

Diseño y construcción de una mesa sísmica de dos grados de libertad



Colaboración

Diego Armando Ramírez Zúñiga; Antonio Concha Sánchez; Jaime Arroyo Ledesma, Universidad de Colima

Fecha de recepción: 18 de agosto de 2025

Fecha de aceptación: 10 de septiembre de 2025

RESUMEN: Este artículo presenta el diseño y la construcción de una mesa sísmica biaxial de bajo costo, desarrollada en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de Colima. La mesa está conformada por una estructura base metálica, módulos lineales con motores BLDC tipo NEMA 23 y sensores, entre ellos encoders, acelerómetros y finales de carrera, cuyas señales son adquiridas mediante una tarjeta de adquisición de datos PCIe-6321. A diferencia de los modelos industriales de alto costo, esta propuesta utiliza materiales accesibles como acero estructural y aluminio, así como motores, drivers y sensores disponibles en plataformas de comercio electrónico. Esta selección, basada en criterios de bajo costo, fácil reposición y compatibilidad con el diseño mecatrónico, facilita en gran medida su réplica con fines académicos y experimentales. El sistema permite simular movimientos sísmicos en dos ejes con buena precisión, integrando medidas de seguridad y una arquitectura flexible que admite futuras mejoras.

PALABRAS CLAVE: Mesa sísmica biaxial, diseño y construcción, bajo costo, modelo CAD, instrumentación.

ABSTRACT: This article presents the design and construction of a low-cost biaxial shaking table, developed at the Mechatronics Laboratory of the University of Colima. The table consists of a metallic base structure, linear modules with NEMA 23 BLDC motors, and sensors, including encoders, accelerometers and limit switches, whose signals are acquired through a PCIe-6321 data acquisition card. Unlike high-cost industrial models, this proposal employs readily available materials such as structural steel and aluminum, as well as motors, drivers, and sensors commonly found on e-commerce platforms. This selection, based on criteria of low cost, ease of replacement, and compatibility with the mechatronic design, greatly facilitates its replication for academic and experimental purposes. The system enables the simulation of seismic motions along two axes with good accuracy, incorporating safety measures and a flexible architecture that allows for future upgrades.

KEYWORDS: Biaxial Seismic table, design and construction, low cost, CAD design, instrumentation.

INTRODUCCIÓN

México es un país altamente expuesto a la actividad sísmica debido a su ubicación geográfica sobre cinco placas tectóni-

cas principales: Pacífico, Norteamérica, Caribe, Rivera y Cocos [1]. Esta interacción tectónica ha generado a lo largo de la historia diversos eventos sísmicos que han ocasionado considerables pérdidas humanas, económicas y daños a la infraestructura nacional [2]. En particular, el estado de Colima representa una de las regiones de mayor riesgo sísmico en el país, al combinar suelos aluviales con elevadas aceleraciones del terreno, lo que incrementa su vulnerabilidad estructural [3]. Bajo este escenario, resulta necesario el desarrollo de herramientas experimentales que permitan evaluar el comportamiento estructural ante sismos, con el propósito de mejorar la capacidad de respuesta de las edificaciones y mitigar sus consecuencias.

En respuesta a esta limitación, se ha impulsado el desarrollo de mesas sísmicas de bajo costo, pero con capacidades suficientes para la validación experimental de modelos estructurales y el análisis de estrategias de control estructural. Las simulaciones computacionales han permitido modelar de manera virtual el comportamiento sísmico de edificaciones; sin embargo, estos modelos requieren validación experimental para garantizar su precisión. Las mesas sísmicas ofrecen la posibilidad de validar físicamente estos modelos mediante el ensayo de componentes o subestructuras físicas complementadas con simulaciones numéricas [4]. Esta metodología permite realizar pruebas representativas sin la necesidad de recurrir a prototipos a escala real, reduciendo considerablemente los costos y manteniendo validez experimental, siempre bajo el cumplimiento de las leyes de escalado estructural.

En este contexto, el propósito de esta investigación es establecer una plataforma experimental que contemple, en una primera etapa, el diseño y construcción de una mesa sísmica de dos grados de libertad. Asimismo, se busca proporcionar una herramienta académica que permita validar esquemas de control estructural aplicables en edificaciones futuras, contribuyendo así a mejorar la seguridad de las construcciones del estado de Colima.

El problema de investigación radica en la limitada disponibilidad de plataformas experimentales accesibles para reproducir excitaciones sísmicas de manera controlada. Ante esta situación, la principal contribución de este trabajo consiste en el desarrollo de un prototipo biaxial de bajo costo y fácil replicación, diseñado específicamente para ampliar las posibilidades de experimentación académica y de investigación en el campo de la ingeniería sísmica.

Revisión de literatura

El estudio de los efectos sísmicos en estructuras ha motivado el desarrollo de herramientas experimentales que permiten replicar dichos fenómenos en entor-

nos controlados. Una de las más representativas es la mesa sísmica, cuyo uso se ha extendido desde finales del siglo XIX hasta la actualidad, permitiendo simular movimientos del suelo y observar el comportamiento dinámico de estructuras [5].

Las primeras mesas sísmicas fueron dispositivos mecánicos manuales, como la desarrollada en Japón por Fusakichi Omori y John Milne, descrita como un hito en la instrumentación sísmica temprana [6]. Posteriormente, estas fueron impulsadas por motores eléctricos, como la creada en la Universidad de Stanford en 1906 [7]. Más adelante, Ruge presentó una mesa con sistema hidráulico y válvula controlada por señal de error, lo que marcó un primer avance hacia el control automatizado [8].

A partir de los años 70, las mesas sísmicas comenzaron a incorporar sistemas de control más sofisticados, como en el caso de la mesa de la Universidad de California en Berkeley instalada por MTS System Corporation [9]. Esta generación de mesas permitió simular con mayor precisión distintos tipos de movimientos y aumentó significativamente las capacidades de carga y aceleración. Actualmente, existen mesas con hasta seis grados de libertad, como las de E-Defense en Japón o la Universidad de San Diego, capaces de realizar ensayos a escala real [10].

Dado el elevado costo de estas infraestructuras, se ha buscado desarrollar soluciones más accesibles para entornos académicos. En este contexto, mesas sísmicas uniaxiales y biaxiales de bajo costo han sido propuestas para fines educativos y de investigación, permitiendo analizar estructuras a escala sin comprometer la seguridad ni la precisión [11].

Diversos trabajos en México han contribuido a este objetivo. Instituciones como la UNAM, el IPN, la UANL, entre otras, han desarrollado mesas vibratorias con fines didácticos y de investigación. Casadiegos destaca que estas han sido clave para el análisis estructural típico del país, como viviendas de mampostería confinada o adobe [12]. Estas investigaciones han sido fundamentales para validar modelos numéricos y mejorar los criterios de diseño estructural.

Un área clave en la evolución de estas plataformas es el sistema de control. Los algoritmos más utilizados van desde el control clásico PID [13], hasta propuestas más modernas como el control por espacio de estados [14], o el control anticipativo tipo PIDF [15]. También se han explorado metodologías como el control adaptativo, que ha demostrado su eficacia [16], y los esquemas de control inteligente, que integran técnicas de redes neuronales y algoritmos genéticos [17]. Estas metodologías buscan mejorar la precisión con la que la mesa puede seguir señales de referencia sísmicas.

Otra tendencia relevante es el enfoque de subestructuración híbrida, que permite dividir una estructura en dos partes: una física y otra simulada computacionalmente. Así, solo una sección se prueba en la mesa sísmica mientras la otra se analiza mediante modelos numéricos, lo cual reduce significativamente los costos sin sacrificar fidelidad experimental [18].

MATERIAL Y MÉTODOS

En las etapas iniciales de consideraciones iniciales de diseño de la mesa sísmica, se definieron los criterios mecánicos y electrónicos necesarios para alcanzar un movimiento controlado en dos ejes perpendiculares. Con este fin, se optó por el uso de rodamientos lineales sobre rieles de aluminio de alta rigidez, ya que estos permiten un desplazamiento suave y rápido de la plataforma móvil. Esta plataforma se conecta directamente a un motor de corriente continua sin escobillas (BLDC), seleccionado por su elevada eficiencia, bajo mantenimiento y capacidad de proporcionar una respuesta dinámica rápida.

Para lograr el movimiento en dos grados de libertad, se dispuso un conjunto similar de rodamientos y rieles perpendiculares al primero, acompañado de un segundo motor sin escobillas. De esta manera, la mesa puede desplazarse independientemente en dos direcciones ortogonales (por ejemplo, a lo largo de los ejes X e Y), cumpliendo así con el objetivo principal de reproducir patrones de movimiento sísmico bidireccional. Esta configuración no sólo garantiza la precisión en la trayectoria, sino que también facilita el control de las condiciones dinámicas requeridas para las pruebas experimentales.

Uno de los objetivos fundamentales del diseño de la mesa sísmica es la capacidad de reproducir señales sísmicas con rangos de frecuencia y periodo relevantes para el estudio de la respuesta estructural. Con este fin, se estableció que las frecuencias de operación deben abarcar desde 0 hasta 10 Hz. Este rango de frecuencias implica la necesidad de replicar periodos hasta 0.1 s; garantizando así la reproducción fiel de fenómenos sísmicos característicos tanto de temblores de corta duración como de eventos con mayor periodo.

La amplitud del movimiento que puede generar la mesa sísmica depende de la capacidad del actuador principal y de la velocidad máxima alcanzable, la cual se ha estimado inicialmente en 50 cm/s. Esta velocidad repercute en la amplitud y frecuencia del movimiento posible, determinando así la aceleración máxima que puede ser transferida a la estructura en ensayo.

Las especificaciones de la mesa vibradora se muestran en la Tabla 1. Los valores presentados en esta Tabla se obtuvieron experimentalmente sometiendo

la mesa vibradora a señales escalón para determinar su velocidad y aceleración máximas. También se aplicó una entrada chirp para caracterizar el comportamiento frecuencial de la mesa vibradora. Se utilizó un esquema de control PD en lazo cerrado para cada eje. Estos ensayos fueron esenciales para verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño dinámico.

Tabla 1. Especificaciones de la mesa (con clasificación E/P).

Descripción	Valor y unidad
Área de carga	74 x 74 cm
Aceleración máxima	3 g
Desplazamiento máximo	± 20 cm
Velocidad máxima	50 cm/s
Capacidad de carga máxima	119.8 kg
Frecuencia máxima	10 Hz

Fuente: Elaboración propia.

Este conjunto de características permite realizar ensayos dinámicos sobre especímenes estructurales que se ajusten tanto a la capacidad máxima de carga de la plataforma como a su área de trabajo disponible. La altura de los modelos de prueba dependerá directamente de las dimensiones y pesos admitidos por el sistema, considerando además las restricciones propias de la frecuencia natural de las estructuras a escala, las cuales deben mantenerse dentro del rango operativo de la mesa para garantizar la validez experimental.

Con estos planteamientos se diseñó y construyó un simulador sísmico de dos grados de libertad que permite generar movimientos en ambas direcciones horizontales del plano longitudinal y transversal. Esto hace posible la simulación de ondas Love, caracterizadas por movimientos horizontales puros, y ondas Rayleigh, que combinan desplazamientos horizontales y verticales en un patrón elíptico [19].

El diseño de la mesa sísmica se desarrolló tomando como base las dimensiones y características mecánicas de las guías lineales seleccionadas. El módulo lineal consta de dos rieles paralelos equipados con un tornillo de bolas SFU1610, acoplados a deslizadores lineales que garantizan un movimiento preciso y eficiente. Estos deslizadores están conectados a una placa de aluminio que funge como soporte estructural para los componentes principales y transmite el movimiento generado por el motor acoplado al tornillo. La elección del aluminio para las partes móviles se fundamentó en su baja densidad y adecuada rigidez, propiedades que reducen la inercia generada durante los desplazamientos y mejoran la eficiencia dinámica del prototipo. Adicionalmente, la selección de un tornillo de bolas como sistema de transmisión ofrece una mayor eficiencia mecánica en comparación con otros mecanismos, gracias a su bajo coeficiente de fricción y alta precisión de posicionamiento, aspectos que contribuyen significativamente al desempeño global de la mesa sísmica.

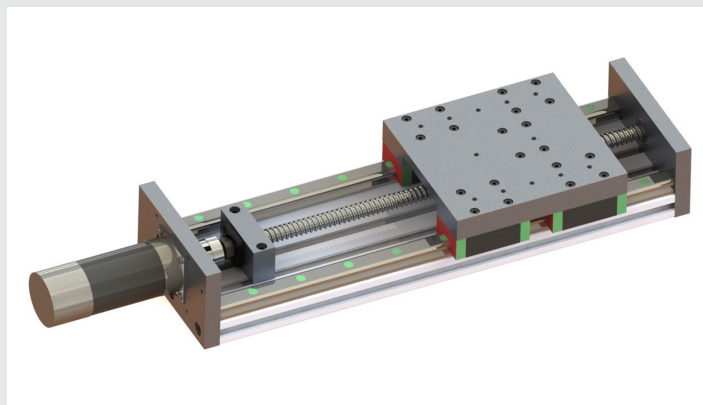


Figura 1: Modulo Lineal HLCNC.

Fuente: Modelado CAD de eje lineal con motor BLM57180 tipo NEMA 23.

Los componentes seleccionados para la construcción de la mesa sísmica fueron inicialmente diseñados para otras aplicaciones comerciales, como sistemas CNC, etc. Sin embargo, se adquirieron y se adaptaron para el ejercicio de simulación de movimientos sísmicos. Todos los componentes utilizados son de tipo comercial y pueden ser adquiridos a través de tiendas virtuales, lo que facilita su acceso y reposición en caso de ser necesario.

En la primera parte del diseño se utilizó material disponible en el laboratorio de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Colima, tal como una placa metálica de dimensiones 84 x 84 cm, con un espesor de 11 mm y un peso aproximado de 75 kg, junto con una estructura metálica de perfil pesado, que se observa en la Figura 2.

Esta estructura metálica se reforzó y se unió mediante soldadura para garantizar alta rigidez y evitar movimientos no deseados ante la aplicación de cargas dinámicas. Además, esta base rígida sirvió como soporte para la instalación de los módulos lineales, proporcionando una plataforma estable para el resto del sistema. Cabe decir, que este punto es llamado como estructura base.

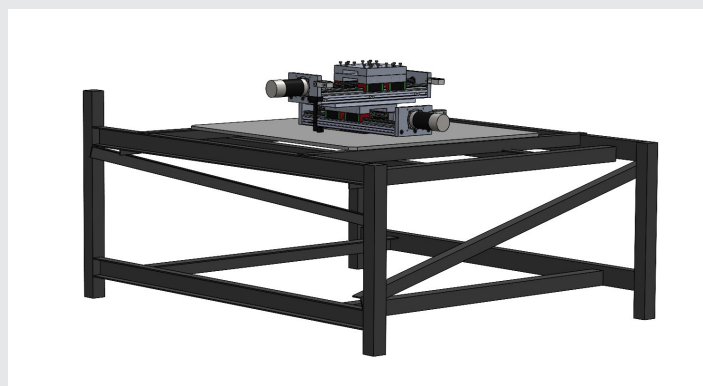


Figura 2: Estructura base y módulos lineales.

Fuente: Elaboración propia.

La segunda parte del diseño se enfocó en las partes móviles de la mesa sísmica, llamadas módulos lineales. Se seleccionó el aluminio como material principal de estos ejes debido a su bajo peso y adecuada rigidez. Estas características resultaron ideales para las piezas en constante movimiento, permitiendo una mayor eficiencia en la dinámica del sistema y reduciendo las inercias generadas por los desplazamientos. Esta combinación de materiales (acero para la estructura base y aluminio para los elementos móviles) optimizó tanto la resistencia estructural como el desempeño dinámico del sistema.

Actuadores

Para el movimiento controlado en dos grados de libertad, se seleccionaron dos módulos lineales modelo HLTNC-kit, que se usan usualmente en sistemas CNC, routers o impresoras 3D. Estos módulos están diseñados con un sistema de tornillo sin fin y deslizadores de tipo HGR20 lineales que permiten un desplazamiento preciso y eficiente, ya que corren sobre las guías los deslizadores y estos están sujetos a una placa de aluminio que su a vez también tiene fijado el tornillo sin fin. Entonces, al mover el tornillo sin fin, el conjunto completo realiza un desplazamiento. En consecuencia, el desplazamiento está definido por el tornillo sin fin, cuyo modelo es el SFU1610, el cual proporciona un desplazamiento de 1 cm por una revolución del tornillo.

Se seleccionaron motores de corriente directa sin escobillas y con sensores Hall para producir el movimiento de la mesa vibradora. Los motores adquiridos tienen marco tipo NEMA 23, cuyo modelo es el BLM57180-1000. Este motor ofrece una alta eficiencia y un menor mantenimiento en comparación con motores de escobillas. En la siguiente Tabla 2 se muestran sus características.

Tabla 2. Características técnicas del motor BLM57180-1000.

Características	Valor
Voltaje nominal	36 Vcd
Velocidad máxima	3000 rpm
Potencia	180W
Torque nominal	0.57 Nm
Encoder resolución	1000 PPR

Fuente: Información extraída de la DataSheet del fabricante Leadshine [20].

El desarrollo de la mesa sísmica se realizó en el laboratorio de Mecatrónica por el espacio y talleres aledaños para facilitar la construcción, como por ejemplo el taller de máquinas herramientas y el laboratorio de microelectrónica. También, se aprovechó el equipamiento como materiales disponibles del propio laboratorio (perfiles metálicos, placas de acero, sensores, entre otros).

Para poder controlar la parte electrónica y reproducir sismos de referencias se emplea una tarjeta de adquisición de datos modelo PCIe-6321 de National Instruments, la cual utilizará el software de Simulink de Matlab para el control de los actuadores y el monitoreo de los sensores del sistema a través de esta misma.

Sensores

En sistemas mecatrónicos, el uso de sensores es fundamental, ya que permiten obtener información precisa del entorno o del propio sistema para su monitoreo, control y operación segura. Los sensores actúan como los sentidos del sistema, traduciendo magnitudes físicas como aceleración, posición o velocidad en señales eléctricas que pueden ser procesadas por un controlador.

Acelerómetro

El primer sensor implementado en la mesa sísmica es un acelerómetro analógico de tres ejes (X, Y, Z) ADXL335, el cual detecta aceleraciones en un rango de $\pm 3g$, tiene bajo consumo de energía, tamaño compacto y respuesta lineal. La elección de un sensor analógico, en lugar de uno digital, obedece principalmente a la compatibilidad con la tarjeta de adquisición de datos PCIe-6321 de National Instruments, la cual no admite protocolos de comunicación serial como I2C o SPI, comúnmente utilizados por sensores digitales como el MPU6050. Al emplear un acelerómetro analógico, las señales de salida de cada eje pueden ser adquiridas directamente como entradas analógicas de voltaje diferencial por la tarjeta, simplificando así el proceso de adquisición y evitando la necesidad de conversores adicionales o interfaces de comunicación específicas. Por último, en la Figura 3 se aprecia la conexión pertinente hacia la tarjeta.

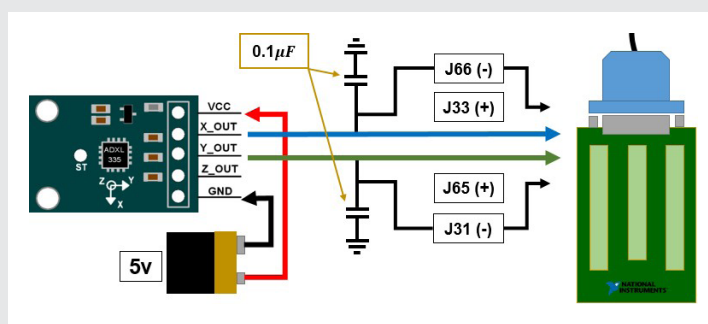


Figura 3: Acelerómetro ADXL335.

Fuente: Elaboración propia a partir de la Información extraída de la hoja de datos del fabricante del sensor [21].

La salida del sensor en cada eje X_{out} y Y_{out} está conectada de la forma diferencial a la tarjeta de adquisición de datos. Este tipo de conexión proporciona una mayor inmunidad al ruido electromagnético del entorno, ya que utiliza pares de señales (+ positivo y negativo-), transmitiendo la señal como la diferencia de voltaje entre ambos cables, en lugar de usar una referencia a tierra común (como en las señales single-ended).

Además, en cada salida de cada eje del acelerómetro se implementó un filtro pasa bajas mediante el uso de un capacitor de $0.1 \mu F$, con el objetivo de limitar el ancho de banda de la señal de salida y así atenuar frecuencias no deseadas, como el ruido o interferencias. Con esta configuración, se obtiene un ancho de banda máximo aproximado de 50 Hz. Esta información fue extraída del datasheet del sensor.

Finales de carrera

Otro de los sensores implementados son los finales de carrera, los cuales cumplen dos propósitos. El primero consiste en actuar como un protocolo de seguridad, detectando cuando un eje ha alcanzado su límite físico, interrumpiendo el movimiento y evitando colisiones, sobrecargas o daños en la estructura. En este caso, el sensor envía un pulso de 5 V a la tarjeta de adquisición de datos. Esta señal está conectada a una compuerta lógica tipo OR, a la cual también se encuentra vinculado un paro de emergencia. De esta manera, cuando se activa cualquiera de estas condiciones, la ejecución del ensayo se interrumpe de forma inmediata, protegiendo al sistema frente a cualquier situación de riesgo.

El segundo propósito que se le da a los finales de carrera es una función adicional dentro del sistema para implementar una rutina de inicialización o "HOME", la cual permite centrar ambos ejes sobre sus respectivos rieles. Esta rutina opera a muy baja velocidad para evitar impactos mecánicos durante el desplazamiento. En la Figura 4, se visualiza la disposición de estos finales de carrera.

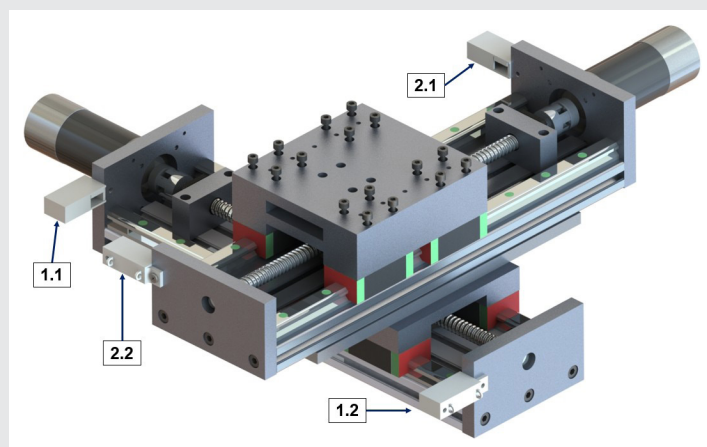


Figura 4: Ubicación de finales de carrera.

Fuente: Elaboración propia a partir de la Información extraída de la hoja de datos del fabricante [25].

La Figura 5 presenta la conexión de los interruptores de final de carrera. A través de la nomenclatura utilizada, el sensor etiquetado como "1.1" puede analizarse de la siguiente manera: el primer dígito (de izquierda a derecha) hace referencia al nivel del piso, mientras que el segundo dígito (después del punto) indica la posición de fijación, donde ".1" corresponde al lado del motor y ".2" al lado opuesto.

El ruido electromagnético puede detectarse erróneamente como una señal digital que indica que el interruptor está presionado, aunque no lo esté. Para evitar falsas detecciones causadas por ruido electromagnético se implementa un filtro pasa bajas, con las siguientes características:

Resistencias:

R_1, R_4, R_7 y $R_{10}=470\ \Omega$,

R_2, R_5, R_8 y $R_{11}=1\ \text{k}\Omega$,

R_3, R_6, R_9 y $R_{12}=10\ \text{k}\Omega$.

Capacitores:

C_1, C_2, C_3 y $C_4=0.1\ \mu\text{F}$

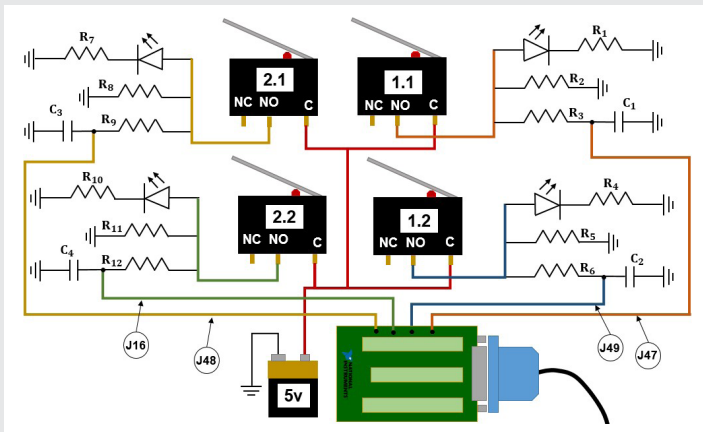


Figura 5: Conexiones para finales de carrera.

Fuente: Elaboración propia.

Interfaz de los actuadores

Para realizar el control de los motores de CD, se requiere una parte de procesamiento de señal, así como de potencia. El sistema utiliza una interfaz D2C-2CH para convertir la señal diferencial de salida del encoder del motor en una señal compatible con la tarjeta de adquisición de datos. El encoder genera señales diferenciales de tipo ABZ, adecuadas para registrar la posición y la velocidad del motor. Las señales diferenciales (A+, A-, B+, B-) son conectadas directamente a las entradas correspondientes de la interfaz D2C-2CH.

La interfaz D2C-2CH convierte las señales diferenciales (Push-Pull) a señales TTL (Transistor-Transistor Logic), compatibles con la tarjeta de adquisición de datos. Esta conversión es necesaria para que la tarjeta pueda leer y procesar las señales del encoder. La Figura 6 ilustra las conexiones pertinentes para su funcionamiento.

El sistema de control de los motores utiliza la placa ZS-X11H U1, diseñada para motores de CD sin escobillas de hasta 450W. Esta placa permite regular el voltaje, el sentido de giro, y frenado de los motores. La Figura 7 muestra el esquema de conexión de esta placa con la tarjeta de adquisición de datos.

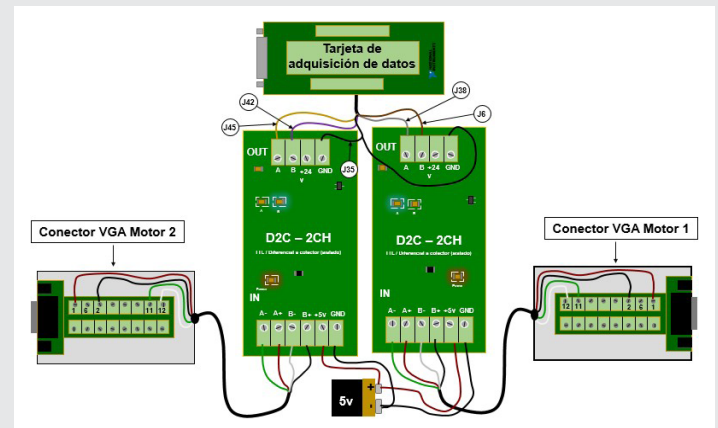


Figura 6: Interfaz D2C-2CH para leer los encoders

Fuente: Elaboración propia a partir de la Información extraída de la hoja de datos del fabricante [23].

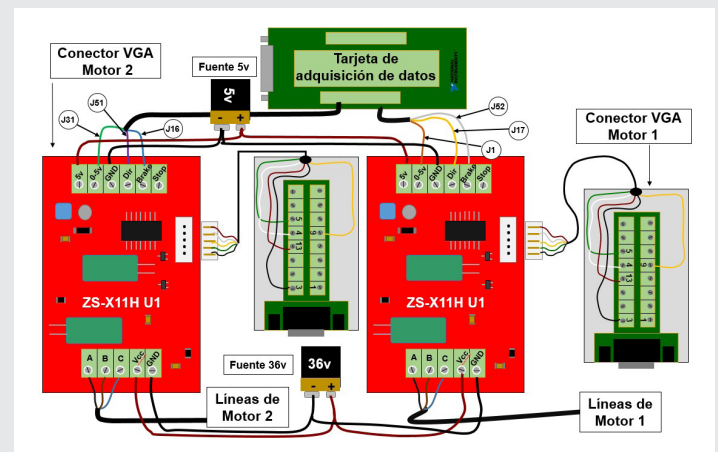


Figura 7: Controlador ZS-X11H U1 de los motores.

Fuente: Elaboración propia a partir de la Información extraída de la hoja de datos del fabricante [24].

En la Figura 8 se puede apreciar la integración de las partes mencionadas en esta sección para el control de la mesa sísmica usando la Tarjeta NI y una computadora personal.

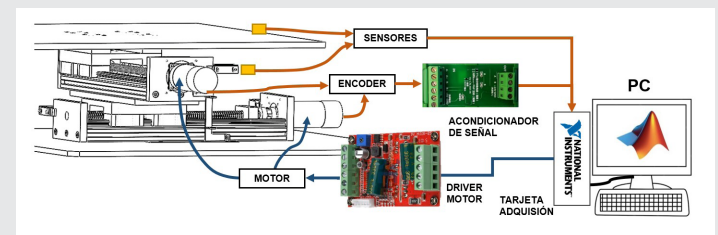


Figura 8: Diagrama esquemático de funcionamiento de la mesa.

Fuente: Elaboración propia.

El principio de funcionamiento del prototipo se basa en el movimiento en dos grados de libertad de la mesa vibradora. El movimiento se genera mediante módulos lineales ortogonales con tornillo de bolas SFU1610 y motores BLDC BLM57180-1000, controlados por drivers ZS-X11H U1. Los sensores (encoders, acelerómetro ADXL335 y finales de carrera) proveen retroalimentación, mientras que la tarjeta NI PCIe-6321 adquiere

señales y envía referencias desde Matlab/Simulink. De esta manera, la plataforma reproduce trayectorias sísmicas.

RESULTADOS

En la plataforma construida también se integraron componentes auxiliares cuya función es facilitar el montaje, proteger los elementos electrónicos y asegurar el orden y la seguridad del sistema. La Figura 9 ilustra el sistema completo ensamblado, donde se pueden identificar claramente los distintos subsistemas que lo componen.

Estos elementos auxiliares comprenden la base de la fuente CD (3), la caja de control (12), la base para conexiones eléctricas (9), paro de emergencia para detener el experimento (14) y los soportes de cableado (13).

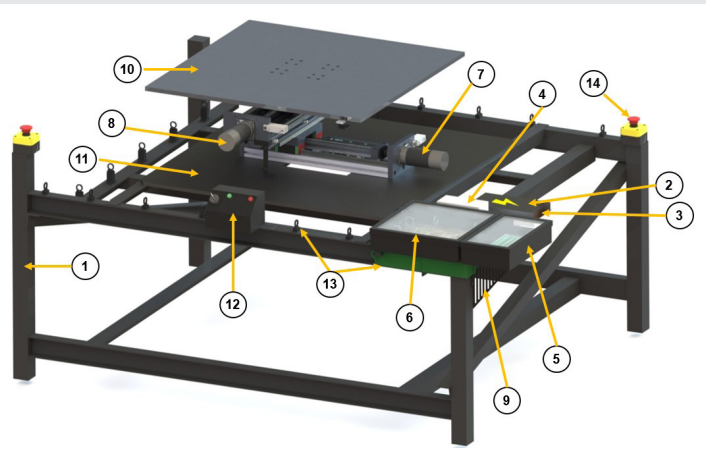


Figura 9: Vista general del modelo CAD del prototipo.
Fuente: Elaboración propia

Todos ellos cumplen un rol complementario pero indispensable para garantizar la estabilidad del sistema, la protección del usuario y la correcta gestión de la señal y la energía del sistema. Además, es conveniente mencionar el resto de las partes: Estructura base (1), Fuente CD (2), Caja de conexiones eléctricas (4), Caja de tarjeta de adquisición de datos (5), Caja de conexiones eléctricas (6), Eje lineal “2” (7), Eje lineal “1” (8), Placa de aluminio (área de ensayo) (10), Placa de metal (estructura base) (11) y Paros de emergencia (14).

De este modo, se obtiene un prototipo completo y funcional para realizar pruebas biaxiales, útil como herramienta en aplicaciones estructurales y académicas. El diseño incorpora protocolos de seguridad que cumplen con las especificaciones establecidas: la estabilidad del sistema está garantizada por una base metálica rígida con uniones soldadas; la protección del usuario, mediante paradas de emergencia y cajas de resguardo; y la gestión de señales y energía, a través de filtrado y fuentes de alimentación independientes. La Tabla 3 detalla el listado de partes, componentes y el costo total asociado al desarrollo del proyecto.

Tabla 3. Listado de Piezas y Costos.

No. Pieza	Concepto	Monto
1	Fuente CD 36v 180w	\$486.0
2	Eje lineal HLTNC	\$12,000.0
2	Motor BLM57180	\$4,600.0
1	Placa Aluminio 15x36 cm	\$1,000.0
2	Driver ZS-X11 U1 460	\$460.0
2	Codificador D2C – 2CH 894	\$894.0
4	Final de carrera	\$160.0
1	Acelerómetro	\$200.0
1	Placa aluminio CNC GX150	\$1,300.0
2	Carretes de filamento PLA	\$585.72
1	Placa de aluminio 71x71 cm	\$4,591.7
1	Tornillería, brocas y machuelos 662.58	\$662.58
1	Ferretería (Cable, cinchos, terminales, sujetadores, pintura)	\$1330.1
1	Electrónica (Paros de emergencia, selector, capacitores, protobaquelita, cable, termofil)	\$837.0
1	Soldadura de relleno aluminio	\$750.0
Total		\$29,857.1

Fuente: Los montos incluyen envío y costo aduanal.

La Tabla 4 se presentan algunos modelos comerciales representativos, destacando una de sus características.

Tabla 4. Comparativa de mesas vibratorias comerciales.

Fabricante	Modelo	Peso Máx.	Precio Aprox. (USD)
Quanser	Shake Table II	5 Kg	\$ 15,000 – \$ 25,000
MTS Systems	244.xx Series	50 T	\$ 200,000 – \$ +1M
Servotest	Seismic Table	100 T	\$ +500,000
DIDATEC	EDU-SHK	5 Kg	\$ 3,000 – \$ 8,000
Control Systems MX	CSM-Shake	20 Kg	\$ 10,000 – \$ 30,000
EnekoTech	ShakeTable Lite	3 Kg	\$ 1,500 – \$ 4,000
ANCO Engineers	R-201/R-202	80 – 160 Kg	\$20,000 - \$50,000

Fuente: Elaboración propia.

Los precios incluidos en esta tabla comparativa se basan en información pública y estimaciones de mercado, no constituyen cotizaciones oficiales ni actualizadas.

Además, no se consideran costos adicionales asociados al funcionamiento de las mesas, como el software de control, computadoras, ni posibles gastos de importación en caso de no contar con un distribuidor local. La información fue recopilada de los sitios webs oficiales de cada marca y, en cada caso, se presenta únicamente uno de los varios modelos disponibles por fabricante.

CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo se fundamentan en los datos obtenidos durante el proceso de diseño y construcción del prototipo de mesa sísmica. En primer lugar, se logró materializar un sistema biaxial capaz de reproducir movimientos en dos ejes horizontales con una frecuencia operativa de hasta 10 Hz, un desplazamiento máximo de ± 20 cm, una velocidad aproximada de 0.5 m/s y una capacidad de carga de 119.8 kg. Estas características permiten la reproducción de fenómenos sísmicos relevantes en escalas reducidas.

En segundo lugar, el análisis comparativo de costos muestra que, con un presupuesto aproximado de \$29,857.1 MXN, el prototipo representa una alternativa de bajo costo frente a mesas vibratorias comerciales cuyo valor puede superar los \$15,000 USD en equipos de laboratorio o incluso alcanzar cifras cercanas al millón de dólares en instalaciones industriales.

En tercer lugar, el sistema garantiza estabilidad estructural mediante la base metálica rígida, protección del usuario con paros de emergencia y cajas de resguardo, y adecuada gestión de señales y energía mediante el filtrado y distribución independiente de las fuentes.

Finalmente, la importancia de este desarrollo radica en que se ha establecido una plataforma experimental replicable y accesible, que constituye una herramienta académica y de investigación para validar modelos estructurales y ensayar esquemas de control, fortaleciendo así la preparación frente a riesgos sísmicos en el ámbito local.

Trabajo a futuro

En una segunda de esta investigación, se contempla la implementación y evaluación de diferentes técnicas de control automático aplicadas a la mesa sísmica, fundamentadas en su modelo matemático e identificación paramétrica. El objetivo de esta fase será analizar el desempeño de diversos algoritmos de control en el seguimiento de señales de referencia sísmica, comparar los resultados obtenidos con estudios previos y validar la efectividad de cada estrategia de control y consolidar una plataforma experimental como una herramienta académica y de investigación para el análisis

y validación de esquemas de control estructural para las edificaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen SECIHTI, PRODEP-SEP, y a la Universidad de Colima por el apoyo para la realización de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Castro V. H. E., y X. P. Campos (2018). ¿Qué son los SISMOS, dónde ocurren y cómo se miden? *Revista Ciencia*, 69(3), 8-15.

[2] Dávalos K. N. D. D. & J. M. R. Esteves (2021). El sismo del 21 de enero de 2003 en Colima: estudio de la percepción social para la gestión del riesgo de desastres. *Sociedad y ambiente*, 24, 1-26.

[3] Ayuntamiento de Colima (2012). Programa municipal de ordenamiento territorial de Colima. Obtenida de la página electrónica: <http://ipco.gob.mx>.

[4] Mendoza, P. C. (2018). Análisis de un modelo analítico para evaluar la interacción entre una mesa vibratoria y una estructura de ensayo durante ensayos de simulación sísmica *Veritas et Scientia – UPT*, 7(1), 836-847.

[5] Wood R. M. (1988). Robert Mallet and John Milne—earthquakes incorporated in Victorian Britain. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 17(1), 107-142.

[6] Bernal D. (2013). Automatización de mesas vibratorias y sistemas de control estructural. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

[7] Reitherman R. (2006). The effects of the 1906 earthquake in California on research and education. *Earthquake Spectra*, 22(2), 207-236.

[8] Ruge P. (1936). Machine for the Reproduction of Earthquake Displacement Records. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 26(3), 193-213.

[9] Severn R. (2011). The development of shaking tables – A historical note. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 40, no. 2, pp. 195-213.

[10] Tagawa Y. & K. Kajiwara (2007). Controller Design for Large-Scale Shaking Tables. Japan: Japan Building Research Institute.

[11] Carrillo J. (2013). Evaluación del comportamiento dinámico de una mesa sísmica educativa. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.

- [12] Casadiegos E. M. (2023). Modelamiento y análisis estructural para validación en mesas vibratorias. México: Universidad Autónoma de Guerrero.
- [13] O'hagan, J., & Ma, Q. (2012). Experimental assessment of PID control for a uniaxial shake table. En 15th World Conference On Earthquake Engineering. Lisboa, Portugal.
- [14] Ogata K. (2003). Ingeniería de control moderna. 4a ed. México: Prentice Hall.
- [15] Zhong Q. C. (2012). Feedforward Control: Basics, Models and Applications. London: Springer.
- [16] Ozcelik M. (2008). Experimental performance of adaptive control in shaking table. Journal of Earthquake Engineering, 12(4), 555–576.
- [17] Zhang Y. (2023). Intelligent seismic control of high-rise buildings using LSTM and genetic algorithms. Structural Control and Health Monitoring, 30(2), 3180.
- [18] Severn R. (2011). Substructuring Methods in Earthquake Simulation. Earthquake Spectra, 27(3), 575–593.
- [19] Ruvalcaba J. A. F. (2020). Estudio de la dispersión de ondas superficiales a partir de ruido sísmico ambiental en el norte del Golfo de California. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [20] Leadshine Technology Co. Ltd. (n.d.). BLM57180 Series Brushless DC Motor. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://www.leadshine.com/legacys/BLM57180.html>.
- [21] Analog Devices. (n.d.). ADXL335: Small, Low Power, 3-Axis ± 3 g Accelerometer. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://www.analog.com/en/products/adxl335.html>.
- [22] National Instruments. (n.d.). NI PCIe-6321 Multifunction I/O Device Specifications. Austin, TX: National Instruments. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/pcie-6321-specs/page/specs.html?srsId=AfmBOorX5oWG7jxosFmrzoiEtxJfWZoSIRQbftmshVhL4u2buSr6N5zJ>.
- [23] QTLuxury. (n.d.). D2C-2CH Differential to TTL Encoder Signal Converter Board. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://es.aliexpress.com/item/1005002086155437.html>.
- [24] ZS-X11H U1 Brushless DC Motor Controller (n.d.). Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://es.aliexpress.com/item/1005001738213078.html>.
- [25] HLTNC. (n.d.). Módulo lineal CNC con tornillo de bolas SFU1610 y guías HGR20. Recuperado el 17 de septiembre de 2025, de <https://es.aliexpress.com/item/4001282255200.html>.

