

Diseño, construcción y análisis de una mesa vibratoria de dos grados de libertad Design, construction and analysis of a two-degree-of-freedom vibrating table

C. Cuevas-Gutiérrez ^a, J. Hernández-Pérez ^a, J.B. Pascual-Francisco ^a, A.J. Castro-Romero ^a, D.E. Rivera-Arreola ^a,
A. Jiménez-Montoya ^{b,*}

^aÁrea Académica de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Politécnica de Pachuca, 43830, Zempoala, Hidalgo, México.

^bDivisión de Ingeniería Civil, Tecnológico Nacional de México, TES-San Felipe del Progreso, 50640, San Felipe del Progreso, Edomex, México.

Resumen

Este trabajo detalla el desarrollo y validación de una mesa vibratoria de dos grados de libertad para emular excitaciones sísmicas controladas, mediante la variación de los parámetros de frecuencia, amplitud y dirección del movimiento. El diseño, realizado en CAD y validado mediante análisis de elemento finito, garantiza factores de seguridad superiores a dos para cargas de 200 kg. La estructura integra actuadores hidráulicos gestionados por un PLC y un sistema de adquisición de datos basado en Raspberry Pi 5 con sensores MPU6050 y HC-SR04. Las pruebas experimentales a 0.25 Hz demostraron la capacidad del sistema para generar movimientos armónicos en los ejes horizontal y vertical. Los resultados confirman la eficacia de la integración mecánica, hidráulica y de control, estableciendo una plataforma experimental robusta para el análisis dinámico de estructuras civiles a escala y la emulación de eventos sísmicos complejos.

Palabras Clave: Mesa vibratoria, análisis estructural, movimiento sísmico, adquisición de datos, validación experimental.

Abstract

This work details the development and validation of a two-degree-of-freedom shaking table designed to emulate controlled seismic excitations by varying frequency, amplitude, and movement direction parameters. The design, developed via CAD and validated through finite element analysis, ensures safety factors greater than two for 200 kg loads. The structure integrates hydraulic actuators managed by a PLC and a data acquisition system based on Raspberry Pi 5 with MPU6050 and HC-SR04 sensors. Experimental tests at 0.25 Hz demonstrated the system's ability to generate harmonic movements in both horizontal and vertical axes. The results confirm the effectiveness of the mechanical, hydraulic, and control integration, establishing a robust experimental platform for the dynamic analysis of scaled civil structures and the emulation of complex seismic events.

Keywords: Shaking table, structural analysis, seismic motion, data acquisition, experimental validation.

1. Introducción

Las mesas vibratorias constituyen una herramienta fundamental en la ingeniería civil para el estudio del comportamiento dinámico de estructuras sometidas a excitaciones sísmicas controladas. Mediante estas plataformas es posible reproducir, a escala, movimientos del terreno asociados a eventos sísmicos reales, lo que permite analizar de forma experimental la respuesta estructural en términos de desplazamientos, velocidades y aceleraciones (Bernal *et al.*, 2015; Chopra, 2020). Este tipo de ensayos resulta esencial para la validación de modelos numéri-

cos y para la mejora de los criterios de diseño sismorresistente. El uso de mesas vibratorias ha sido ampliamente documentado tanto en el ámbito de la investigación como en la docencia, ya que permiten establecer un vínculo directo entre la teoría de la dinámica estructural y la observación experimental del comportamiento de las estructuras bajo cargas dinámicas (Kausel, 2017; Paz y Leigh, 2004). No obstante, las mesas vibratorias de gran escala suelen presentar altos costos de adquisición, operación y mantenimiento, lo que limita su disponibilidad en instituciones educativas y centros de investigación con recursos restringidos.

*Autor para correspondencia: adan.jm@sfelipeprogreso.tecnm.mx

Correo electrónico: candcuevas@upp.edu.mx (Cándido Cuevas-Gutiérrez), jahdez@upp.edu.mx (Javier Hernández Pérez), juanpascual@upp.edu.mx (Juan Benito Pascual-Francisco), acastro@upp.edu.mx (Ángel de Jesús Castro-Romero), eduardorivera@upp.edu.mx (Daniel Eduardo Rivera Arreola), adan.jm@sfelipeprogreso.tecnm.mx (Adán Jiménez-Montoya).

En respuesta a esta problemática, el desarrollo de mesas vibratorias a escala reducida ha cobrado relevancia en el entorno académico, debido a su bajo costo, facilidad de implementación y versatilidad para la realización de ensayos experimentales con modelos estructurales simplificados (Coral *et al.*, 2011; Morales Reyes, 2017; Humaish *et al.*, 2018)

Estas plataformas permiten a estudiantes e investigadores analizar fenómenos básicos del comportamiento dinámico estructural y constituyen una base adecuada para el estudio de técnicas experimentales más avanzadas.

Sin embargo, gran parte de los desarrollos reportados en la literatura se enfocan en mesas vibratorias unidireccionales, generalmente limitadas al movimiento horizontal y con esquemas de control simplificados (Ibuki *et al.*, 2025; He *et al.*, 2020; Damerji *et al.*, 2022). Esta característica restringe la posibilidad de analizar efectos asociados a la interacción entre componentes horizontales y verticales del movimiento sísmico, los cuales pueden ser relevantes en el estudio del comportamiento dinámico de estructuras civiles, incluso a escala reducida (Chopra, 2020; Lin *et al.*, 2024).

Adicionalmente, en los últimos años se ha incrementado el interés por integrar plataformas experimentales de bajo costo con sistemas de adquisición de datos flexibles y tecnologías de control accesibles, lo que permite ampliar las capacidades didácticas y de investigación de las mesas vibratorias a pequeña escala. En este contexto, dichas plataformas pueden servir como base para la implementación futura de metodologías como la simulación híbrida en tiempo real, la cual combina modelos físicos y numéricos para el análisis estructural bajo cargas dinámicas (Al-Subaihawi *et al.*, 2024).

En este marco, surge la necesidad de desarrollar una mesa vibratoria bidireccional de bajo costo que permita generar desplazamientos controlados tanto en el eje horizontal como en el vertical, orientada específicamente a su uso en el área de ingeniería civil. La propuesta presentada en este trabajo responde a esta necesidad, al plantear un sistema experimental concebido para apoyar actividades docentes y de investigación relacionadas con el análisis dinámico de estructuras a escala.

El objetivo de este trabajo es el diseño, construcción y realización de pruebas básicas de una mesa vibratoria bidireccional accionada mediante actuadores hidráulicos. El sistema incorpora un esquema de control basado en un controlador lógico programable (PLC) y una etapa de instrumentación que integra sensores inerciales y ultrasónicos conectados a una Raspberry Pi 5, lo que permite la medición de aceleraciones y desplazamientos durante los ensayos. Con ello, se busca sentar las bases para futuras investigaciones orientadas al control avanzado y a la replicación de registros sísmicos reales, fortaleciendo así la formación experimental y la investigación aplicada en ingeniería civil.

2. Metodología

2.1. Diseño mecánico

El diseño de la mesa vibratoria se realizó empleando criterios de rigidez, estabilidad y facilidad de fabricación. Para modelar el sistema se utilizó el software SolidWorks. Se consideraron tres componentes estructurales principales: la base, la

submesa y la submesa superior, todos construidos con perfil tubular rectangular (PTR) y una placa de acero A36 de 3.175 mm de espesor. Durante esta etapa se definieron las dimensiones generales del sistema ($1.5 \times 1.20 \times 0.90$ m), así como los puntos de unión y los grados de libertad necesarios para permitir el movimiento en los ejes horizontal (eje X) y vertical (eje Z). Dónde placa de carga tiene un peso de 45 Kg y el resto de la estructura 165 Kg, haciendo un total de 210 Kg. Posteriormente, se llevó a cabo un ensamblaje virtual para verificar la correcta alineación de los componentes y asegurar la compatibilidad entre las piezas antes de proceder con el análisis estructural. En la Figura 1 se muestra una vista en isométrico de la mesa vibratoria diseñada, en la que se detallan algunas de sus características estructurales.

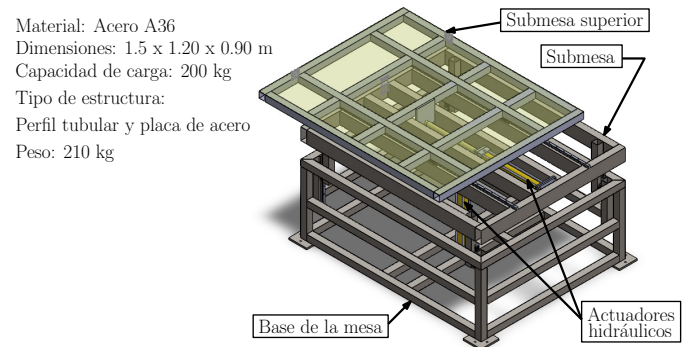


Figura 1: Mesa vibratoria diseñada en SolidWorks.

2.2. Análisis estructural

El análisis estructural se realizó para los tres componentes principales de la mesa vibratoria: base, submesa y submesa superior. Se definieron las condiciones de frontera considerando los apoyos fijos en la base y las restricciones de movimiento correspondientes en las uniones entre componentes. El material asignado fue acero A36, con un límite elástico de 250 MPa. Se aplicó una carga estática de 200 kg en dirección del eje Z negativo (ver Figura 18), distribuida uniformemente sobre la superficie de la submesa superior, representando la carga operativa máxima estimada. El estudio se llevó a cabo mediante el módulo SolidWorks Simulation, utilizando el método de elemento finito (MEF) para analizar la estructura tubular. Los análisis de esfuerzos máximos, desplazamientos y factores de seguridad mínimos en cada componente se realizaron empleando elementos finitos de tipo viga.

La Figura 2 muestra la distribución de los esfuerzos normales en la estructura de la mesa, provocada por la carga considerada. Los resultados indican que el esfuerzo máximo ocurre en las vigas superiores centrales, con un valor aproximado de 15.73 MPa (mostrado en color rojo). La Figura 3 presenta la distribución del factor de seguridad (FDS) de la estructura de la mesa, considerando la carga estática distribuida en la cara superior de la mesa. El factor de seguridad mínimo obtenido fue de 15.89, localizado en las vigas horizontales superiores.

La Figura 4 muestra la distribución de los esfuerzos normales producidos en la submesa. Se observa que los esfuerzos normales alcanzan un valor de 53.68 MPa, localizado en la zona central de las vigas superiores. La Figura 5 presenta la distribución del factor de seguridad de la submesa. El valor mínimo obtenido fue de 4.66, localizado en la zona central de las vigas

superiores.

La Figura 6 muestra la distribución de los esfuerzos normales de la submesa superior. El máximo esfuerzo registrado es de 24.89 MPa, localizado en la zona central de las vigas sometidas a carga. Este valor es muy inferior al límite elástico del material (250 MPa). La Figura 7 presenta la distribución del factor de seguridad de la submesa superior. El valor mínimo obtenido fue de 10.0.

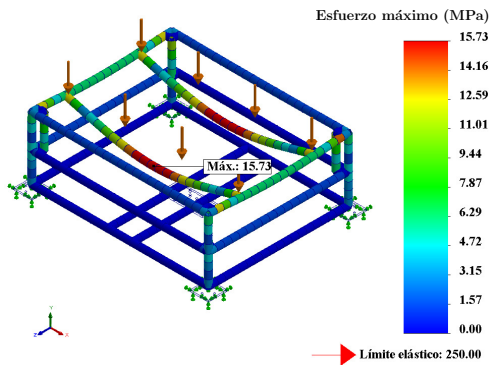


Figura 2: Distribución de esfuerzos normales de la estructura de la mesa.

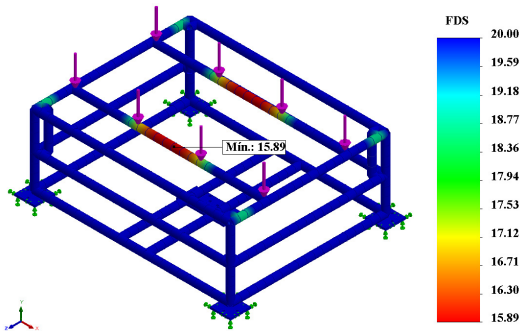


Figura 3: Distribución del factor de seguridad (FDS) de la estructura de la mesa.

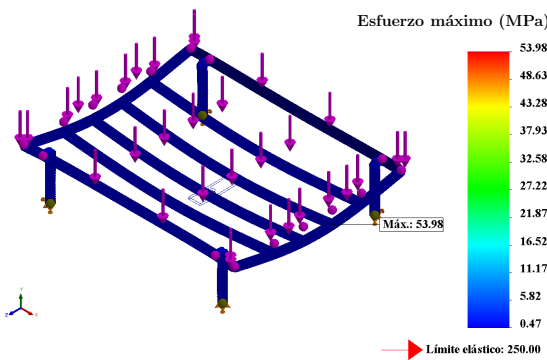


Figura 4: Distribución de los esfuerzos normales de la submesa.

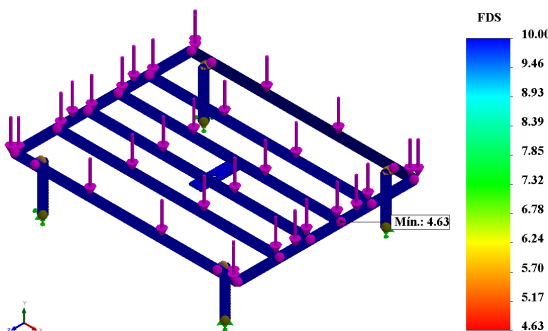


Figura 5: Distribución del factor de seguridad (FDS) de la submesa.

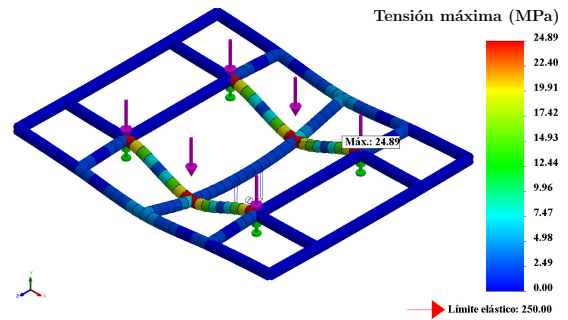


Figura 6: Distribución de esfuerzos normales de la submesa superior.

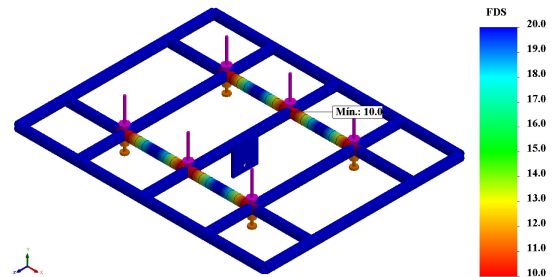
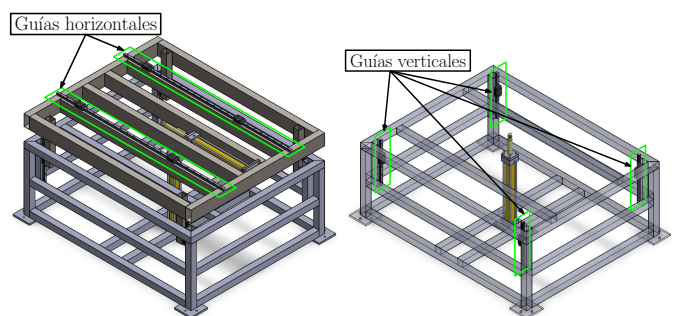


Figura 7: Distribución del factor de seguridad (FDS) de la submesa superior.

2.3. Construcción y ensamble

Los componentes se fabricaron con PTR y placa de acero, siguiendo las dimensiones del diseño. La estructura se ensambló mediante soldadura de electrodo con arco eléctrico, y se instalaron un total de seis guías lineales HGR20-1500 atornilladas a la estructura acoplados con sus respectivos bloques de rodamientos. Para el desplazamiento horizontal se utilizaron dos guías lineales de 150 cm de longitud, cada guía tiene instalados dos bloques de rodamientos, tal como se muestra en la Figura 8a. Para el desplazamiento vertical se emplearon cuatro guías lineales de 37 cm de longitud, instaladas en cada esquina de la mesa, cada guía utiliza un bloque de rodamiento, tal como se parecía en la Figura 8b. En la Figura 9 se muestra la mesa ensamblada.



(a) Desplazamiento horizontal. (b) Desplazamiento vertical.

Figura 8: Ubicación de las guías lineales y bloques de rodamientos.

2.4. Integración del sistema hidráulico y de control

Una vez concluida la etapa de fabricación y ensamblaje de la estructura, se procedió a la instalación de los dos actuadores hidráulicos encargados de generar los desplazamientos en los ejes X y Z. Cada actuador tiene una fuerza máxima de 4520 Kg, considerando que la presión de operación de la unidad hidráulica es de 180 Bar. El actuador horizontal se acopló a la submesa intermedia mediante un sistema de articulación que permite el

movimiento lineal controlado sobre el eje X, mientras que el actuador vertical se montó entre la base y la submesa superior para inducir movimientos en el eje Z. Ambos actuadores fueron conectados al sistema hidráulico principal mediante mangueras de alta presión y electroválvulas controladas por un PLC Allen-Bradley. Esta configuración permitió verificar el funcionamiento independiente de cada actuador y garantizar la correcta transmisión del movimiento a la estructura sin interferencias mecánicas, constituyendo la base para las pruebas dinámicas posteriores. La Figura 10 muestra el sistema hidráulico conectado a la mesa vibratoria.

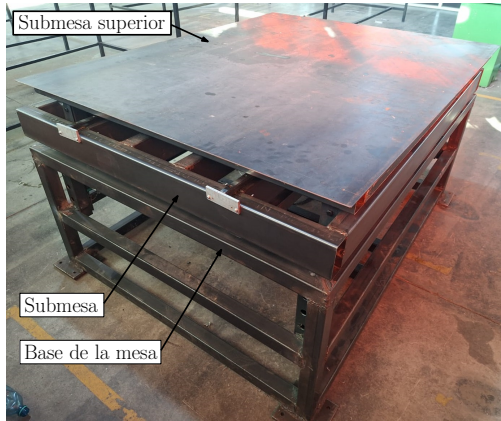


Figura 9: Mesa vibratoria ensamblada.

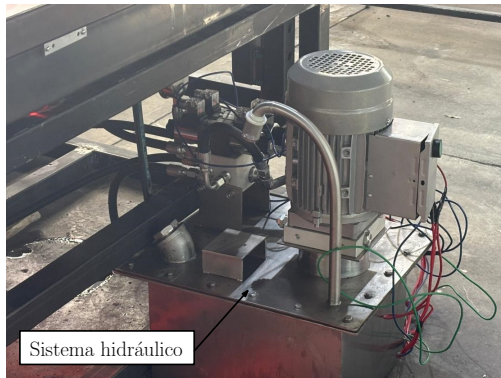


Figura 10: Sistema hidráulico implementado en la mesa vibratoria.

2.4.1. Circuito hidráulico y lógica secuencial

Se realizó una simulación de la secuencia de movimientos de la mesa (extensión y retracción de los pistones hidráulicos). La Figura 11 presenta el esquema del circuito hidráulico diseñado para el accionamiento de dos cilindros hidráulicos de doble efecto, encargados de generar los desplazamientos en los ejes X y Z de la mesa de vibración. Cada actuador es controlado mediante una electroválvula direccional 4/3 con retorno por resorte, la cual regula el caudal y sentido del flujo hidráulico hacia las cámaras del cilindro. El sistema se alimenta de una unidad hidráulica compuesta por una bomba de desplazamiento fijo y un depósito integrado.

En la Figura 12 se muestra el diagrama eléctrico de control implementado para la ejecución automática de la secuencia de movimientos. La lógica de control fue programada en el software FluidSim® de Festo, estructurando una rutina compuesta por cinco desplazamientos en el eje X y cinco en el eje Z. El programa incorpora, relevadores (R), solenoides (S), contadores (C),

enclavamientos, temporizaciones (T) y señales de realimentación, con el fin de garantizar el correcto ordenamiento y seguridad del ciclo operacional. A través de la Figura 13 se muestra el comportamiento ideal en simulación mediante diagrama espacio-fase de los actuadores hidráulicos de la mesa vibratoria.

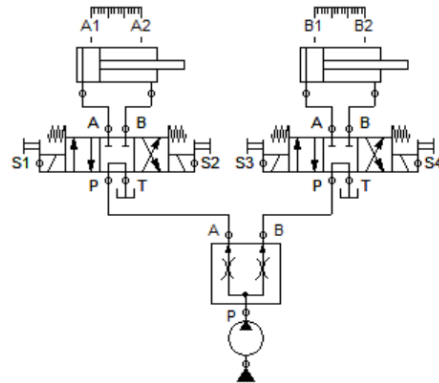


Figura 11: Diagrama del sistema hidráulico.

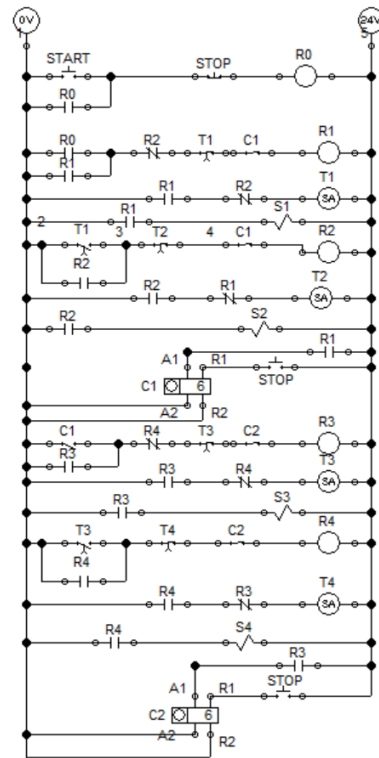


Figura 12: Lógica de control secuencial implementada en FluidSim.

2.4.2. Conexión del PLC y programación de la secuencia de control en RSLogix 500

Se realizó la conexión del PLC Allen-Bradley al sistema hidráulico con el propósito de controlar los actuadores mediante las electroválvulas asociadas a cada uno de los cilindros. En la Figura 14 se muestra la disposición de las dos servoválvulas, utilizadas para mover el pistón horizontal que llamaremos “Pistón A” y para mover el pistón vertical, el cual llamaremos “Pistón B”. Cada servoválvula contiene dos solenoides que se activan con corriente alterna a 110 volts. Cada solenoide puede activar una posición extrema de la servoválvulas. Estos solenoides los llamamos A1, A2, B1 y B2.

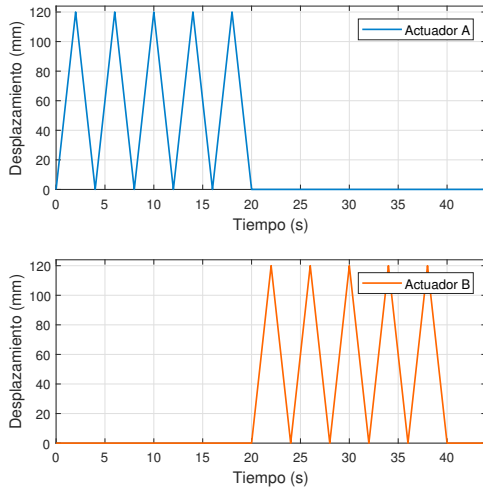


Figura 13: Diagrama espacio-fase de los actuadores.

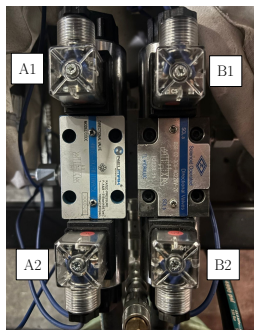


Figura 14: Vista superior de las dos servoválvulas con los solenoides A1, A2, B1 y B2.

En la Tabla 1 se muestra una tabla de verdad del sistema, en donde se establecen las condiciones de activación de las servoválvulas para que los pistones hidráulicos se puedan extender o retraer. En esta tabla se considera que el valor 1 corresponde al solenoide activado, mientras que el valor 0 al solenoide desactivado.

Tabla 1: Tabla de verdad de las servoválvulas.

Pistón	Posición	Condición de las entradas			
		A1	A2	B1	B2
A	Extendida	0	1	1	0
	Retraída	1	0	1	0
B	Extendida	1	0	0	1
	Retraída	1	0	1	0

El PLC se configuró para recibir y enviar señales hacia las válvulas de control, regulando el flujo hidráulico y la dirección del movimiento de los actuadores. En la Figura 15 se muestran los dos actuadores instalados en la mesa vibratoria conectados al sistema hidráulico. Considerando que la presión de operación recomendada por el fabricante es de 180 Bar, los actuadores hidráulicos pueden ejercer una fuerza máxima de 4520 Kg. La programación del sistema se llevó a cabo en el software RS Logix 500, donde se desarrolló una rutina de control que ejecuta la misma secuencia descrita en el apartado 2.4.1, de acuerdo al diagrama espacio-fase mostrado en la Figura 13. La Figura 16 muestra la programación que se realizó en RS Logix 500 en forma de Grafcet, mientras que en las Tablas 2 y 3 se indican

las configuraciones de las entradas y salidas digitales del PLC, respectivamente.

La operación comienza en un estado de reposo con ambos pistones detectados como retraídos. El proceso se divide en dos fases principales. Al activar la señal de inicio, empieza la Fase A ejecuta cinco ciclos de extensión-retracción del primer actuador (desplazamiento horizontal), los intervalos de extensión y retracción son de dos segundos esto es controlado por medio de temporizadores tipo TON (retardo a la conexión), posteriormente la Fase B replica la secuencia de cinco ciclos de extensión-retracción para el segundo actuador (desplazamiento vertical). Las fases están gobernadas por contadores de eventos donde la transición de la fase A a la fase B depende del primer contador cuando alcanza los primeros cinco ciclos su salida del contador permite el cambio para que la fase B se ejecute.

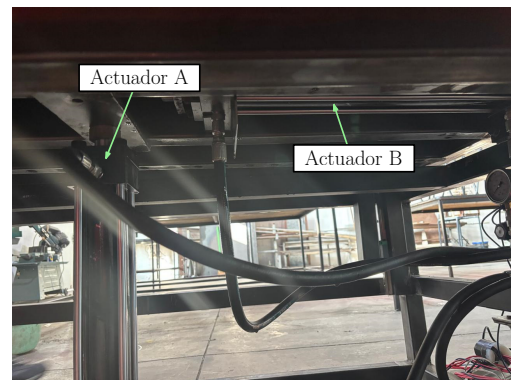


Figura 15: Actuadores hidráulicos instalados en la mesa vibratoria.

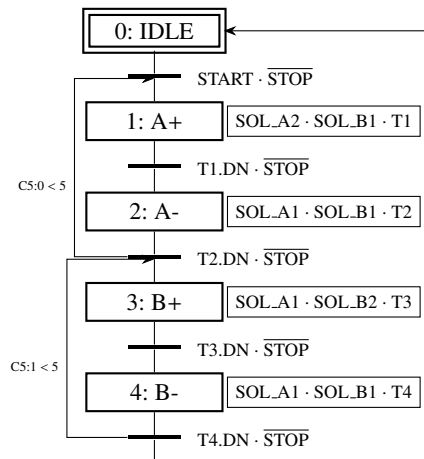


Figura 16: Grafcet que representa la lógica de programación secuencial del PLC.

Tabla 2: Configuración de entradas digitales.

Etiqueta	Dirección	Componente	Función
START	I:0/0	Pulsador NA	Inicio de secuencia.
STOP	I:0/1	Pulsador NC	Paro de emergencia.

Tabla 3: Configuración de salidas digitales.

Salida	Dirección	Actuador
SOL_A1	O:0/0	Solenoide A1
SOL_A2	O:0/1	Solenoide A2
SOL_B1	O:0/2	Solenoide B1
SOL_B2	O:0/3	Solenoide B2

2.5. Instrumentación y adquisición de datos

Para la adquisición de las señales originadas por la vibración de la mesa, se integraron un sensor de medición inercial MPU6050 (aceleración) y dos sensores ultrasónicos (medición de desplazamiento). Estos dispositivos fueron controlados desde una tarjeta Raspberry Pi 5, mediante programación en Python. Se obtuvieron gráficos de aceleraciones y desplazamientos en los ejes X y Z, además de archivos de datos exportables a Excel o MATLAB para análisis posterior. Dichos datos son procesados y representados de forma visual en gráficos que se abordarán en el apartado 3.3. En la Tabla 4 se muestra la asignación de conexión de pines entre los sensores y la Raspberry Pi 5. Además, en la Figura 17 se exhibe el diagrama esquemático de conexión de los elementos del sistema. El Algoritmo 1 en forma de pseudocódigo, representa el programa que se desarrolló en Python para la adquisición y procesamiento de datos.

Tabla 4: Asignación de los pines de conexión de los sensores con la Raspberry Pi 5.

Dispositivo	Señal	GPIO	Pin físico
MPU6050	Vcc	NA	Pin 17 (3.3 V)
	GND	NA	Pin 7 (GND)
	SDA	GPIO 2	Pin 3
	SCL	GPIO 3	Pin 5
HC-SR04 (X)	Vcc	NA	Pin 4 (5 V)
	GND	NA	Pin 25 (GND)
	TRIG	GPIO 17	Pin 11
	ECHO	GPIO 27	Pin 13
HC-SR04 (Z)	Vcc	NA	Pin 4 (5 V)
	GND	NA	Pin 39 (GND)
	TRIG	GPIO 23	Pin 16
	ECHO	GPIO 24	Pin 18

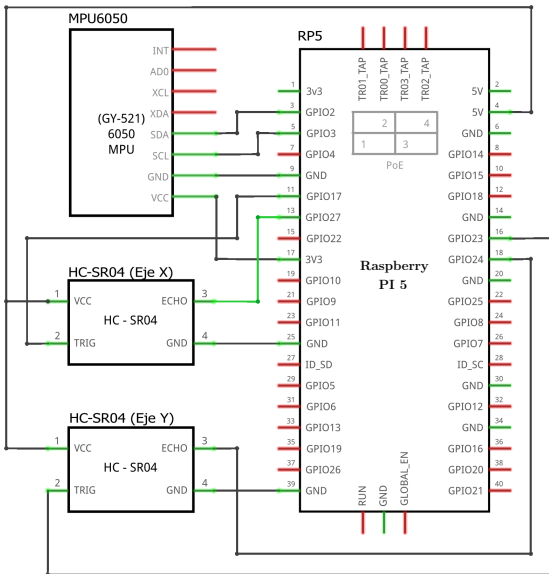


Figura 17: Diagrama esquemático de conexión entre la Raspberry Pi 5 y los sensores del sistema.

3. Resultados y análisis

3.1. Análisis estructural de la mesa vibratoria

En la Tabla 5 se resumen los resultados obtenidos del análisis estructural. Los esfuerzos máximos en los puntos críticos de la base, submesa y submesa superior fueron de 15.73 MPa, 53.68 MPa y 24.89 MPa, respectivamente, todas muy por debajo del límite elástico del material (250 MPa). Los factores de

seguridad mínimos obtenidos fueron 15.89, 4.66 y 10.0, valores considerablemente superiores al criterio de diseño ($F.S. = 2$).

Algoritmo 1: Adquisición y procesamiento de los datos de aceleración y desplazamiento en los ejes X-Z.

```

1: Inicializar sensor inercial MPU6050
2: Configurar periodo de muestreo dt y número máximo de muestras N
3: Configurar pines GPIO de sensores ultrasónicos HC-SR04 (ejes X y Z)
4: Diseñar filtro Butterworth pasa-bajas de orden n y frecuencia de corte fc
5: Inicializar vectores de tiempo, aceleraciones y distancias
6: Crear archivo CSV y escribir encabezados
7: Inicializar gráficos interactivos
8: t0 ← tiempo actual
9: mientras el sistema esté en ejecución hacer
10:   Leer aceleraciones Ax y Az desde el MPU6050
11:   Compensar el efecto de la gravedad en el eje Z
12:   Medir distancia DistX con sensor ultrasónico del eje X
13:   Medir distancia DistZ con sensor ultrasónico del eje Z
14:   t ← tiempo actual - t0
15:   Almacenar {t, Ax, Az, DistX, DistZ} en memoria
16:   si número de muestras > N entonces
17:     Eliminar la muestra más antigua
18:   fin si
19:   Guardar la muestra actual en el archivo CSV
20:   si número de muestras suficientes para filtrado entonces
21:     Filtrar Ax y Az mediante filtro Butterworth
22:   si_no
23:     Utilizar señales sin filtrar
24:   fin si
25:   Actualizar gráfica de aceleraciones
26:   Actualizar gráfica de distancias
27:   Esperar dt segundos
28: fin mientras
29: Guardar gráfica final
30: Cerrar archivo CSV
31: Liberar recursos GPIO
32: Finalizar ejecución
    
```

Tabla 5: Resultados obtenidos del análisis estructural (Esfuerzos máximos y Factor de seguridad mínimo).

Elemento	Esfuerzo máximo [MPa]	Factor de seguridad mínimo
Base de la mesa	15.73	15.89
Submesa	53.68	4.66
Submesa superior	24.89	10.00

3.2. Validación del mallado mediante refinamiento

Se realizó el refinamiento de malla para comprobar la convergencia de la solución del análisis de elemento finito. El modelo numérico fue discretizado utilizando el algoritmo de mallado automático de SolidWorks Simulation, controlado mediante el parámetro de densidad de malla.

Inicialmente, se llevó a cabo un análisis empleando una densidad de malla estándar y, posteriormente, se generó un segundo estudio utilizando una densidad de malla fina, incrementando la densidad de elementos y reduciendo el tamaño efectivo de los mismos. Las características de ambos mallados para cada componente se presentan de forma comparativa en la Tabla 6. Los esfuerzos máximos obtenidos en cada componente fueron comparados entre ambos estudios, como se muestra en la Tabla 7. Las diferencias observadas fueron inferiores al 0.56 %, lo que indica que los resultados son independientes de la densidad de malla empleada. En consecuencia, se concluye que el modelo numérico ha alcanzado la convergencia de malla y que los resultados del análisis estático pueden considerarse confiables y representativos del comportamiento estructural del sistema.

Tabla 6: Comparación entre el mallado estándar vs fino.

Elemento	Mallado estándar			Mallado fino		
	Tamaño (mm)	No. de elementos	No. de nodos	Tamaño (mm)	No. de elementos	No. de nodos
Base de la mesa	12.06	12,805	23,682	6.03	63,558	103,832
Submesa	6.24	17,299	22,531	3.12	60,995	88,066
Submesa superior	6.65	7,066	11,956	3.32	51,789	79,129

Tabla 7: Esfuerzos máximos obtenidos con mallado estándar y refinado.

Elemento	Esfuerzo máximo (mallado inicial) [MPa]	Esfuerzo máximo (mallado refinado) [MPa]	Variación [%]
Base de la mesa	15.73	15.79	0.38
Submesa	53.68	53.98	0.56
Submesa superior	24.89	24.89	0.00

3.3. Pruebas de funcionamiento

Durante las pruebas se ejecutó la secuencia programada, verificando el desplazamiento alternado de los actuadores en los ejes X y Z, los cuales se muestran en la Figura 18, conforme a los tiempos establecidos en la rutina. Se observó que ambos actuadores completaron correctamente los recorridos de extensión y retracción, sin interferencias mecánicas ni fugas en el sistema hidráulico. La prueba permitió validar el acoplamiento entre la estructura, el sistema hidráulico y el control mediante PLC, garantizando el correcto funcionamiento de la mesa para posteriores ensayos instrumentados.

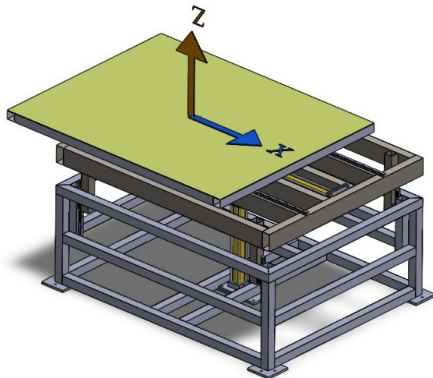


Figura 18: Grados de libertad de la mesa vibratoria en los ejes X (horizontal) y Z (vertical).

Se desarrollaron rutinas en Python para la lectura, almacenamiento y visualización de los datos en tiempo real provenientes de los sensores. Este sistema permitió monitorear el comportamiento dinámico de la mesa vibratoria durante los recorridos de los actuadores hidráulicos, registrando las variaciones temporales de desplazamiento y aceleración en los ejes X y Z.

En las Figuras 19 y 20 se presentan gráficamente las señales experimentales de aceleración y desplazamiento, obtenidas durante las pruebas, donde se observa el comportamiento dinámico de la mesa en ambos ejes. La variación del perfil desplazamiento ideal propuesto en la figura 13 con respecto a la obtenida en la figura 20 se atribuyó a efectos debidos a la naturaleza del

sistema hidráulico, así como holguras mecánicas y la dinámica propia del fluido, lo que genera desviaciones respecto a una respuesta armónica ideal.

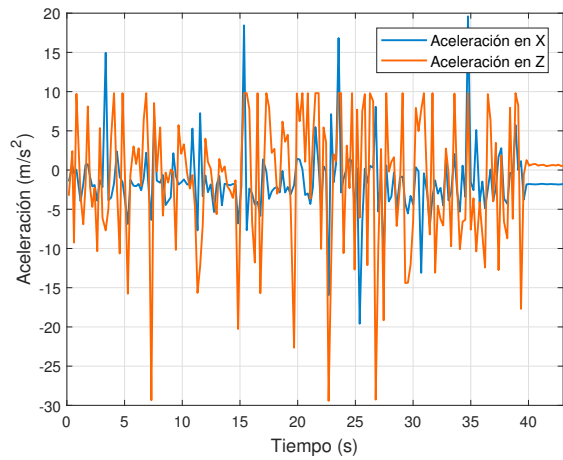


Figura 19: Gráficas de aceleración para los ejes X y Z.

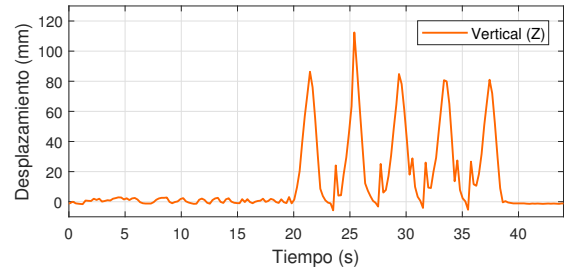
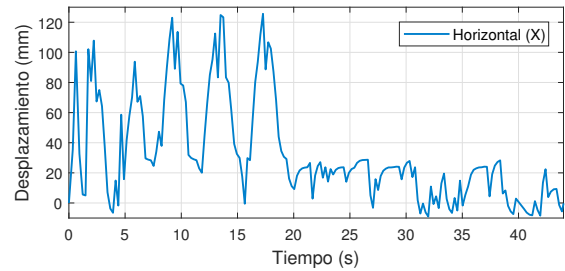


Figura 20: Gráficos espacio-fase para los desplazamientos en los ejes X y Z.

A través de los datos de desplazamiento ideales y de los desplazamientos medidos experimentalmente, se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE) como métrica para cuantificar la diferencia global entre ambos perfiles de movimiento, para los desplazamientos de los ejes X y Z. El RMSE se calculó por medio de la ecuación (1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (1)$$

dónde N el número total de datos, x_i es el i -ésimo valor real y \hat{x}_i es el i -ésimo valor deseado.

A partir de la ecuación (1) se obtienen valores RMSE de 25.08 mm para el desplazamiento en el eje X y de 29.75 mm para el desplazamiento en el eje Z. Estos valores indican que, en promedio, la respuesta real del sistema presenta desviaciones respecto al comportamiento ideal programado, manteniendo

do la tendencia general y la secuencia temporal de activación establecida en el control de lazo abierto.

3.4. Análisis de resultados experimentales

Los resultados de las pruebas de funcionamiento de la mesa mostraron un comportamiento estable y repetitivo en las secuencias de movimiento, confirmando la precisión del control ejecutado por el PLC. Por tanto, el presente trabajo ofrece un enfoque orientado a la instrumentación accesible y estable a través de la implementación de una tarjeta Raspberry Pi 5, unidad de medición inercial (MPU6050) y sensores ultrasónicos (HC-SR04), lo que reduce significativamente los costos sin comprometer la obtención de datos experimentales confiables. Desarrollos recientes de mesas sísmicas de costo moderado, como los presentados por (Damerji *et al.*, 2021) y (Serea y Donciu, 2023), enfatizan la precisión del control y la integración con sistemas de alerta temprana.

Durante las pruebas experimentales se observó que los desplazamientos en los ejes X y Z se mantuvieron dentro de los rangos definidos por las señales de referencia programadas en el sistema de control. El análisis temporal de las señales de desplazamiento y aceleración no evidenció desviaciones abruptas respecto al movimiento esperado ni la presencia de oscilaciones de alta frecuencia superpuestas, lo que produce un comportamiento estable del sistema durante los ensayos realizados.

A diferencia de los prototipos descritos por (Coral *et al.*, 2011) y (Morales Reyes, 2017), los cuales se orientan principalmente a la generación de movimientos horizontales y a esquemas de control más básicos. La mesa desarrollada en este estudio incorpora dos grados de libertad accionados mediante un sistema hidráulico. Esta configuración permite una mayor capacidad de carga y la generación de excitaciones combinadas, constituyendo una ventaja en términos de versatilidad y realismo para pruebas dinámicas de estructuras a escala.

Las gráficas registradas evidenciaron la respuesta del sistema ante los cambios de dirección y las etapas de retorno a la posición inicial. Estos resultados validan el diseño estructural, la eficiencia del sistema hidráulico y la funcionalidad del movimiento, sentando las bases para la realización de futuras pruebas de simulación sísmica con diferentes perfiles de excitación. En particular, se aprecia que en el eje Z la aceleración presenta un decaimiento más pronunciado en comparación con el eje X. Este comportamiento se atribuye a que el actuador vertical opera de manera permanente contra la acción de la gravedad y la carga estática asociada al peso muerto de la mesa, incrementando las fuerzas resistivas y la disipación de energía del sistema, lo que se traduce en una menor aceleración efectiva.

Asimismo, la desaceleración observada no es uniforme a lo largo del tiempo, lo cual puede explicarse por el comportamiento no lineal del sistema hidráulico, donde el caudal y la presión no permanecen constantes durante todo el ciclo de operación. La combinación de fricción seca y viscosa, así como variaciones transitorias en las condiciones del fluido, contribuyen a una respuesta dinámica variable a lo largo del movimiento.

Los registros sísmicos naturales presentan un amplio contenido espectral de frecuencias que puede abarcar desde valores del orden de 0.01 Hz hasta aproximadamente 20 Hz, dependiendo de la magnitud del evento sísmico, el mecanismo de ruptura y las condiciones locales del sitio (Aki y Richards, 2002;

Kramer, 1996). Diversos estudios han demostrado que los sismos de gran magnitud concentran una parte significativa de su energía en el rango de bajas frecuencias, típicamente inferiores a 1 Hz, asociadas a movimientos de larga duración y grandes longitudes de onda, dominadas por ondas superficiales (Chopra, 2020; Boore, 2003). En este contexto, la máquina emuladora de sismos desarrollada en este trabajo, con un rango de operación comprendido entre 0.01 y 0.5 Hz, resulta factible para la reproducción de eventos sísmicos de gran magnitud y para el análisis del comportamiento dinámico de estructuras flexibles, de mediana y gran altura, así como de sistemas suelo-estructura en suelos blandos. Por tanto, el rango de frecuencia seleccionado es técnicamente viable y consistente con los objetivos de simulación sísmica de baja frecuencia reportados en la literatura especializada.

La Figura 13 muestra los desplazamientos programados de los actuadores hidráulicos A y B, correspondientes a la secuencia ideal. En este caso, ambos actuadores presentan perfiles de desplazamiento claramente definidos, con amplitudes constantes y transiciones abruptas entre ciclos, sin considerar efectos dinámicos ni perturbaciones del sistema físico.

Por otro lado, la Figura 20 presenta los desplazamientos medidos experimentalmente durante la ejecución real de la secuencia programada. En comparación con los perfiles ideales, se observa que los desplazamientos reales conservan la tendencia general y la secuencia temporal de activación de cada actuador; sin embargo, presentan variaciones en amplitud, mayor suavizado en las transiciones y la presencia de oscilaciones adicionales, especialmente durante los cambios de dirección. Estas diferencias se atribuyen principalmente a las características dinámicas del sistema hidráulico, tales como la compresibilidad del fluido, las pérdidas internas, la fricción en los sellos y los retardos inherentes al sistema de control. También considerando que el pistón vertical está ubicado en la parte central de la mesa, esto genera pequeñas oscilaciones derivadas de que la carga no está distribuida uniformemente.

En el caso del desplazamiento en el eje X, el comportamiento real muestra una reducción progresiva en la amplitud con respecto al perfil ideal, así como fluctuaciones alrededor de la trayectoria esperada, lo que sugiere la influencia de efectos de amortiguamiento y perturbaciones mecánicas como pequeñas oscilaciones. De manera similar, en el desplazamiento en el eje Z se mantiene la secuencia de activación programada, aunque con picos de desplazamiento inferiores a los valores ideales y con mayor dispersión entre ciclos consecutivos.

El esquema de control en lazo abierto aplicado en este trabajo no emplea retroalimentación del desplazamiento para corregir el error de seguimiento durante la ejecución de la secuencia.

En términos prácticos, los valores de RMSE obtenidos se consideran aceptables para una plataforma experimental de bajo costo orientada a fines académicos y de investigación básica, ya que no comprometen la ejecución de la secuencia programada ni la repetibilidad de los ensayos. Asimismo, estos resultados del RMSE proporcionan una referencia cuantitativa que permite identificar el margen de mejora del sistema, particularmente mediante la futura implementación de esquemas de control en lazo cerrado orientados a la reducción del error de seguimiento.

4. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo permitió integrar con éxito las etapas de diseño mecánico, análisis estructural, construcción, instrumentación y validación experimental preliminar de un prototipo funcional de mesa vibratoria. El diseño en SolidWorks permitió definir una estructura robusta de acero A36, conformada por tres componentes principales “base, submesa y submesa superior” cuyas dimensiones y características garantizaron estabilidad y resistencia frente a cargas de operación de hasta 200 kg. El análisis estructural por el método de elemento finito demostró que los esfuerzos máximos se mantuvieron muy por debajo del límite elástico del material, con factores de seguridad superiores a 2, lo que confirma la idoneidad del diseño. La implementación del sistema hidráulico y la programación del PLC en RSLogix 500 permitieron generar secuencias controladas de desplazamiento en los ejes X y Z, validando la correcta respuesta mecánica del sistema. Finalmente, el uso de los sensores MPU6050 y HC-RS04, junto con la Raspberry Pi 5, permitió realizar la adquisición, procesamiento y visualización de datos en tiempo real, obteniendo gráficas de desplazamiento y aceleración, las cuales permitieron hacer una comparación con un perfil teórico ideal definido por cinco ciclos de extensión y retracción lineal, y mediante el cálculo del RMSE se obtuvieron valores de 25.08 mm para el desplazamiento en el eje X y de 29.75 mm para el eje Z. Evaluando el error relativo porcentual con respecto al desplazamiento total por ciclo de 240 mm se obtuvieron valores de 10.4 % y 12.3 % en los ejes X y Z, respectivamente. Por consiguiente el sistema presenta desviaciones respecto al comportamiento ideal programado, manteniendo la tendencia general y secuencia temporal de la activación establecida en el control de lazo abierto. En conjunto, estos resultados demuestran la viabilidad técnica y operativa de la mesa vibratoria, sentando las bases para futuras etapas orientadas a la replicación de movimientos sísmicos reales, el análisis dinámico de estructuras y la optimización del sistema de control.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto, a la Red Nacional de Minerales Estratégicos del Tecnológico Nacional de México por el apoyo técnico brindado y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación SECIHTI por la beca posdoctoral número 8107509, y las becas de posgrado número 346981, 320314 y 167377.

Referencias

- Aki, K. y Richards, P. G. (2002). *Quantitative Seismology*. University Science Books, Sausalito, CA, 2 edición.
- Al-Subaihawi, S., Ricles, J., Quiel, S., Marullo, T., y Malik, F. (2024). Real-time hybrid simulation of structural systems with soil-foundation interaction effects using neural networks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 53(15):4688–4718.
- Bernal, M., Aponte, J., y Carrillo, J. (2015). Sistemas de control para mesas vibratorias: Una revisión crítica - control systems for shake tables: A critical review. *Ingeniería y Desarrollo (0122-3461)*, 33:331–355.
- Boore, D. M. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*, 160(3–4):635–676.
- Chopra, A. K. (2020). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Pearson, Boston, MA, 5 edición.
- Coral, H. A., Ramírez, J. M., Rosero, E. E., Thomson, P., Gómez, D., y Marulanda, J. (2011). Diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele-operable para modelos estructurales a pequeña escala. *Ingeniería y competitividad*, 12(2):95–115.
- Damerji, H., Yadav, S., Sieffert, Y., Debove, L., Vieux-Champagne, F., y Mallecot, Y. (2021). Design of a shake table with moderate cost. *Experimental Techniques*, 46:365–383.
- Damerji, H., Yadav, S., Sieffert, Y., Debove, L., Vieux-Champagne, F., y Mallecot, Y. (2022). Design of a shake table with moderate cost. *Experimental Techniques*, 46(3):365–383. Desarrollo y validación de una mesa de vibración uniaxial con costo moderado.
- He, J., Chen, J., Ren, X., y Li, J. (2020). A shake table test study of reinforced concrete shear wall model structures exhibiting strong non-linear behaviors. *Engineering Structures*, 212:110481. Pruebas de mesa vibratoria para muros de corte y comportamiento no lineal.
- Humaihi, A., Shamkhi, M., y Al-Hachami, T. (2018). Design, manufacturing and testing of small shaking table. *International Journal of Engineering and Technology*, 7:426–430.
- Ibuki, R., Doi, T., Izawa, J., Uemura, K., y Sreng, S. (2025). Shake table test and numerical simulation on verification for seismic stability of railway embankments taking into account damage process. *Quarterly Report of RTRI*, 66(4):227–232. Shake table test aplicado a estabilidad sísmica de terraplenes; incluye BIBTeX disponible.
- Kausel, E. (2017). *Advanced Structural Dynamics*. Cambridge University Press.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Lin, Y., Xu, Y., Wang, A., Chai, W., Wang, Y., Xu, W., y Zong, Z. (2024). Implementation of real-time hybrid simulation using a large shake table with onboard actuators. *Engineering Structures*, 305.
- Morales Reyes, J. (2017). Diseño, prototipaje y caracterización de una mesa sísmica de 1 grado de libertad a escala. Tesis de licenciatura, Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales.
- Paz, M. y Leigh, W. (2004). *Structural Dynamics: Theory and Computation*. Springer New York, NY, 5 edición.
- Serea, E. y Donciu, C. (2023). Shaking table design for testing earthquake early warning systems. *Designs*, 7(3).