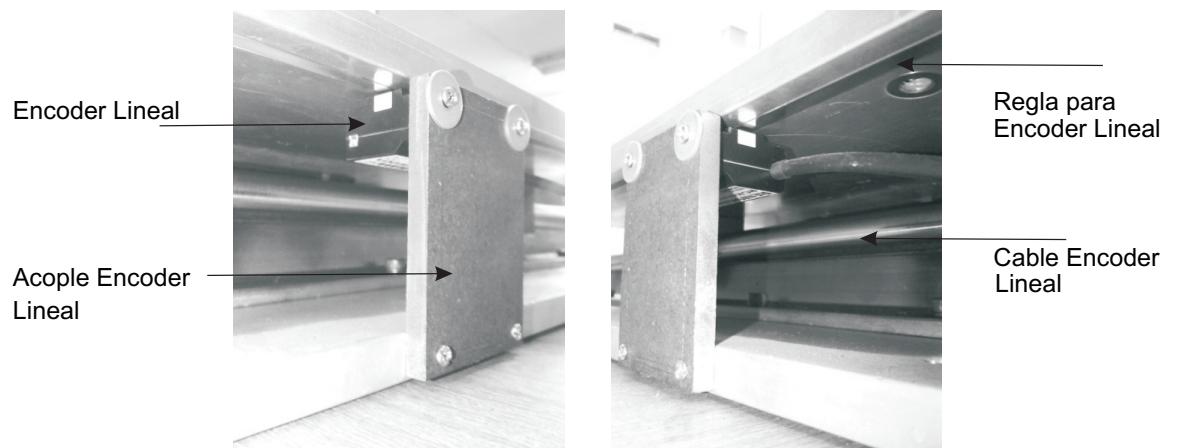


Figura 9. Fotos del simulador sísmico detalle 3.

posición. El controlador del lazo de corriente es uno de los controladores más importantes en este sistema, dado que facilita la sintonización de los lazos externos porque contiene algoritmos de control adaptativos que compensan en gran parte las no linealidades del motor y provee un ancho de banda cercano a 500Hz al lazo de corriente.

Dadas las anteriores características, el lazo de corriente puede aproximarse a un sistema de primer orden o despreciarse en el diseño del control de velocidad, y el resto de fuerzas pueden tomarse como disturbios.

La Figura 11 muestra un diagrama de la aproximación. De lo anterior se puede hallar la dinámica del lazo cerrado de velocidad con un control proporcional conocido y a partir de esta despejar las dinámicas a controlar. Este procedimiento se detalla en la Figura 12.

Para encontrar el modelo del lazo de velocidad, se utiliza un procedimiento de identificación con una señal binaria pseudoaleatoria (PRBS) de contenido frecuencial hasta 90Hz y un controlador proporcional igual a 500. En el procedimiento se encontraron dos modelos matemáticos: uno de primer orden con un índice de ajuste de 86.59% y otro de segundo orden con un ajuste de 88.33%. La Figura 13 muestra la comparación de las respuestas de los modelos encontrados y la velocidad medida en el experimento.

El índice de ajuste de los modelos identificados muestra que son buenos candidatos para el proceso de diseño del control de velocidad, sin embargo un análisis más detallado, como las respuestas en frecuencia de la Figura 14 que compara las respuestas de ambos modelos con la respuesta en frecuencia experimental, provee información de la aproximación de los modelos a alta frecuencia, siendo el modelo de segundo orden el más conveniente para el rango de frecuencias de interés.

El modelo encontrado luego del proceso de identificación es (despreciando el tiempo muerto):

$$G_{vlc}(s) = \frac{34,783.6}{(s+127.6)(s+293.8)} \quad (11)$$

Con  $G_{vlc}(s)$  y  $K_{pv} = 500$  se encuentra la dinámica de lazo abierto  $G_{vla}(s)$ . El sistema a controlar es el siguiente:

$$G_{vla}(s) = \frac{G_{vlc}(s)}{K_{pv} - K_{pv}G_{vlc}(s)} = \frac{69.567}{(s+414.900)(s+6.526)} \quad (12)$$

Luego, para sintonizar el controlador de velocidad se busca un  $K_{pv}$  que aumente el ancho de banda del sistema a 40Hz, sin permitir un sobrepaso superior a 10% en la respuesta ante el escalón. Se utiliza la siguiente condición de magnitud:

$$20 \log_{10} \left( \left| \frac{K_{pv}G_{vla}(s)}{1 + K_{pv}G_{vla}(s)} \right|_{s=2\pi 40j} \right) = -3dB \quad (13)$$

$$K_{pv} \cong 1,092 \quad (14)$$

Ahora, se diseña un controlador de posición para obtener un ancho de banda de 20Hz y sobrepaso inferior a 10%. El sistema a controlar es el siguiente:

$$G_{pla}(s) = \frac{K_{pv}G_{vla}(s)}{s(1 + K_{pv}G_{vla}(s))} = \frac{75,967.455}{s(s^2 + 421.416s + 78,675.072)} \quad (15)$$

Se utiliza la condición de magnitud en la frecuencia deseada de ancho de banda para obtener la ganancia proporcional del controlador de posición, así:

$$20 \log_{10} \left( \left| \frac{K_{pp}G_{pla}(s)}{1 + K_{pp}G_{pla}(s)} \right|_{s=2\pi 20j} \right) = -3dB \quad (16)$$

$$K_{pp} \cong 74 \quad (17)$$

El diseño de los controladores de velocidad y posición suministran en simulación el ancho de banda deseado y márgenes de estabilidad de 15.4dB en margen de ganancia y 68° de margen de fase, sin embargo una verificación experimental

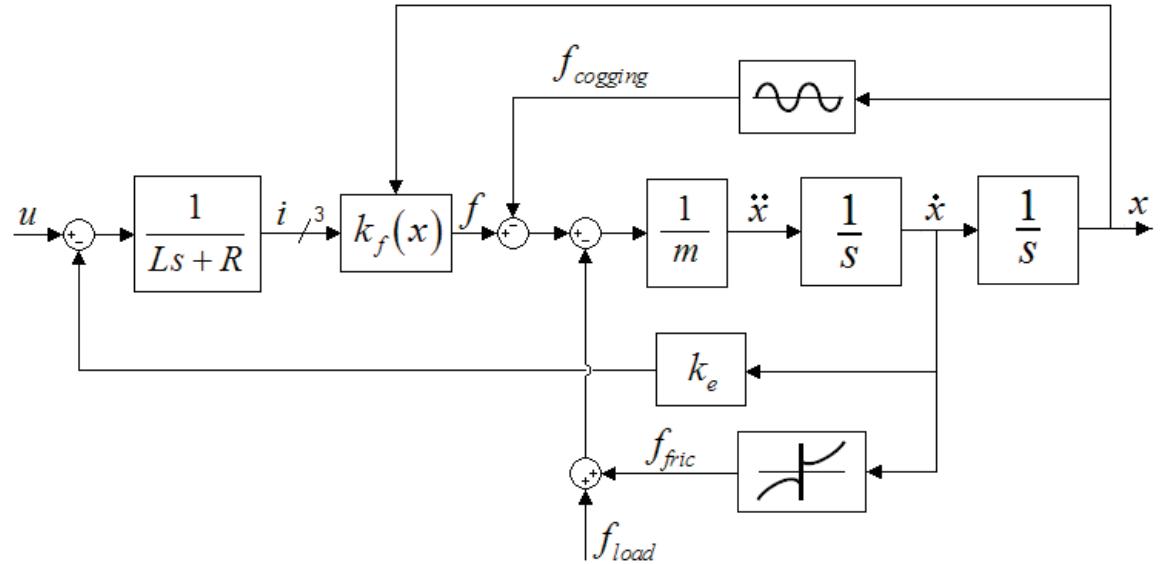


Figura 10. Diagrama de bloques del motor lineal en lazo abierto.

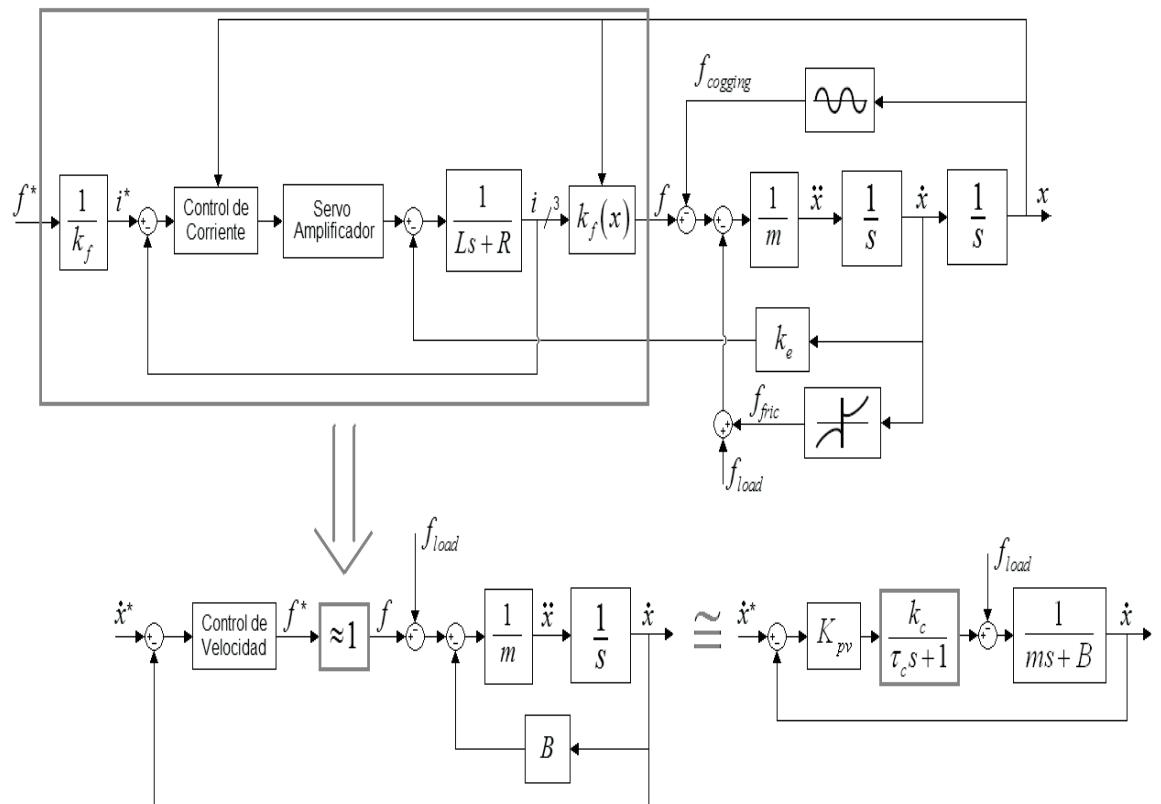


Figura 11. Sistemas de control de corriente y velocidad del motor lineal.

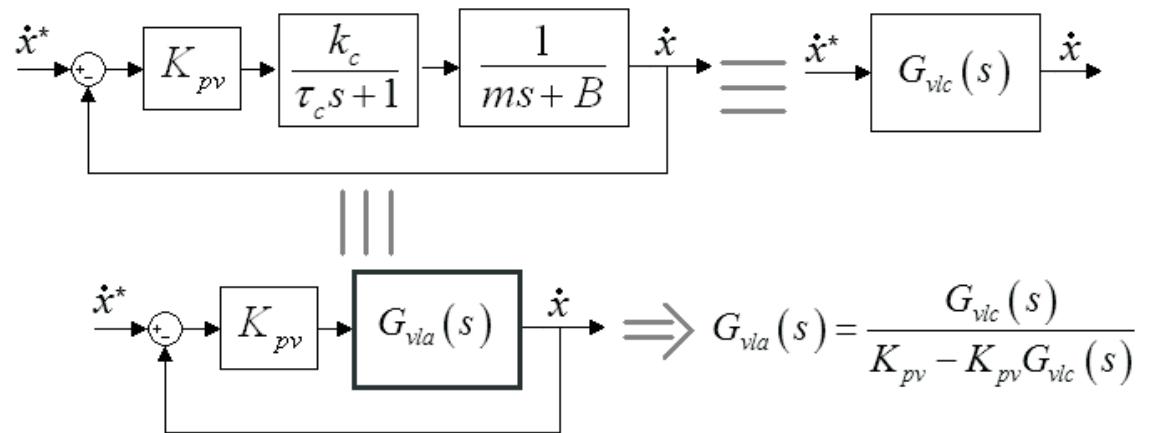


Figura 12. Dinámicas de lazo abierto a partir de las dinámicas de lazo cerrado.

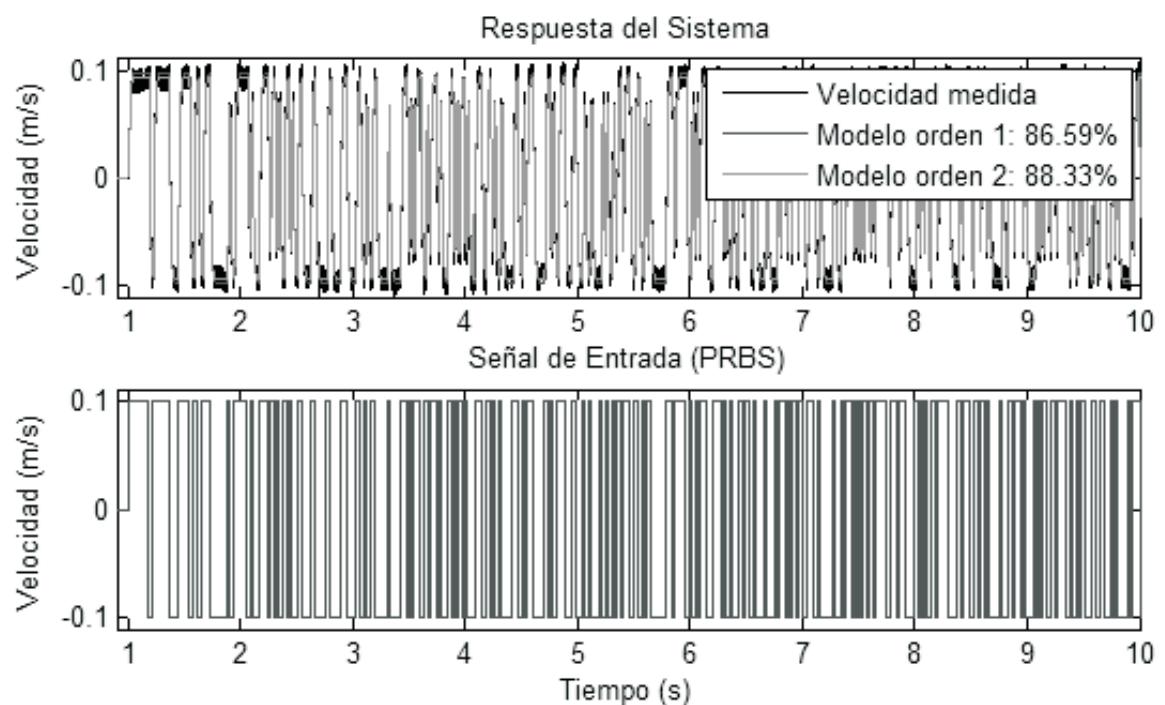


Figura 13. Experimento de identificación del lazo de velocidad.

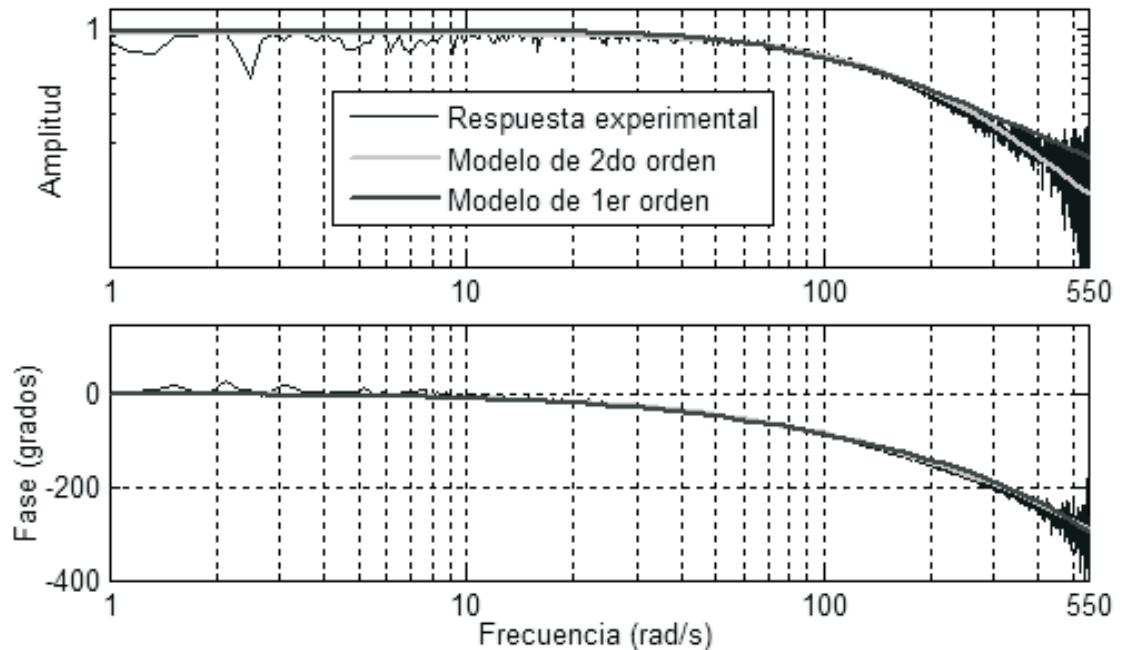


Figura 14. Respuesta en frecuencia de los modelos identificados y la respuesta experimental.

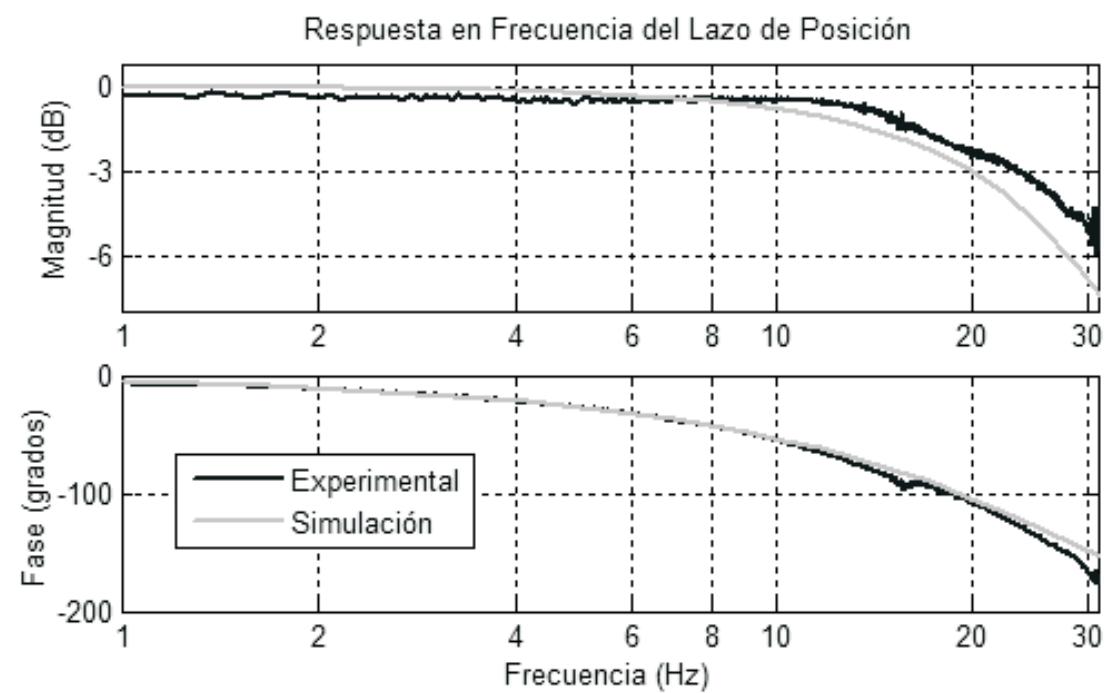


Figura 15. Respuesta en frecuencia del lazo de posición.

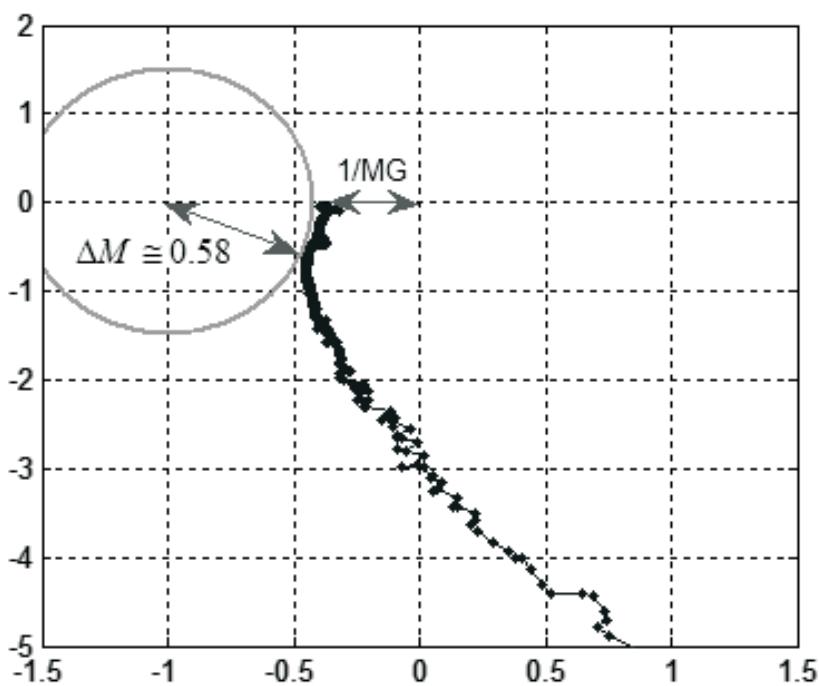
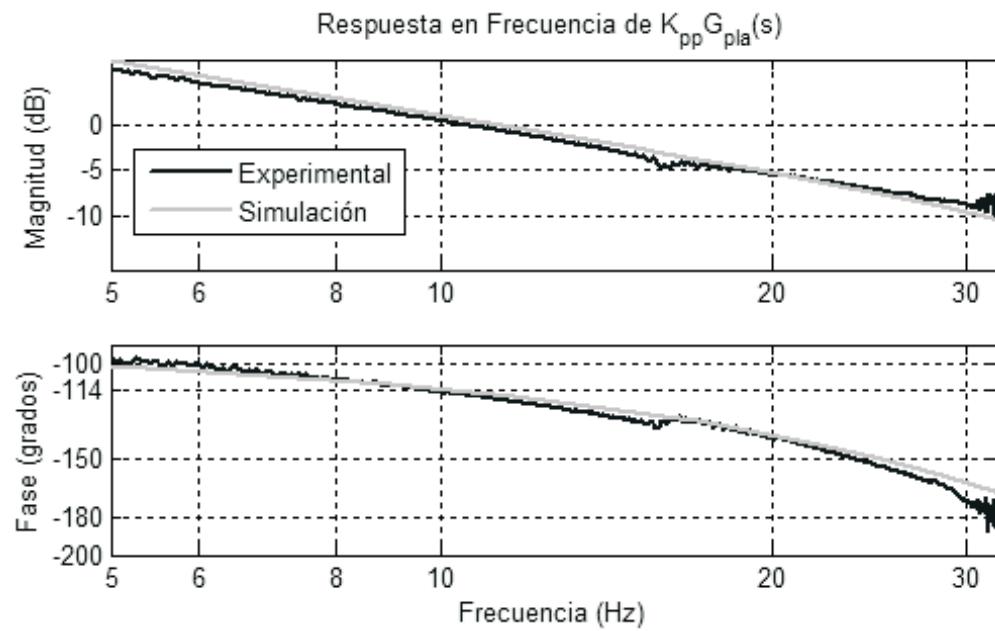


Figura 16. Gráfica de Bode (arriba) y de Nyquist (abajo) de  $K_{pp}G_{pla}(s)$ .

del desempeño de los lazos de control y de sus márgenes de estabilidad es necesaria. La Figura 15 muestra la gráfica de bode experimental y del modelo del lazo de posición obteniéndose un ancho de banda real del sistema que supera los 20Hz.

La Figura 16 detalla la respuesta en frecuencia de la función de transferencia de lazo directo del sistema de control de posición; por un lado la gráfica de Bode muestra que el margen de fase es de  $65^\circ$  y el margen de ganancia (MG) es casi 10dB; y por otro lado, la gráfica de Nyquist muestra que el margen de módulo del sistema es aproximadamente 0.58.

Los anteriores indicadores sugieren que el sistema de control implementado es lo suficientemente robusto para mantener la estabilidad y desempeño del sistema ante posibles cambios en la masa de las estructuras que se instalan sobre la plataforma del simulador. Esto se comprueba experimentalmente

al realizar pruebas tipo escalón al simulador sísmico con diferente carga. Los experimentos se pueden observar en la Figura 17. El análisis de los resultados muestra que el máximo sobrepuerto varía de 3% a 4.6% con variaciones de carga en la plataforma entre 6Kg y 87Kg.

## 5. Resultados experimentales

Una vez construida la mesa vibratoria y sintonizado su sistema de control, se realizaron diferentes pruebas para validar la respuesta del simulador. Las Figuras 18 y 19 presentan los resultados de la prueba de simulación del sismo de Armenia del año 1999 orientación Este-Oeste. En esta prueba se instrumentó la base del simulador con un acelerómetro y se instaló una estructura de 10Kg. La Figura 18 muestra a la izquierda los desplazamientos del simulador y del sismo de Armenia, y a la derecha el error de seguimiento.

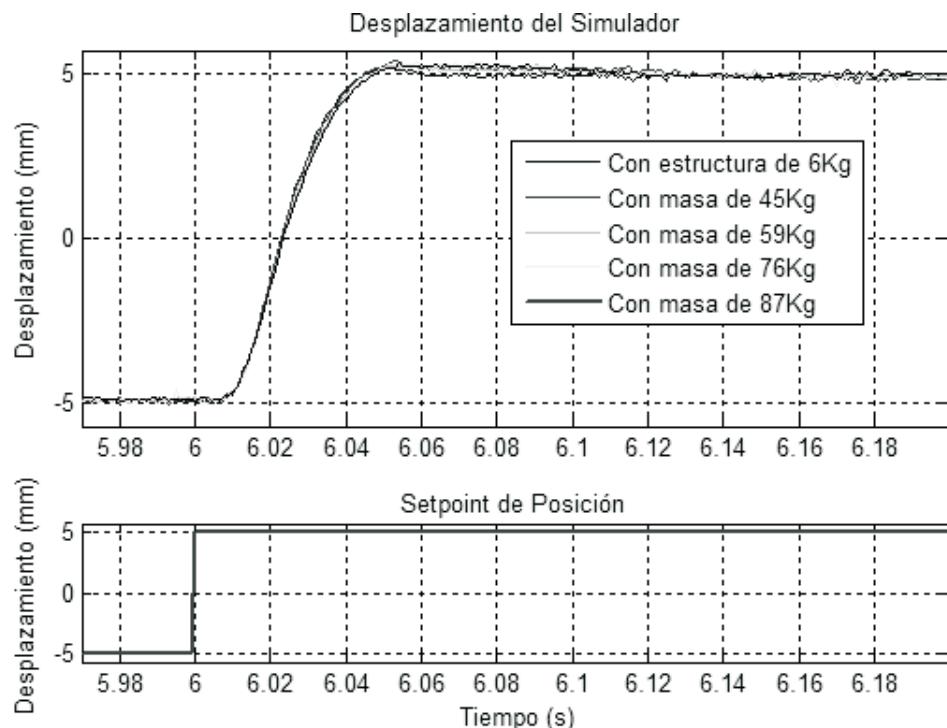


Figura 17. Desempeño del sistema de control ante cambios en la masa.

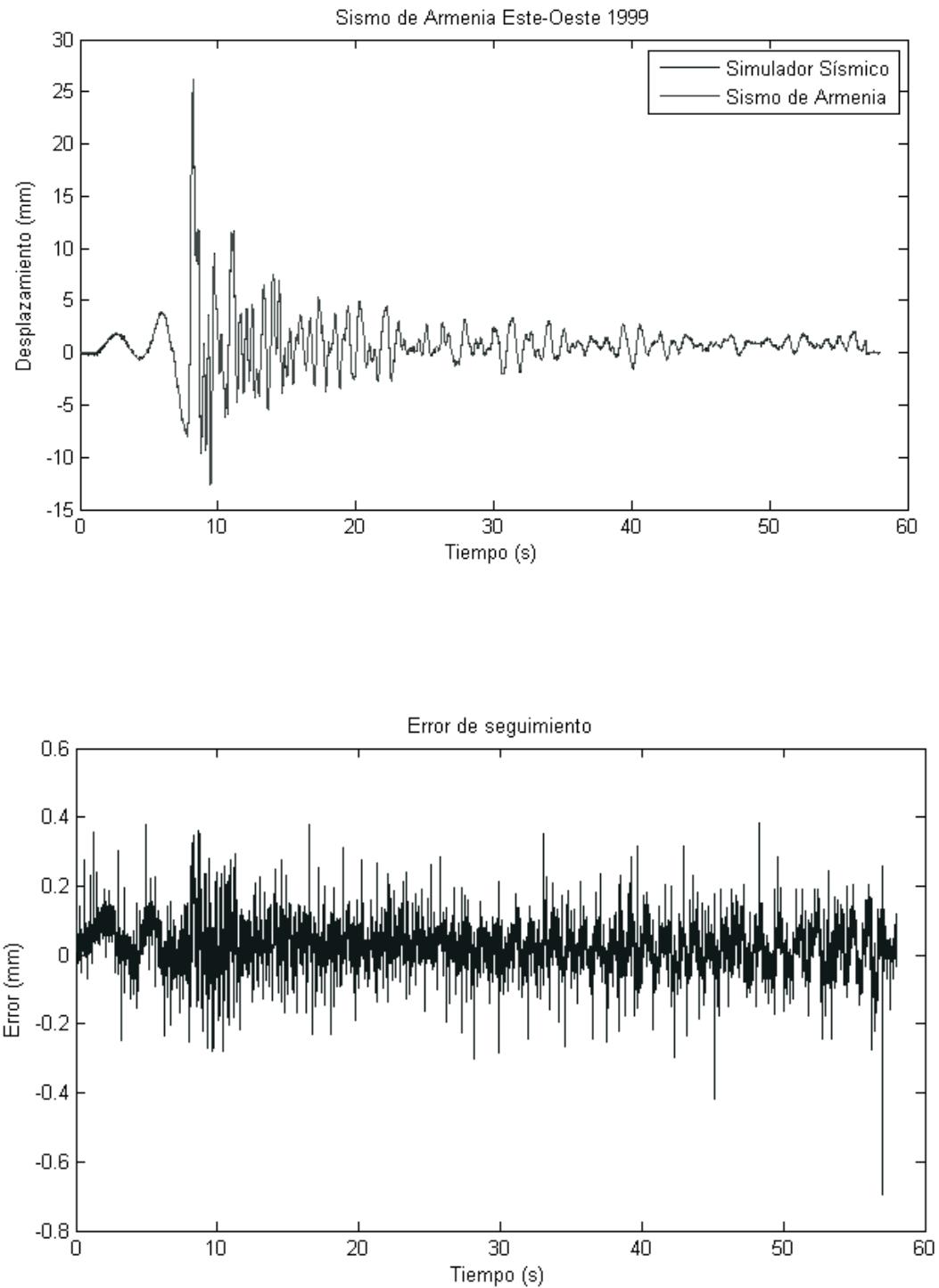


Figura 18. Desplazamientos del simulador y sismo de Armenia (arriba) y Error de seguimiento (abajo).

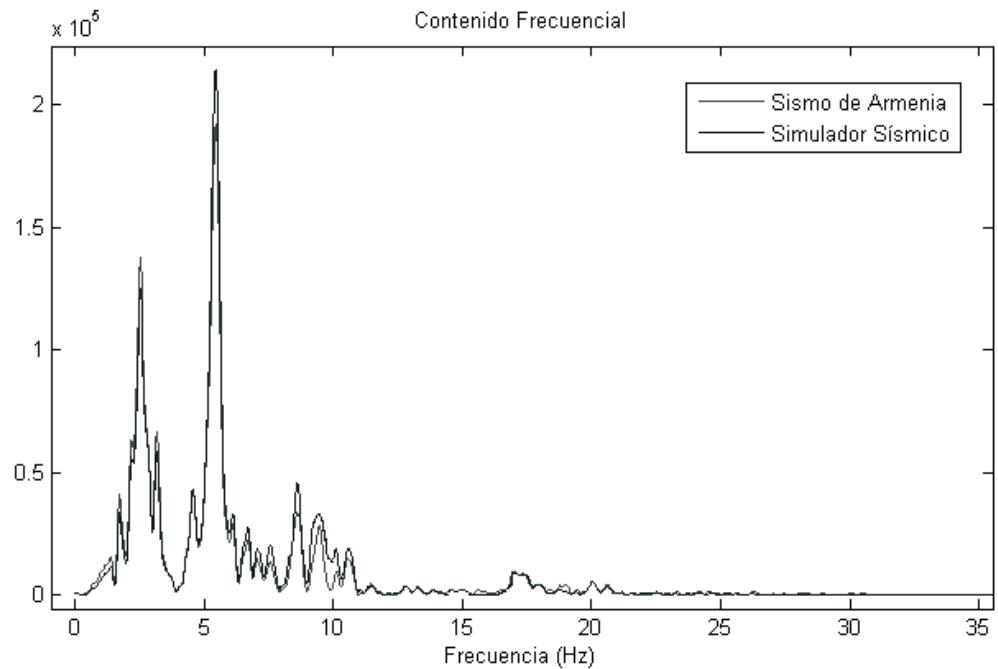


Figura 19. Contenido frecuencial del sismo de Armenia y del simulador.

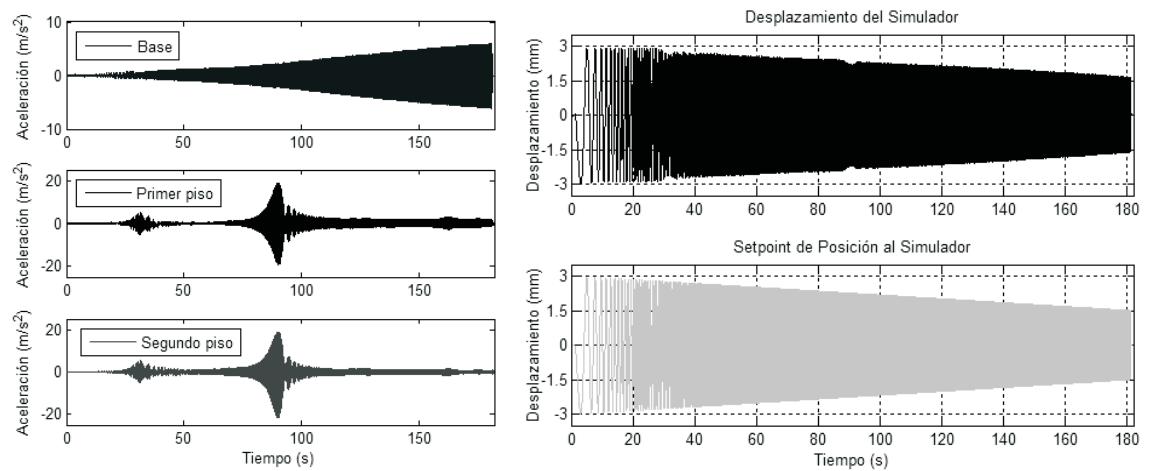


Figura 20. Prueba de vibración forzada a una estructura de dos pisos.

La Figura 19 muestra el contenido frecuencial del sismo de Armenia (contenido frecuencial deseado) y el contenido frecuencial de la aceleración generada por el simulador.

La Figura 20 muestra los resultados obtenidos luego de realizar un barrido frecuencial con el simulador sísmico hasta 10Hz a una estructura prototípica de dos niveles. A la izquierda se aprecian las aceleraciones generadas en la base, primer y segundo piso de la estructura, mientras que a la derecha se observa el desplazamiento deseado del simulador (verde) y el desplazamiento medido (negro) con error de seguimiento promedio de 0.93%.

Además del diseño y construcción del Simulador Sísmico, se implementó una herramienta que permite utilizarlo vía web y realizar pruebas de acuerdo al protocolo establecido en los *Laboratorios Remotos de Estructuras e Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural* de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle (Gómez et al., 2008). La Figura 21 muestra la estructura de interconexión del Laboratorio Remoto. Puede observarse que los servidores y terminales se conectan por medio de un *switch*. En la Figura 21 se observan dos categorías de servidores, los cuales son:

*Terminal de experimentación:* Equipo servidor que se encuentra conectado al módulo experimental y procesa las peticiones

relacionadas con el control remoto del proceso. Cuenta con servidor web Apache HTTP Server, contenedor de servlets Apache TOMCAT, MatlabR2007b, servidor de cámara web Dorgem, y sistema operativo Windows XP-SP2. Sólo será accesible en el momento de la experimentación y por el(s) usuario(s) autorizado(s) para tal fin.

*Servidor Central:* Este servidor se encarga de almacenar las páginas de acceso de los usuarios, la interfaz de administración del entorno, los programas de gestión de usuarios y la única base de datos del Laboratorio. Dispone de servidor web Apache HTTP server, preprocesador PHP y motor de base de datos MySQL.

Para realizar pruebas de control remoto, se deben realizar los siguientes pasos: Los administradores, por medio de la interfaz administrativa desarrollada para el entorno, configuran los experimentos (horarios de uso, cantidad de sensores y actuadores, rangos de variables, estrategias de control, entre otras), al igual que la asignación de recursos para los usuarios, de acuerdo al perfil de éste y/o las asignaturas que tengan inscritas en su semestre de estudios. Estas acciones se reflejan en la configuración de las variables en cliente y servidor durante la experimentación remota y en las páginas de acceso de los usuarios al Laboratorio Remoto.

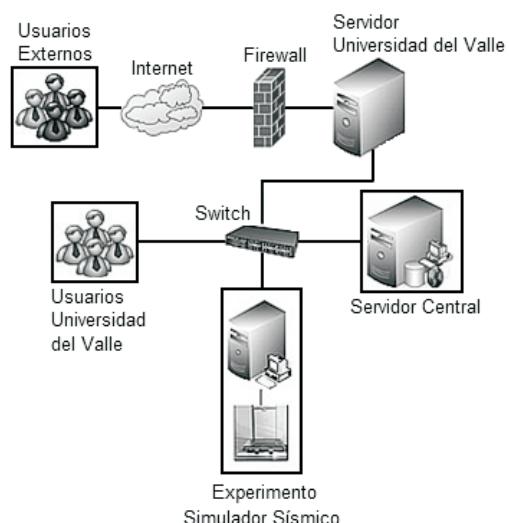


Figura 21. Esquema de interconexión del Laboratorio Remoto.

Los usuarios pueden recorrer el sitio del laboratorio remoto, accediendo a recursos informativos básicos. Sólo podrá acceder a material restringido (guía de laboratorio, aplicación para la experimentación a distancia) previo inicio de sesión e inscripción en el experimento, según los privilegios asignados por el administrador. Estas funciones son realizadas por los programas de gestión en el Servidor Central. El usuario inicia su experimento accediendo directamente al módulo experimental apropiado, después de que los programas de gestión del servidor central comprueben que está accediendo según la reserva realizada con anterioridad.

El usuario accede al experimento y carga un applet desarrollado en Easy Java Simulations (Esquembre, 2008), herramienta que facilita el desarrollo de entornos virtuales con la posibilidad de integrar clases y programas diseñados en Java. La aplicación le permite al cliente: (a) Iniciar, reiniciar o detener el experimento, (b) configurar y previsualizar la señal de excitación del simulador, (c) visualizar la información de datos adquiridos en animaciones y gráficos, (d) visualización de video en línea del experimento.

La aplicación cliente contiene una serie de hilos que se encargan de monitorear los eventos del servidor (inicio y finalización del proceso de excitación del simulador) y del cliente (inicio, reinicio o finalización de la práctica), lo que implica habilitar o deshabilitar mandos y enviar las órdenes correctas al servidor. Por su lado el servidor tiene dos servidores activos, el terminal de experimentación del Simulador sísmico y el Servidor Central, donde se encuentra la base de datos. El primero de ellos, ejecuta un programa de adquisición de datos en Matlab®, gracias al uso de una interfaz java-Matlab, por la cual se inician funciones de la herramienta por medio de una conexión por sockets (Whitehouse, 2008). Dado que este programa es bloqueante, la comunicación de datos y eventos con el cliente se realiza mediante algunas tablas dedicadas en la Base de Datos del servidor central, usando el Database Toolbox de Matlab®. Aparte del programa en Matlab®, se están ejecutando los servlets que procesan las peticiones del cliente, provenientes como mensajes HTTP y las procesa de manera adecuada (consulta de eventos e información adquirida por sensores alojada en la base de datos y la orden de ejecución del programa de control remoto).

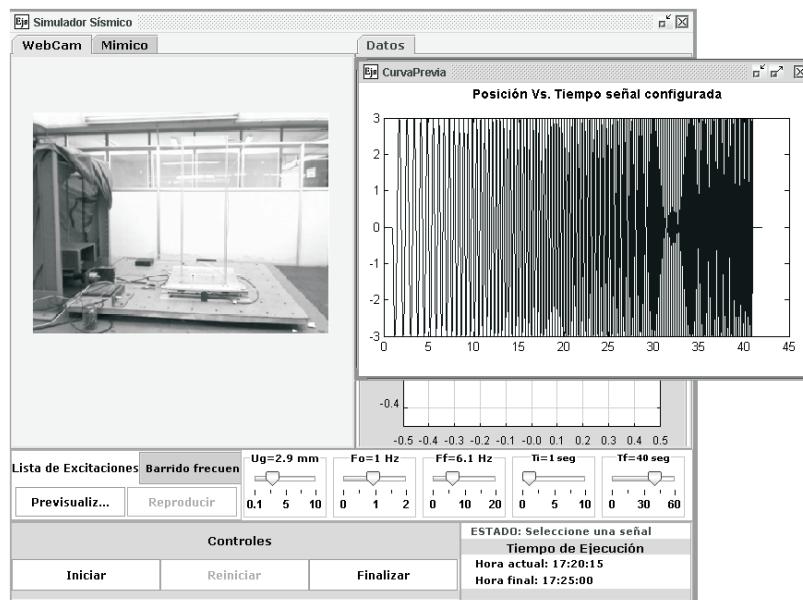


Figura 22. Configuración de la señal de excitación en el cliente.

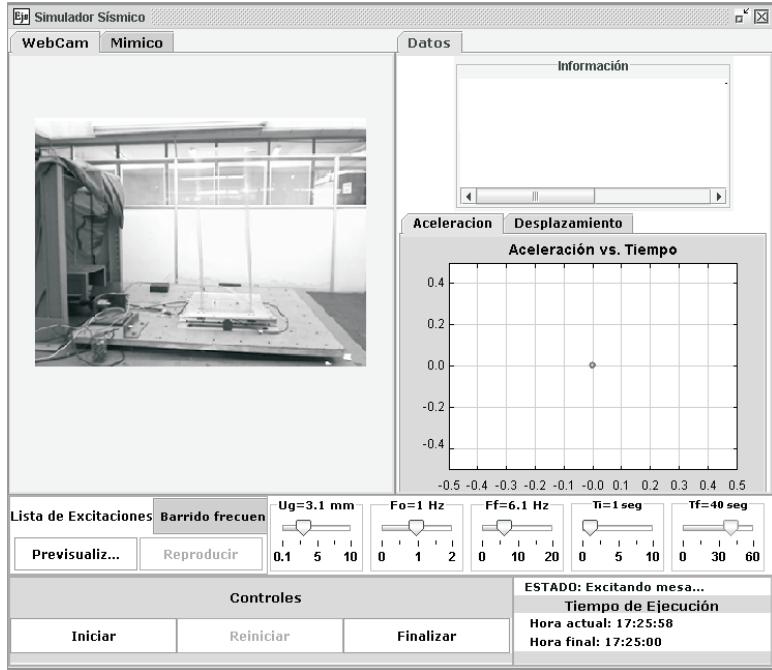


Figura 23. Visualización de video en el cliente mientras se excita la estructura prototípica.

Para la validación del sistema en tele-operación, se instaló un pórtico de un piso en el simulador y se instrumentó con acelerómetros tanto la base como la losa del primer piso del pórtico. Se seleccionó un barrido frecuencial para excitar el simulador con frecuencia inicial de 1Hz, frecuencia final de 6Hz, retardo de 1s, duración de 40s y una amplitud de 3mm.

La Figura 22 muestra la configuración de la interfaz cliente para generar el barrido y la Figura 23 muestra la estructura en el momento del ensayo junto con su respuesta en aceleración.

## 6. Conclusiones

Este trabajo presenta un completo desarrollo de las fases de diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele-operable con capacidad de carga de 20Kg, ancho de banda de 21Hz y desplazamientos hasta 15cm.

El diseño del sistema de control del simulador se basó en un modelo obtenido a partir de un experimento de identificación que muestra buenos resultados combinado con la estrategia de control en cascada corriente-velocidad-posición, donde

en cada lazo se compensan los disturbios y las no linealidades del sistema.

La sintonización del controlador de velocidad y de posición suministró a cada lazo un ancho de banda cercano a 41Hz y 21Hz, respectivamente. En ambos casos la sintonización se hizo por condición de magnitud mostrando gran precisión en el ancho de banda real del sistema.

Se mostró que el simulador sísmico puede tolerar prototipos de diferente peso sin presentar grandes variaciones en la estabilidad y desempeño del mismo. El simulador sísmico es parte de El Laboratorio Remoto de Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de La Universidad del Valle y puede ser tele-operado por Internet mediante una interfaz de control remoto desarrollada en Java. Este sistema permitirá que personas con problemas de desplazamiento o instituciones con recursos económicos y/o logísticos insuficientes promuevan la capacidad investigativa y eleven las habilidades prácticas desde cualquier punto con acceso a Internet.

## 7. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad del Valle y al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia Francisco José de Caldas COLCIENCIAS, entidades financieras del Proyecto “Desarrollo Tecnológico de los Laboratorios Remotos de Estructuras e Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural” mediante el contrato No. 237-2005.

## 8. Referencias bibliográficas

- Elgamal, A., Pitilakis, K., Dimitrios, R., Garnier, J., Madabhushi, S. P., Pinto, A., Steidl, J., Stewart, H., Stokoe, K., Taucer, F., Tokimatsu, K. & Wallace, J. (2007). A review of large-scale testing facilities in geotechnical earthquake engineering. *Earthquake Geotechnical Engineering* 6, 93-129.
- Esquembre, F. (2008). *Easy Java Simulations* [Online]. Available: <http://www.Um.Es/Fem/Ejs/> [Accessed 2008].
- Famouri, P. (1992). Control of a linear permanent magnet brushless DC motor via exact linearization methods. *Energy Conversion, IEEE Transactions On*, 7, 544-551.
- Gieras, J. F. & Piech, Z. J. (2000). *Linear synchronous motors: transportation and automation systems*, Boca Raton, Florida.
- Gómez, D., Marulanda, J., Thomson, P., Ramírez, J., Rosero, E. & Buitrago, J. (2008). *Desarrollo tecnológico de los laboratorios remotos de estructuras e ingeniería sísmica y dinámica estructural*. Cali: Universidad Del Valle - Colciencias.
- Guclu, R. (2006). Sliding mode and pid control of a structural system against earthquake. *Mathematical and Computer Modelling* 44, 210-217.
- Hsue, A. W. J., Yan, M. T. & Ke, S. H. 2007. Comparison on linear synchronous motors and conventional rotary motors driven wire-edm processes. *Journal of Materials Processing Technology* 192-193, 478-485.
- NSR-98 (1998). *Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente*, Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- OECD/NEA (2004). *Experimental facilities for earthquake engineering simulation Worldwide*. NEA/CSNi/R, 10.
- Ogawa, N., Ohtani, K., Katayama, T. & Shibata, H. (2001). Construction of a three-dimensional, large-scale shaking table and development of core technology. *Philosophical Transactions of The Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences* 359, 1725-1751.
- Quanser. (2010). *Shakes tables collection* [Online]. Available: [http://www.Quanser.Com/English/Html/Earthquake/Fs\\_Overview.htm](http://www.Quanser.Com/English/Html/Earthquake/Fs_Overview.htm) [Accessed 2010].
- Sollogoub, P. (2007). Seismic testing. In: Springer (Ed.) *Advanced Earthquake Engineering Analysis*. Italy.
- Tan, K. K., Lee, T. H., Dou, H. & Zhao, S. (2004). Force ripple suppression in iron-core permanent magnet linear motors using an adaptive dither. *Journal of the Franklin Institute* 341, 375-390.
- USGS. (2008). *Usgs Earthquake Hazards Program: Earthquake Facts And Statistics* [Online]. U.S. Geological Survey. Available: <http://Neic.Usgs.Gov/Neis/Eqlists/Eqstats.html> [Accessed].
- Whitehouse, K. (2008). *Herramienta de conexión Java-Matlab* [Online]. Available: <http://www.Cs.Virginia.Edu/~Whitehouse/Matlab/Javamatlab.html> [Accessed 2008].
- Yan, M.-T. & Shiu, Y.-J. 2008. Theory and application of a combined feedback-feedforward control and disturbance observer in linear motor drive wire-EDM machines. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture* 48, 388-401.
- Yao, B. & Xu, L. 2002. Adaptive robust motion control of linear motors for precision manufacturing. *Mechatronics* 12, 595-616.