

**PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA MESA  
SIMULADORA SÍSMICA**

**PROPOSAL FOR THE DESIGN OF A SEISMIC  
SIMULATION TABLE**

**ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN**

**Tenorio, Miguel Ángel<sup>1</sup>**

UVP Universidad del Valle de Puebla

im42127@uvp.edu.mx

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2070-297X>

**López, Sergio Raúl<sup>2</sup>**

UVP Universidad del Valle de Puebla

sergio.lopez@uvp.edu.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9762-8109>

Recibido el 7 de junio de 2024. Aceptado el 13 de septiembre de 2024. Publicado el 15 de diciembre de 2024.

## **Reseña del Autor 1**

Estudiante de Ingeniería Mecatrónica, ha participado en diversos concursos de robótica, Expo Ciencias México la cual se lleva a cabo por la universidad de UPAEP, así mismo ha colaborado con el CONCYTEP en la elaboración de una CNC. Ha colaborado con organizaciones privadas del sector industrial y tecnológico implementando diseño de software, ensamblaje y aplicaciones Mecatrónicas para el desarrollo de productos.

## **Reseña del Autor 2**

Ingeniero Industrial por el Tecnológico Nacional de México Campus Puebla, Maestro en Ingeniería Administrativa y Calidad por la Universidad La Salle Benavente, Doctor en Alta Dirección por la Universidad del Valle de Puebla. Posdoctor en Administración de Negocios por el Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente. TSU en Gestión y Administración de PyME por la Universidad Abierta y a Distancia de México. Ha colaborado con organizaciones privadas de los sectores manufacturero, comercial y de servicios implementando Sistemas de Gestión de Calidad, desarrollando y mejorando procesos, gestionando información de sistemas y aplicándola en la toma de decisiones. Ha trabajado en publicaciones e impartido conferencias en diversas instituciones como BUAP, UPAEP, CEUNI, IEU, UVP, etc., relacionadas con temas de liderazgo, productividad, motivación, marketing, ingeniería y uso de la información en procesos de investigación.

## Resumen

Este artículo presenta una propuesta de diseño para una mesa vibratoria simuladora de sismos, destinada a realizar ensayos en modelos estructurales a pequeña escala. La mesa utiliza un motor con sistema de rodamiento lineal, controlado por un servocontrolador que recibe señales de referencia y realimentación a través de un encoder lineal. Las especificaciones cuidadosamente definidas permiten realizar ensayos de vibración libre, armónica, periódica y aleatoria (simulación de sismos). Estas especificaciones superan las aceleraciones máximas de sismos reales conocidos, lo que asegura la validez de los resultados. Este diseño busca proporcionar una herramienta precisa y versátil para investigaciones en ingeniería sísmica y pruebas estructurales a pequeña escala.

**Palabras clave:** Corteza terrestre, Ingeniería sísmica, Sismo, Reducción del riesgo de desastres, Diseño estructural.

## Abstract

This thesis presents a design proposal for a vibrating earthquake simulator table, intended for testing small-scale structural models. The table uses a motor with a linear bearing system, controlled by a servo controller that receives reference and feedback signals through a linear encoder. Carefully defined specifications allow for free, harmonic, periodic and random vibration tests (earthquake simulation). These specifications exceed the maximum accelerations of known real earthquakes, ensuring the validity of the results.

This design seeks to provide a precise and versatile tool for seismic engineering investigations and small-scale structural testing.

**Keywords:** Earth's crust, Earthquake engineering, Earthquakes, Disaster risk reduction, Structural design.

## Introducción

La mecatrónica, una disciplina en constante evolución, fusiona la mecánica y la electrónica para crear sistemas inteligentes y automatizados. La mecatrónica, una disciplina en constante evolución, fusiona la mecánica y la electrónica para crear sistemas inteligentes y automatizados.

En este contexto, las mesas vibratorias emergen como herramientas cruciales para estudiar el comportamiento estructural ante acciones sísmicas, estas son fundamentales para la ingeniería sismorresistente. La disponibilidad de herramientas de simulación de sismos a pequeña escala es limitada y, en ocasiones, prohibitivamente costosa. Se plantea la necesidad de diseñar una mesa vibratoria que, mediante una optimización integral, ofrezca una alternativa accesible y precisa para la simulación de movimientos sísmicos.

La investigación propuesta busca generar beneficios significativos en la ingeniería sismorresistente y simulación de sismos, se espera que la optimización de la mesa vibratoria aporte mejoras sustanciales. La optimización busca mejorar la accesibilidad, reducir costos y complejidades, y permite más accesibilidad para instituciones de investigación, gobiernos locales y profesionales de la ingeniería estructural.

La aplicación efectiva de la mesa vibratoria en el diseño y evaluación de estructuras sismorresistentes tiene el potencial de reducir pérdidas humanas y materiales durante eventos sísmicos, en general, reflejar la alcance e importancia de la investigación propuesta en el sector.

## Planteamiento del problema

En la actualidad, el campo del estudio de sismos no está tan desarrollado y en cuanto a herramientas para la simulación de sismos que ayuden a prevenir desastres estructurales no están tan actualizadas o son demasiadas caras y por consecuencia se tienen pérdidas humanas, En el caso de México, este ha sufrido terremotos de grandes magnitudes que han dejado consecuencias catastróficas debido a la interacción de las placas tectónicas, que han provocado daños severos en varias ciudades, no tan solo en aquellas ubicadas cerca de la trinchera Mesoamericana, sino también en ciudades localizadas en la porción noroeste del país (Barrientos, 2021).

Dichos dispositivos o herramientas se han convertido en una parte fundamental para la ingeniería sismorresistente y han demostrado ser efectivos para estudiar modelos dinámicos estructurales complejos, ya que las mesas vibratorias están compuestas por actuadores, sensores eficientes y sobre todo el sistema de control (Carrillo, 2013).

Es importante estudiar este sector al 100% para que el desarrollo de dicha herramienta sea más barata y eficiente, puesto que las mesas vibratorias pueden ser clasificadas según su tamaño, el tipo de actuador que genera el movimiento o grados de libertad.

Así mismo, es crucial desarrollar un buen diseño, ya que de esto depende que la mesa vibratoria sea más barata y eficiente y así sea posible ser adquirida por los gobiernos o investigadores de la rama sísmica, ingeniería civil, entre otras relacionadas con el diseño y construcción de estructuras.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación se centra en Proponer el diseño de una mesa vibratoria mediante la investigación y utilización del software SolidWorks para el diseño que mejore la eficiencia y precisión de simulaciones de movimientos sísmicos.

## Revisión bibliográfica

Los Movimientos sísmicos, siempre han sido y están presentes en el entorno del ser humano y dicha naturaleza causa una gran cantidad de muertes y daños materiales, por estas razones el estudio de los movimientos telúricos ha tenido un avance en las formas de contrarrestar los daños o consecuencias que estos movimientos generan en las estructuras.

Una de las soluciones propuestas ha sido la simulación de movimientos sísmicos a escala de diversas estructuras en una Mesa Vibratoria que han sido una herramienta de suma importancia en la investigación y evaluación de daños y comportamiento de estructuras.

De acuerdo con Mexicano (2017), indica en su estudio que: los sismos son vibraciones de la tierra ocasionadas por la propagación en la superficie o en el interior de la corteza terrestre de varios tipos de ondas. Las causas más generales por las cuales estos suceden son:

- Tectónica: originados por el desplazamiento de las placas tectónicas que conforman la corteza terrestre y es la causa que genera más sismos.
- Volcánica: generados por la erupción violenta de volcanes cuyo efecto genera grandes sacudidas que afectan sobre todo a los lugares cercanos.
- Hundimiento: originados cuando al interior de la corteza terrestre se produce una acción erosiva de las aguas subterráneas y esto deja un vacío, el cual termina por ceder ante el peso de la parte superior y esta caída genera vibraciones conocidas como sismos.
- Explosiones atómicas: ocasionadas por el propio ser humano y que al parecer tienen una relación con los movimientos sísmicos.

medio de ondas, de manera que de acuerdo con la forma en cómo se dispersen esas ondas desde el epicentro o punto de origen, se generará y se sentirá un movimiento vertical, horizontal incluso ambos en la superficie (Mi sistema solar, 2019).

### ***Movimiento oscilatorio***

Este se caracteriza por generar movimientos horizontales, lo cual provoca en la superficie un movimiento de balanceo, da una sensación de que se mueve de un lado a otro, este movimiento sísmico es uno de los más comunes y el menos peligroso, ya que la energía producida en ondas se dispersa lentamente aunque esto no garantiza que deje de manifestarse con mucha fuerza, sus ondas pueden elevarse y contraerse de una manera amplia y larga, esto permite que las construcciones o estructuras puedan soportar sus movimientos bruscos y golpes fuertes.

### ***Movimiento trepidatorio***

Este se caracteriza por generar ondas expansivas de manera vertical o en todas las direcciones, por lo que entre más cerca del epicentro se encuentre se sentirá con mayor fuerza los movimientos ascendentes y descendentes de una forma violenta, su capacidad destructiva es muy alta, así como también depende de diferentes variables como, profundidad, magnitud, condiciones geológicas, diseño de las construcciones u estructuras.

La utilización de registros para evaluar la extensión de los perjuicios originados por los sismos, así como la cuantificación de la energía liberada, ha contribuido al avance científico al establecer pautas que posibilitan una

comprensión más profunda de este fenómeno natural, el objetivo principal de estos enfoques es preservar vidas.

Estos métodos se fundamentan en la recopilación sistemática de datos a lo largo de días, meses y años, con la intención de desarrollar medidas de seguridad destinadas a reducir al mínimo las pérdidas humanas y materiales. Las escalas proporcionan criterios que ayudan a caracterizar los diversos eventos sísmicos, entre las más significativas hasta la fecha se encuentran la escala de Mercalli y la de Richter (Mi sistema solar, 2019).

Las distintas escalas de magnitud representan diversas maneras de calcular la magnitud a partir de la información disponible, todas estas escalas mantienen la estructura logarítmica original diseñada por Charles Richter y se ajustan de manera que el rango medio se relacione aproximadamente con la escala original de “Richter”.

De acuerdo con la investigación de Sage (s.f.), indica que un sismógrafo es un dispositivo utilizado para registrar los desplazamientos de la Tierra. Este instrumento consta de un sensor denominado sismómetro, el cual detecta los movimientos del suelo y está conectado a un sistema de registro, en términos simples, un sismómetro básico, sensible a los movimientos verticales del terreno, puede conceptualizarse como una masa suspendida por un resorte, a su vez suspendido sobre una base que se desplaza con los movimientos de la superficie terrestre.

La variación relativa entre la masa y la base proporciona una medida del movimiento vertical de la Tierra, para incorporar un sistema de registro, se instala un tambor en la base y se sujeta un marcador a la masa. El desplazamiento relativo entre la masa y la base puede registrarse, lo que genera así una serie de registros sísmicos conocidos como sismogramas.

Los sismógrafos operan según el principio de inercia, donde objetos estacionarios, como la pesa en la ilustración, permanecen sin movimiento a menos que se les aplique una fuerza, no obstante, la masa tiende a permanecer estacionaria,

mientras que la base y el tambor experimentan movimientos, los sismómetros utilizados en estudios sísmicos son diseñados para ser extremadamente sensibles a los movimientos del terreno; por ejemplo, pueden detectar movimientos tan pequeños como 1/10.000.000 de centésima (distancias casi tan pequeñas como espacios atómicos) en lugares excepcionalmente tranquilos.

Con base en la investigación de SensorGo (2023), este indica que un acelerómetro es un sensor empleado para evaluar la aceleración experimentada por un cuerpo, una estructura o el suelo, se clasifican como sensores inerciales, ya que miden la fuerza de inercia generada cuando una masa se ve afectada por un cambio de velocidad en la zona sísmica. En el contexto sísmico, un acelerómetro funciona como un sensor que registra la frecuencia y magnitud generadas por el suelo durante un evento sísmico, en sismología, este tipo de instrumento se utiliza para detectar y registrar los efectos de las ondas sísmicas generadas por terremotos de alta intensidad.

La simulación sísmica es un proceso crucial en la ingeniería estructural que implica la recreación controlada de las fuerzas y movimientos generados por un sismo en laboratorios con mesas vibratoras en entornos controlados cuyo objetivo es evaluar el comportamiento y la respuesta de estructuras frente a eventos sísmicos, lo que proporciona información de suma importancia para el diseño y la mejora de edificios u otras infraestructuras.

Según CENAPRED (2016), se indica que una mesa vibratoria es un dispositivo mecánico cuyo diseño simula el movimiento del suelo generado por un sismo, así como sus efectos en estructuras construidas a la escala natural o reducida.

A partir de los elementos que presentan estas definiciones, es posible afirmar que una mesa vibratoria es un dispositivo diseñado para replicar las vibraciones y movimientos sísmicos en laboratorios. Consiste en una plataforma sobre la cual se colocan modelos a escala de estructuras o materiales, La mesa aplica vibraciones

controladas que imitan las condiciones sísmicas, esta permite la evaluación del comportamiento estructural bajo cargas sísmicas simuladas.

Los principios de diseño para una mesa vibratoria son fundamentales para garantizar que la mesa vibratoria funcione eficazmente. Estos incluyen consideraciones dentro de la capacidad de carga, la amplitud y la frecuencia de las vibraciones, así como la implementación de sistemas de control y la correcta aplicación de estos principios nos asegura una simulación precisa de las condiciones sísmicas por ende los resultados confiables para la evaluación de las estructuras.

Dado que ciertos efectos perjudiciales de los terremotos se originan a partir de la vibración lateral en las estructuras, el simulador sísmico se planifica para producir excitaciones en diferentes direcciones. El mecanismo encargado de impulsar la mesa vibratoria se compone principalmente de un motor deslizable mediante un sistema de rodamiento lineal. Este motor está firmemente ajustado a una placa de aluminio o área de carga de la mesa vibratoria, donde se ubica la estructura a ser probada (Coral et al., 2010).

### ***Accionamiento husillo y guías***

Este mecanismo consta de un husillo, que gira mediante la acción de un motor y está conectado al husillo a través de un embrague. El desplazador está unido al eje y crea el movimiento de la plataforma. Se mueve al mismo sentido con la guía lineal y el rodamiento, esto permite un movimiento suave en la misma dirección. En cuanto al soporte del motor, la base y el soporte del eje en el lado opuesto del motor están hechos de aluminio, lo que facilita el procesamiento.

Al final del husillo se fija una rueda moleteada que permite mover el husillo manualmente y sirve para capturar el movimiento axial, que es absorbido por los

cojinetes fijados al husillo y el montaje de este accionamiento o configuración es fácil y económico. Tiene componentes que son fáciles de comprar y diseñar. Además, el husillo tiene muy poco juego, que es la principal preocupación de este sistema.

### ***Accionamiento Biela-Manivela***

El sistema se compone de una base donde se posiciona el modelo de construcción, un mecanismo de soporte para el ensamblaje, cojinetes lineales para desplazar la base en una dirección y un sistema de Biela-Manivela. La manivela enlaza el disco y la base, lo cual permite un rango de movimiento variable. Esta biela está vinculada al motor para generar movimiento rotativo.

Además, el sistema engloba un sistema de control para encender el motor, regular la velocidad y supervisar la frecuencia. Sin embargo, este sistema presenta el inconveniente de necesitar ajustes manuales en la amplitud, además de la posibilidad de problemas de ruido que pueden surgir durante la caracterización, lo que podría distorsionar el resultado final.

### ***Accionamiento de Excitación de Motor Lineal***

El motor lineal está controlado por un driver que se basa en una señal de referencia SP que indica el tipo de movimiento (ya sea sísmico, armónico o de barrido de frecuencia) y una señal de retroalimentación de un encoder lineal que mide la velocidad y el desplazamiento de la sacudida. mesa. La señal de referencia es

generada por la computadora y enviada como voltaje al servo-controlador a través del tablero de control y adquisición de datos.

Este sistema consta de rodamientos que soportan cargas y permiten un funcionamiento de baja fricción y alta velocidad. Estos también incluyen encoders lineales y motores lineales. Los motores síncronos de imanes permanentes (PMLSM) son los más comunes porque pueden lograr altas aceleraciones sin la necesidad de elementos de transmisión como engranajes reductores, cadenas o tornillos de acoplamiento para convertir la velocidad de rotación. Esto elimina la fricción y las limitaciones mecánicas de aceleración y velocidad.

De manera que el servo-controlador debe suministrar al motor la corriente nominal y máxima que consume el motor durante el funcionamiento, finalmente, la computadora o dispositivo genera una señal que desencadena el movimiento. Los sistemas de excitación de motores lineales se presentan como la mejor opción para conseguir un control preciso del movimiento y evitar holguras y ruidos no deseados, sin embargo, no es una opción realista debido a su elevado coste.

### ***Accionamiento Hidráulico***

Dicho Accionamiento o sistema es considerado uno de los más viables, ya que nos brinda una elevada precisión, por consiguiente, es un sistema altamente fiable, su funcionamiento consiste en un desplazamiento lineal, mediante el uso de una servo-válvula se puede controlar los cambios de sentido y cuenta con un actuador hidráulico para producir el movimiento (Isairias Montaña, 2020).

El sistema hidráulico actúa sobre una plataforma donde se incorpora un servo-controlador con la función de transmitir una señal al actuador en la servo-válvula,

dicha señal es transmitida con una muy excelente precisión, lo que lo hace un sistema muy fiable, por consiguiente, tiene un elevado costo y complejo montaje (Isairias Montaña, 2020).

### ***Accionamiento neumático***

Con respecto al accionamiento neumático es menos preciso en comparación con su contraparte, el sistema hidráulico, debido a la compresibilidad del aire, En este sistema, se logra un desplazamiento lineal similar al del sistema hidráulico, pero en lugar de utilizar un fluido hidráulico, se utiliza un compresor de aire para proporcionar un flujo de aire. Los actuadores en este sistema son controlados en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración mediante señales eléctricas que son dirigidas a una electroválvula (Isairias Montaña, 2020).

De manera que, este sistema incluye soportes y rodamientos lineales similares a los de un sistema con actuador hidráulico. El sistema neumático combina varios componentes, incluyendo un compresor de aire para proporcionar el flujo de aire, un filtro y regulador de aire que trabajan junto con el compresor, una válvula para mantener la presión necesaria, una servo-válvula o electroválvula, y un servo-controlador para adquirir datos, controlar y comunicarse con la electroválvula y el actuador neumático (Isairias Montaña, 2020).

Los componentes que conforman una mesa vibratoria generalmente se dividen en cinco grupos grandes: (1) Elementos Mecánicos y Cimentación, (2) Fuente de Alimentación y esta puede ser hidráulica, neumática o Eléctrica, (3) Actuadores, (4) Sistema de adquisición de datos y (5) Sistema de Control (Carrillo et al., 2013).

De acuerdo con el estudio de Bernal et al. (2015), indica que la precisión de los movimientos y la veracidad de los resultados en una mesa vibratoria es crítico para

la obtención de una evaluación experimental muy significativa, ya que el sistema de control se utiliza para poner a prueba el valor medido de la respuesta (aceleración, velocidad o desplazamiento medido) con una entrada (variable de control), para así producir la señal de control apropiada al sistema y, de esta manera, reducir la desviación o error al valor más pequeño posible.

Por lo general las teorías más utilizadas en el sistema de las Mesas vibratorias son la teoría de control moderno, la teoría de control clásico y en los últimos años se ha investigado el control digital, estos tipos de control pueden ser en 2 tipos de configuración, lazo abierto (no realimentado) y en lazo cerrado (realimentado) y estos se distinguen por la capacidad que tienen de responder a diferentes perturbaciones del sistema.

### ***Método y Metodología***

El procedimiento para llevar a cabo la propuesta de diseño de una mesa simuladora sísmica es:

- **Definición del Problema:** Describir el propósito de la mesa simuladora sísmica y su importancia en la investigación de eventos sísmicos, Así como enumerar los requisitos y objetivos específicos del diseño de la mesa, como la capacidad de simular diferentes tipos de terremotos, la precisión de los movimientos, la seguridad del equipo, entre otros.
- **Revisión Bibliográfica:** Investigar y resumir los trabajos previos relacionados con mesas simuladoras sísmicas, analizar las metodologías utilizadas en diseños anteriores y las lecciones aprendidas de sus implementaciones.
- **Selección de Componentes y Tecnologías:** Describir los componentes principales que se necesitarán para construir la mesa, como actuadores, sensores,

controladores, Diseño Conceptual: Presentar los conceptos iniciales para el diseño de la mesa, incluyendo esquemas, dibujos y modelos conceptuales, Explicar las consideraciones de diseño, como la capacidad de carga, la estabilidad, la resistencia a la vibración, la modularidad, entre otros.

## Resultados

De acuerdo con la aplicación de los instrumentos de la investigación los principales resultados obtenidos son los siguientes: en la tabla 1 se observa la comparación de los materiales con los cuales se puede realizar la fabricación de la mesa simuladora sísmica, con la cual se puede interpretar para saber que material es el correcto en calidad precio y sobre todo sea precisa, ya que este es el punto de esta investigación.

**Tabla 1**

*Comparación de Materiales*

<b>Criterios</b>	<b>Acero (1020)</b>	<b>Aluminio (6061)</b>	<b>Madera (Pino)</b>	<b>Polimeros Compuestos (Epoxy)</b>	<b>Hormigón (Convencional)</b>	<b>Fibra de Carbono (T700)</b>
<b>Resistencia a la tracción (MPa)</b>	350	310	40	70-130	3-5	4100-5600
<b>Durabilidad (años bajo uso estándar)</b>	30-40	20-30	10-15	20-30	50-100	15-20
<b>Costo (USD por kg)</b>	0.75	1.5	0.10	5-15	0.05	25-30

<b>Mantenimiento (costo anual, USD)</b>	Bajo (\$10-20)	Bajo (\$10-30)	Alto (\$50-100)	Bajo (\$10-30)	Muy bajo (\$5-10)	Bajo (\$10-20)
<b>Peso (kg/m<sup>3</sup>)</b>	7850	2700	500	1200-2000	2400	1750
<b>Facilidad de adquisición (disponibilidad)</b>	Alta	Alta	Alta	Media	Alta	Baja
<b>Impacto ambiental (escala de 1 a 5, donde 1 es bajo)</b>	3	3	1	4	2	3

*Nota.* Elaboración propia, Se puede observar en la tabla los elementos obtenidos en la investigación con los diferentes materiales y propiedades.

En la Tabla 2 se observa la comparación de los actuadores a partir de la relación calidad-precio, los actuadores eléctricos lineales emergen como la opción más equilibrada para una mesa simuladora de sismos. Ofrecen una alta precisión y un amplio rango de frecuencia, esenciales para simular diversos tipos de sismos con fidelidad.

**Tabla 2**

*Comparación de Actuadores*

<b>Criterios</b>	<b>Actuador Hidráulico</b>	<b>Actuador Neumático</b>	<b>Actuador Eléctrico Lineal</b>	<b>Motor de Vibración Eléctrico</b>
<b>Tipo de Actuador</b>	Hidráulico	Neumático	Eléctrico	Eléctrico
<b>Rango de Frecuencia (Hz)</b>	0.1 - 50	0.5 - 100	1 - 200	1 - 100
<b>Fuerza Máxima (kN)</b>	500 - 1000	100 - 500	10 - 100	1 - 50
<b>Precisión (mm)</b>	0.01 - 0.1	0.1 - 1.0	0.01 - 0.1	0.1 - 1.0
<b>Costo (USD)</b>	5000 - 20000	1000 - 5000	1000 - 10000	100 - 1000
<b>Tamaño (L x W x H, mm)</b>	1000 x 500 x 300	500 x 300 x 200	300 x 100 x 100	200 x 100 x 100
<b>Peso (kg)</b>	100 - 500	50 - 200	10 - 50	1 - 20

*Nota.* Elaboración propia, Se puede observar en la tabla los elementos obtenidos en la investigación con los diferentes actuadores, así como sus propiedades.

Aunque su fuerza máxima es menor en comparación con los actuadores hidráulicos, es suficiente para muchas aplicaciones. Además, su tamaño compacto y costo intermedio los hacen accesibles y prácticos para proyectos que buscan una solución eficiente sin comprometer la calidad de las simulaciones. Por estas razones, se recomienda la implementación de actuadores eléctricos lineales para la mesa simuladora de sismos.

## Conclusiones y discusión

A lo largo del estudio, se han evaluado diversos actuadores y materiales de construcción, para identificar las opciones más adecuadas que cumplan con los requisitos del proyecto, El análisis comparativo realizado en este estudio revela que los actuadores eléctricos lineales son la opción más balanceada en términos de precisión, rango de frecuencia y costo, lo que supera a los actuadores hidráulicos, neumáticos y motores de vibración eléctricos en varias categorías críticas para el diseño de una mesa vibratoria eficiente y precisa.

En cuanto a los materiales, la combinación de aleaciones de aluminio y acero se destacó como la mejor opción debido a su excelente relación entre peso y resistencia, lo que facilita la construcción de una mesa robusta pero manejable. Esta combinación supera en durabilidad y rigidez a los sistemas construidos exclusivamente con aluminio, y ofrece una mayor ligereza y resistencia a la fatiga que los materiales compuestos o únicamente de acero.

La implementación de estos componentes en el diseño de una nueva mesa vibratoria promete una significativa mejora en la capacidad de simulación de movimientos sísmicos. Sin embargo, algunos desafíos persisten, como la necesidad de un equilibrio entre la precisión de simulación y la escalabilidad del diseño para aplicaciones a mayor escala.

El avance en el diseño de mesas vibratorias no solo contribuirá a una mejor comprensión de los efectos de los movimientos sísmicos en diversas estructuras, sino que también tiene el potencial de mejorar significativamente los estándares de construcción y seguridad sísmica. La información recopilada y analizada en esta investigación proporciona una base sólida para futuras mejoras tecnológicas y metodológicas, esto fomenta una aproximación más precisa y eficiente en la ingeniería sísmica.

La elección de una mesa construida con aleaciones de aluminio y acero, combinada con actuadores eléctricos lineales, se destaca como la mejor opción para este diseño. Esta combinación no solo mejora la durabilidad y manejabilidad de la mesa, sino que también proporciona una precisión y un rango de frecuencia superiores que son cruciales para la simulación de sismos detallada y precisa.

Comparado con las mesas actualmente disponibles en el mercado, este diseño propuesto ofrece varias ventajas. La precisión de los actuadores eléctricos lineales y la durabilidad de los materiales seleccionados garantizan una superioridad en términos de eficiencia y fidelidad en las simulaciones. Además, el costo intermedio de los actuadores eléctricos lineales hace que este diseño sea más accesible y sostenible a largo plazo en comparación con las opciones más costosas y de mantenimiento intensivo como los actuadores hidráulicos.

El diseño propuesto no solo cumple con el objetivo general de mejorar la eficiencia y precisión de las simulaciones sísmicas, sino que también establece un marco para futuras innovaciones y aplicaciones en el campo. La combinación de un análisis exhaustivo de componentes y materiales, junto con una visión crítica de las limitaciones y oportunidades, proporciona una dirección clara para el desarrollo continuo en esta área vital de investigación.

## Referencias

- Barrientos, L. Á. (2021). Una revisión general acerca de las características y consecuencias de grandes sismos en México. *GEOS*, 41(2). <https://geos.cicese.mx/index.php/geos/article/view/64>
- Bernal, M., Aponte, J., & Carrillo, J. (2015). Control systems for shake tables: A critical review. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(2), 331-355. <https://doi.org/10.14482/inde.33.2.5865>
- Carrillo, J., Bernal Ruiz, N. M., & Porras, P. (2013). Evaluación del diseño de una pequeña mesa vibratoria para ensayos en ingeniería sismo-resistente. *Scielo*, 23(1), 92-100. <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v23n1/v23n1a06.pdf>
- CENAPRED. (2016). ¿Qué es una mesa vibradora? Gobierno de México. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/que-es-una-mesa-vibradora-cenapred#:~:text=Una%20mesa%20vibradora%20es%20un,a%20escala%20natural%20o%20reducida>
- Coral, H. A., Ramírez, J. M., Rosero, E. E., Thomson, P., Gómez, D., & Marulanda, J. (2010). Diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele-operable para modelos estructurales a pequeña escala. *Ingeniería y Competitividad*, 12(2), 95-115. <https://www.redalyc.org/pdf/2913/291323528007.pdf>
- Isairias Montaña, J. A. (2020). Análisis sistemático de literatura referente al comportamiento dinámico de estructuras mediante la experimentación en mesas vibratorias a escala [Tesis de Grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio institucional de la Universidad Cooperativa de Colombia. <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/1f469e0c-75d9-4939-aae7-eaf2e1c802bo/content>
- Mi sistema solar. (2019). Tipos de sismos: según su movimiento, según su origen y más. Conozcamos los Planetas, la Luna, el Sol, y Todo el Sistema Solar. Mi sistema solar. [https://misistema-solar.com/tipos-de-sismos/?expand\\_article=1#google\\_vignette](https://misistema-solar.com/tipos-de-sismos/?expand_article=1#google_vignette)
- Sage. (s.f.). Incorporated Reasearch Institutions for Seismology. Sage. [https://www.iris.edu/hq/inclass/fact-sheet/cmo\\_trabaja\\_un\\_sismografo](https://www.iris.edu/hq/inclass/fact-sheet/cmo_trabaja_un_sismografo)
- SensorGO. (2021). Acelerómetro: Utilidad Ante el Alertamiento de Sismos. SensorGO. <https://sensorgo.mx/acelerometro/>