

Análisis Sistemático de Literatura Acerca de la Evaluación Del Comportamiento Dinámico de Estructuras Mediante la Experimentación en Mesas Vibratorias de Modelos a Escala Reducida.

Yosenith Tatiana Illidge Cohen

*Facultad De Ingeniería Civil. Universidad Cooperativa De Colombia
Santa Marta, Colombia*

yosenith.illidge@campusucc.edu.co

Abstract - The purpose of this article is to identify the alternatives of the vibratory tables system in order to point out the importance of its implementation in the laboratories of the engineering faculty of the Universidad Cooperativa de Colombia, Sede Santa Marta, to carry out an extensive literary analysis about the the implementation of the vibratory tables to evaluate the behavior of the structures in front of the dynamic loads the vibrating relations are a tool of the pedagogical tools of great utility in the education of the engineering. Theoretical-practical understanding of what happens when a seismic event occurs. The investigation includes the definition and classification of vibrating tables; the characteristics and specifications of the elements that make up, as well as the cost that represents the construction and implementation of the same, for which a comparison of the vibrating tables that have been correct, constructed and implemented in other universities at a level national and international, aspects of quality and cost.

KEY WORDS: Earthquake, structures, seismic tables, loads.

RESUMEN

El presente artículo tiene como propósito identificar las alternativas del sistema mesas vibratorias a fin de señalar la importancia de su implementación en los laboratorios de la facultad de ingeniería de la Universidad Cooperativa de Colombia, Sede Santa Marta, para ello se realiza un extenso análisis literario acerca de la implementación de mesas vibratorias para evaluar el comportamiento de estructuras frente a cargas dinámicas considerando esto de fundamental importancia porque las mesas vibratorias son una de las herramientas pedagógicas de gran utilidad en la enseñanza de la ingeniería, debido a que permite al estudiante obtener un mayor entendimiento teórico-práctico de lo que sucede al producirse un evento sísmico. En la investigación se contempla, la definición y clasificación de mesas vibratorias; las características y especificaciones de los elementos que la componen, así como el costo que representa la construcción e implementación de la misma, para lo cual se realiza un comparativo de las mesas vibratorias que han sido diseñadas, construidas e implementadas en otras universidades a nivel nacional e internacional, considerando aspectos de calidad y costo.

PALABRAS CLAVES: Sismo, estructuras, mesas sísmicas, cargas.

I. INTRODUCCION

Se entiende por sismo un evento físico causado por la liberación repentina de energía debida a un desplazamiento de la corteza terrestre, en la que parte de esa energía se irradia en todas las direcciones en forma de ondas sísmicas, generando vibraciones en el terreno. [1]

Las obras ingenieriles se encuentran atadas a cargas sísmicas, las cuales ocasionan grandes deformaciones que pueden llevar la estructura al colapso. Sabido esto, es importante determinar la respuesta o comportamiento dinámico de las edificaciones, la cual depende de cómo es afectada la cimentación de la estructura por los movimientos sísmicos. Este tipo de fenómenos han tenido como consecuencia grandes pérdidas humanas y económicas por lo que es importante implementar sistemas de alerta temprana y control de movimientos geológicos, posibilitando la construcción de estructuras con adecuada capacidad de resistencia ante cualquier evento sísmico que se presente sea de poca o moderada intensidad, además de resistir las fuerzas que le impone su uso.

Bien es sabido que los sismos no se pueden predecir, pero si se pueden construir estructuras que tengan la capacidad de resistir movimientos sísmicos y para ello es necesario emplear técnicas de análisis y diseño que permitan evaluar el comportamiento de las estructuras frente a cargas sísmicas mediante experimentaciones en los laboratorios de ingeniería. Una de las herramientas más útiles para realizar estos ensayos son las mesas vibratorias que consisten en una plataforma móvil que simula los movimientos de un sismo sobre un modelo estructural. [2]

En la presente investigación se hace énfasis en la implementación de mesas vibratorias para que se pueda determinar la respuesta tanto en desplazamiento, velocidad y aceleración que tiene las estructuras frente a cualquier carga dinámica que se coloque, sea un sismo, una carga armónica, etc. De tal manera que se puedan minimizar los efectos catastróficos de los terremotos, construyendo edificaciones que sean capaces de resistir las cargas estáticas y dinámicas presentes que además toma importancia porque estas estructuras son diseñadas con cargas de sismo y de viento.

A partir de un extenso estudio y análisis acerca de los artículos nacionales e internacionales que se han realizado sobre diseño, construcción e implementación del sistema mesas vibratorias, en el presente artículo se presentan un comparativo con respecto a costo y calidad del sistema mesas vibratorias que se propone en cada una de las investigaciones,

considerando los parámetros requeridos para su diseño, además de cada uno de los componente de la mesa.

II. OBJETIVOS

A. *Objetivo General:*

Realizar un análisis sistemático de literatura acerca de la implementación de mesas vibratorias para evaluar el comportamiento de las estructuras frente a cargas dinámicas identificando su importancia en los laboratorios de la facultad de ingeniería de la Universidad Cooperativa de Colombia.

B. *Objetivos específicos:*

- ✓ Estudiar las alternativas que han sido planteadas para evaluar el comportamiento de las estructuras frente a cargas dinámicas.
- ✓ Investigar mediante las diferentes fuentes de información acerca de los artículos de investigación basados en la construcción de mesas vibratorias a nivel nacional e internacional
- ✓ Establecer los beneficios que acarrea implementar una mesa vibratoria en los laboratorios de la facultad de ingeniería de la Universidad Cooperativa de Colombia.
- ✓ Identificar los parámetros requeridos para el diseño de mesas vibratorias seleccionando las características y elementos más adecuados para evaluar el comportamiento de estructuras.

III. JUSTIFICACION

Vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de la estructura, una característica de su propio comportamiento ante la acción de un sismo descrito a través de una ley llamada causa-efecto, donde la Causa es el sismo y el efecto es el daño (Sandi, 1986). Se entiende entonces por vulnerabilidad, la falta de resistencia de una edificación frente a los fenómenos tectónicos que pueden ocurrir de manera inesperada, y ello depende de las características estructurales de la edificación, del método de construcción, del sistema estructural de resistencia sísmica, de la calidad y característica de los materiales empleados, de la ubicación de la construcción dependiendo de la zona de amenaza sísmica en que se encuentre, sea ésta, alta, intermedia o baja.

Los fenómenos naturales que han tenido lugar en Colombia Han demostrado que existe una naturaleza sísmica en la región y han revelado la vulnerabilidad que presentan algunas construcciones ante la ocurrencia de sismos, [2] además dicha vulnerabilidad también se puede estimar a partir del nivel de amenaza sísmica en que se encuentre una zona, el cual se estima en función de los valores de aceleración, para el caso

de Colombia el nivel de amenaza sísmica está dada por el valor de la aceleración pico efectiva y la velocidad pico efectiva; Según estos valores establecidos en el reglamento de construcciones sismo resistente NSR-10, el Distrito de Santa Marta se encuentra en una zona sísmica intermedia en el Caribe colombiano. Dado esto y considerando la importancia de un análisis detallado del comportamiento de las estructuras frente a cargas dinámicas, se hace necesario implementar una técnica de experimentación que permita al ingeniero y a los estudiantes del programa de ingeniería civil contrastar los conocimientos teóricos con los prácticos, teniendo en cuenta que en la región Caribe no se dispone de estas herramientas, por lo tanto es difícil poder hacer una antítesis sobre lo teórico y lo que sucede en la realidad, lo cual se podría facilitar si en las instalaciones educativas se implementan alternativas que permita al estudiante un mejor entendimiento teórico-práctico de los efectos producidos por los eventos sísmicos en las estructuras.

Para este caso se estudia la implementación de una mesa vibratoria que es una herramienta experimental para estudiar el comportamiento de estructuras sometidas a efectos sísmicos.

El objetivo de una mesa vibratoria es la reproducción del registro de una excitación sísmica sobre la base de componentes estructurales, subestructuras o sistemas estructurales completos evaluando su comportamiento. [3]

Lo que se pretende con esta investigación es realizar un análisis sistemático de literatura acerca de la construcción de mesas vibratorias para evaluar el comportamiento de las estructuras frente a cargas dinámicas, debido a que el ensayo de estructuras mediante mesas vibratorias es fundamental en la ingeniería, entendiendo por medio de este tipo de procesos y de una mejor manera el comportamiento de los elementos o sistemas estructurales de cualquier material, sea de acero, concreto, madera, mampostería, etc.

Por otro lado, la presente investigación también se justifica a causa de la necesidad de obtener un mayor entendimiento teórico-práctico de lo que sucede al producirse un evento sísmico, y debido al auge que vive actualmente la Ingeniería sísmica dentro de la Ingeniería Civil, así como el gran interés de investigar los efectos sísmicos producidos a distintas magnitudes, hace que el ensayo y análisis en estructuras a escala normal o pequeña sobre mesas vibratorias sea la mejor opción para comprender esta clase de estudios que han tomado gran importancia y que será de mucha utilidad si se implementa en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Cooperativa de Colombia, ya que no se dispone de estas herramientas experimentales que permita a

la comunidad estudiantil un aprendizaje más técnico y didáctico.

IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sismos tienen como consecuencias no sólo numerosas pérdidas humanas, sino también múltiples detrimentos en la infraestructura y en las invaluable construcciones existentes e históricas, su inesperada ocurrencia y su gran poder de destrucción han convertido a los sismos en uno de los fenómenos naturales más temidos en el mundo. [5]

Anualmente, en el mundo se registra en promedio un terremoto de magnitud 8 o superior y 17 terremotos de magnitudes entre 7.0 y 7.9, (USGS, 2008). como resultado, miles de personas han fallecido debido al colapso de edificios, producto de grandes terremotos como el ocurrido en 1995 en la ciudad de Kobe en Japón, el terremoto de El Centro en el Sur de California (USA) que dejó cerca del 80% de los edificios con daños y cerca del 50% de ellos tuvieron que ser demolidos, el terremoto de San Francisco (USA) en 1989 que causó cuantiosos daños en autopistas y edificios, el terremoto de Armenia (Colombia) en 1999, el terremoto del 12 de enero de 2010 en Haití, y finalmente uno de los terremotos más grandes en la historia ocurrido el 27 de febrero de 2010 en Chile con una intensidad de 8.8 grados en la escala de Richter.[26]

A lo sumo, no es posible la predicción de un evento sísmico, por lo que es necesario implementar alternativas de solución como la construcción de estructuras sismo resistente que puedan minimizar los daños que han sido producidos por este fenómeno. Dentro de la ingeniería estructural se ha encontrado gran cantidad de fallas que han sido producto en su mayoría de cargas dinámicas, las cuales están siempre presentes en los diferentes tipos de estructuras.

Debido a esta problemática, se han estudiado herramientas determinísticas de las cuales se han empleado más los modelos matemáticos, sin embargo es un método que no considera los efectos aleatorios que se presentan en un evento sísmico, por ende se han desarrollado herramientas experimentales para complementar dicho método, tales como los ensayos dinámicos en mesas vibratorias, ensayosseudodinámicos y cuasi estáticos que permiten evaluar los efectos de los sismos en las construcciones. (Carrillo J. y Alcocer S. 2012).

En la presente investigación se hace énfasis en la implementación de mesas vibratorias ya que estas, son la aproximación más natural a los movimientos sísmicos, de tal manera que se pueda determinar la respuesta tanto en

desplazamiento, velocidad y aceleración que tiene las estructuras frente a cualquier carga dinámica que se coloque, sea un sismo, una carga armónica, etc. Logrando de esta forma minimizar los efectos catastróficos de los terremotos, construyendo edificaciones que sean capaces de resistir las cargas estáticas y dinámicas presentes que además toma importancia porque estas estructuras se diseñan con cargas de sismo y de viento.

Además en Colombia es muy poca la experimentación que se hace de una estructura frente a cargas dinámicas por la falta de equipos ya que son bastante costosos, para lo que se busca estudiar la mejor alternativa de construir una mesa vibratoria que funcione adecuadamente con el menor costo posible.

Por otro lado, en el reglamento Colombiano Sismo resistente del 2010 (NSR-10) se hace un planteamiento estático de las estructuras, es decir suponiendo una carga sísmica se plantea una expresión estática que consiste en la aplicación de una fuerza horizontal equivalente a una estructura con geometría regular, reemplazando la acción sísmica por fuerzas estáticas laterales equivalentes y de esta manera se calcula el periodo fundamental y el espectro de diseño. El problema se presenta en que dicho método no se podría aplicar en caso de que la estructura sea completamente irregular, para este caso, se evalúa el comportamiento de esas estructuras por medio de experimentaciones como es la implementación de mesas vibratorias.

V. DEFINICION DE MESA VIBRATORIA

Una mesa vibratoria es esencialmente una plataforma móvil que simula los movimientos de un sismo en una, dos o más direcciones sobre un modelo estructural. El esquema general de una mesa vibratoria se muestra en la Figura 1.

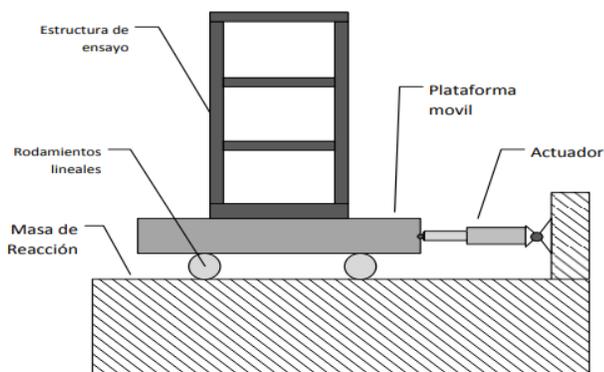


Fig. 1. Esquema general de una mesa vibratoria. Fuente: Automatización de un simulador uniaxial para estudios experimentales en ingeniería sismo-resistente.

Esta herramienta consta generalmente de una plataforma móvil, una masa de reacción, uno o más actuadores y apoyos para la plataforma, que generalmente son rodamientos lineales. [12]

Los simuladores sísmicos se han desarrollado principalmente en USA y Japón iniciando desde poca capacidad de carga hasta miles de toneladas (Ogawa et al., 2001). Como prueba de lo anterior, en el mundo existen alrededor de 42 instalaciones con simuladores sísmicos de gran escala, los más relevantes son el simulador de la ciudad de Miki en Japón inaugurado en enero de 2006 con capacidad de 1,200 toneladas, y el simulador de Tadotsu también ubicado en Japón inaugurado en 1984, con capacidad de 1,000 toneladas (OECD/NEA, 2004).

Los ensayos en mesa vibratoria generalmente involucran modelos a escala reducida, aunque en los últimos años se han llevado a cabo ensayos en escala real usando mesas vibratorias como la del E-Defense en Japón o la de la Universidad de San Diego en Estados Unidos, las cuales permiten el ensayo de estructuras en escala real y simulan movimientos en 6 grados de libertad.[17]

A. componentes de una mesa vibratoria

Los componentes de una mesa vibratoria se dividen básicamente en cinco grandes grupos: (i) elementos mecánicos y cimentación, (ii) fuente de alimentación eléctrica, hidráulica o neumática, (iii) actuadores, (iv) control, y (v) sistema de adquisición de datos. [11] Los elementos mecánicos de una mesa vibratoria se pueden dividir en componentes móviles y estáticos. Entre los componentes móviles se encuentran la plataforma de ensayo y los rodamientos lineales que soportan la carga. Los componentes estáticos comprenden los rieles de los rodamientos lineales. El diseño de los elementos mecánicos debe cumplir requerimientos de rigidez, resistencia, durabilidad, y economía. Los materiales más usados para este fin son: magnesio, acero y aluminio. Sin embargo, por su bajo costo y maleabilidad, el más adecuado es el acero SAE 1020 con $f_u = 500$ MPa (ASTM A-105). [14] Los componentes de la mesa vibratoria se ilustran en la figura 2:

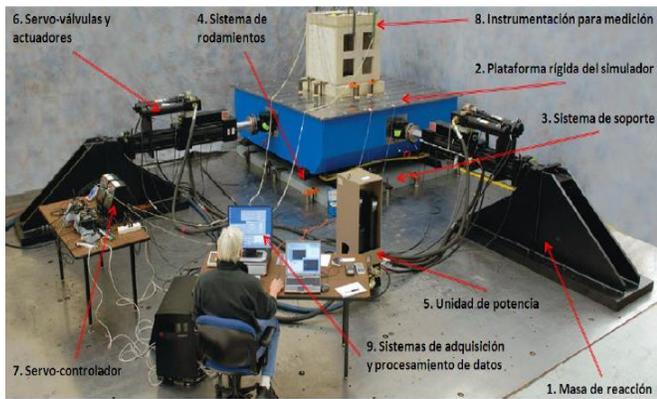


Fig. 2. Componentes de una mesa vibratoria. Fuente: Tesis diseño, modelamiento y simulación de una mesa sísmica unidireccional hidráulica.

- 1) *Masa de reacción:* Durante las pruebas en el simulador, el actuador debe ser fijado a una masa de reacción, la cual va a permitir que la fuerza del actuador reaccione sobre ella. Esta masa también sirve como soporte para el sistema entero del simulador y va fijada al suelo del laboratorio.[15]
- 2) *Plataforma rígida del simulador:* Proporciona la superficie para el anclaje del modelo a simular, esta plataforma es montada a través de un sistema de cojinetes lineales a la masa de reacción y su movimiento es controlado por el movimiento del actuador, la plataforma del simulador, debe ser lo suficientemente rígida, en las dos direcciones diferentes a la determinada para su movimiento. Adicionalmente, su peso debe ser adecuado, con el fin de minimizar los efectos de un modelo vibratorio en la mesa.[15]
- 3) *Sistema de soporte:* en este sistema provee una superficie de deslizamiento a la plataforma de simulación, dentro de los métodos usados para estos sistemas, encontramos los actuadores verticales, sistemas de aire a presión, películas de aceite, y sistemas de rodamiento lineales. Con estos sistemas se busca bajar la fricción para minimizar la distorsión de la respuesta deseada en las simulaciones de estructuras, rigidez que limite los movimientos ajenos a la simulación y gran capacidad de carga.[18]
- 4) *Sistemas de rodamientos lineales:* Provee una superficie de deslizamiento para la plataforma del simulador, para movimiento a baja fricción.[18]
- 5) *Unidad de potencia:* este sistema genera la potencia y las características de aceleración y frecuencia a la mesa sísmica, dentro de los posibles tipos de unidades, encontramos sistemas de potencia mecánica, sistemas de potencia eléctrica y sistemas de potencia hidráulica.[18]
- 6) *Servo-válvulas y actuadores:* las servo-válvulas son el elemento final de control en un sistema de lazo cerrado, y son las que permiten los cambios de dirección y movimientos del actuador. los actuadores consisten en cilindros hidráulicos lineales que transmiten el movimiento a la plataforma rígida de la mesa.[15]
- 7) *Servo-controlador:* es el puente entre la señal de comando enviada por el computador y los puertos del actuador de la servo-válvula. El servo-regulador utiliza dos niveles de control para regular el movimiento del actuador. El primer nivel del control se llama “lazo interno” y regula los puertos del fluido de la servo-válvula. El segundo nivel de control, llamado el “lazo externo” utiliza la señal de desplazamiento del LVDT montado en el actuador y la compara a la señal de comando enviada por la computadora de control.[15]
- 8) *Instrumentación para medición:* Diferentes sensores son montados en la estructura de la mesa sísmica, con el fin de medir variables durante la simulación; principalmente este tipo de equipos, se instalan medidores de aceleración (acelerómetros), LVDT'S, los cuales se encargan de la mediación de la distancia recorrida por la plataforma y celdas de carga con las cuales se mide la fuerza ejercida por el actuador sobre la plataforma.[15]
- 9) *Sistemas de adquisición y procesamiento de datos:* es el sistema de controlar y actuar el servo-controlador, esto se hace mediante software diseñado especialmente para este tipo de equipos, el cual envía datos acerca de los movimientos de la mesa par la simulación y recibe y procesa los provenientes de las estructuras de prueba en la mesa. [15]

B. clasificación de mesas vibratorias

La clasificación que reciben las mesas vibratorias es muy variada debido a que no existe una regulación al respecto. Generalmente las mesas vibratorias se pueden clasificar según su tamaño, tipo de actuador, grados de libertad, frecuencias de operación, ubicación (en interiores o exteriores), entre otras. [20]

Las mesas vibratorias clasificadas según su tamaño se dividen en pequeñas (menores a 9 m²), medianas (entre 9 m² y 81 m²) y grandes (mayores de 81 m²). [21]

Los grados de libertad que puede tener una mesa vibratoria entre uno y seis grados de libertad. Según la frecuencia o aceleración máxima de simulación de una mesa vibratoria,

ésta se clasifica como para uso educativo, investigativo o análisis a nivel real. [12]

Los actuadores comúnmente utilizados en mesas vibratorias son de tipo servo-hidráulico, servo-eléctrico, mecánico, neumático, etc. La elección del actuador no está relacionada únicamente con sus prestaciones mecánicas, pues para lograr movimientos como los producidos por un sismo el sistema de control de la mesa difiere completamente en su complejidad según el principio de funcionamiento del actuador.[21]

Las mesas vibratorias actuales usan actuadores y sistemas computacionales avanzados para simulaciones de sismos reales o artificiales. En los últimos años, las mesas vibratorias se han convertido en una herramienta eficiente para estudiar los efectos de los sismos sobre las estructuras. Los resultados que han sido analizados en este tipo de ensayos dinámicos han sido fundamentales para validar, calibrar y complementar gran variedad de modelos de predicción que se utilizan para análisis y diseño reglamentario.

VI. ALTERNATIVAS PARA LA CONSTRUCCION DE MESAS VIBRATORIAS.

Existen varias alternativas para diseñar una mesa vibratoria, las cuales se describen a continuación:

A. Sistema biela-manivela

Este sistema se compone de una plataforma donde se va a colocar la maqueta del edificio, un sistema de soportes para el conjunto, rodamientos lineales para proporcionar el desplazamiento de la plataforma en una dirección y el sistema biela-manivela, que está formado por un disco con ranura que permite variar la amplitud de movimiento y una manivela que conecta el disco y la plataforma. La biela se conecta al motor, que le imprime el movimiento de rotación. Además el sistema cuenta con un controlador que se encargade poner en funcionamiento el motor y permite variar la velocidad de rotación y controlar la frecuencia. El esquema de este sistema se muestra en la figura 3.

Este sistema tiene la desventaja de que se requiere un ajuste manual de la amplitud, además de los posibles problemas de ruido que se introducen en la caracterización, distorsionando los resultados finales. [25]

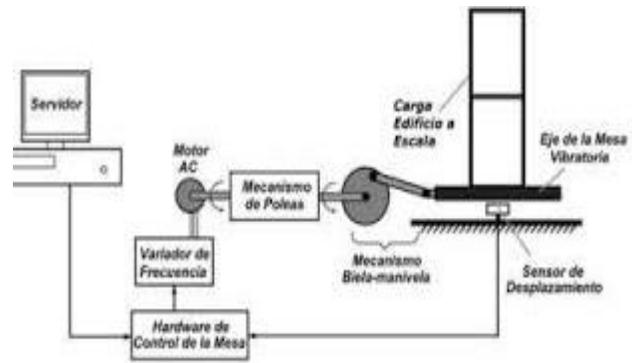


Fig. 3: esquema del sistema de excitación de biela-manivela. Fuente: diseño, prototipaje y caracterización de mesas vibratorias.

B. Sistema correa-polea o slider

El slider o carril motorizado se utiliza, por ejemplo, en el desplazamiento del cabezal de la impresora. Este se compone de un carril que fija la dirección y puede ser de aluminio para proporcionar precisión y suavidad en el movimiento. Al carril se le acopla el carro, que cumple con la función del desplazador de la mesa o plataforma. Se diseña el carro para permitir el movimiento longitudinal de la correa, de forma que esta se encuentre totalmente tensada y se mueva suavemente. Para ello hace falta una polea dentada, otra polea idéntica o un cojinete que permita el desplazamiento en el otro extremo. Necesita un tensor y la correa de transmisión que encaje perfectamente con la polea dentada y además sea de un material bastante rígido para evitar holguras por la elasticidad del material, siendo interesante el uso del poliuretano u otro plástico reforzado. Para controlar el sistema se acopla el motor a la polea dentada. El motor lleva un soporte que hay que diseñar de un material suficientemente rígido: aluminio, plástico u otro. Es una opción sencilla y económica. [25] La mayor complejidad se encuentra en tensar la correa para su correcto funcionamiento. Figura 4:



Fig. 4: slider o carril motorizado. Fuente: diseño, prototipaje y caracterización de mesas vibratorias.

C. Sistema husillo y guías

El mecanismo se compone del husillo que gira sobre sí mismo por la acción del motor, unido a este mediante un acoplamiento. Unido al husillo se diseña un desplazador que produce el movimiento de la plataforma. Esta se desplaza solidaria a las guías o rodamientos lineales, que permite un movimiento suave en dicha dirección. Se diseña también el soporte del motor respecto de la base y el soporte del husillo, posicionándolo en el extremo contrario al motor, todo ello de aluminio que facilita el mecanizado.

Se acopla una rueda moleteada en el extremo del husillo, para permitir el movimiento manual del mismo y sirviendo de retención del movimiento axial, que a su vez es absorbido por los rodamientos colocados en el husillo.

Es un montaje sencillo y económico. Con componentes fáciles de comprar y diseñar. Además el husillo no permite casi holguras, que es el principal interés del sistema. En la figura 5, se muestra la mesa vibratoria con este sistema.[25]

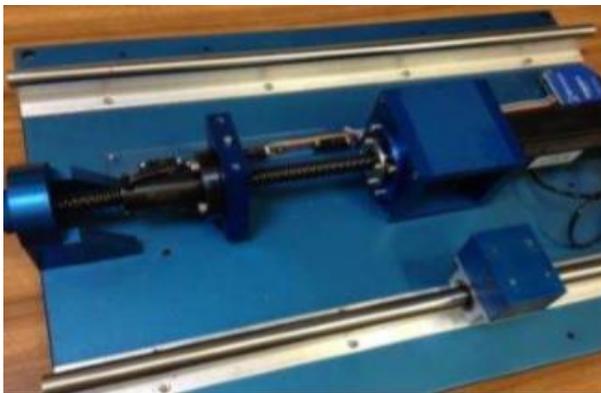


Fig. 5: componentes de la mesa vibratoria con husillo. Fuente: diseño, prototipaje y caracterización de mesas vibratorias.

D. Sistema con actuador hidráulico

Se monta la plataforma sobre un sistema de rodamientos lineales de baja fricción, que permiten el desplazamiento en la dirección de excitación. El movimiento se produce por la acción del actuador. El sistema hidráulico cuenta con una servo-válvula para controlar los cambios de sentido y el movimiento del actuador hidráulico. Para seleccionar este último, se determina la fuerza máxima que debe ejercer, a través de la carga total de la mesa y la estructura del edificio, máxima aceleración del conjunto y teniendo en cuenta capacidad de carga de los rodamientos seleccionados. Por último el servo-controlador transmite la señal enviada del ordenador a los puertos del actuador en el servo-válvula.[25] Figura 6:

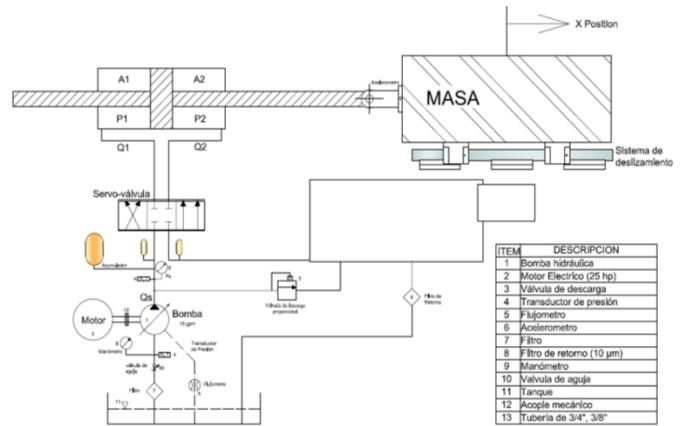


Fig. 6: diseño hidráulico para mesa sísmica. Fuente: tesis, características del sistema hidráulico.

E. Sistema con actuador neumático

El movimiento de una mesa vibratoria neumática se genera por medio de actuadores (cilindros y válvulas), alimentados por un compresor. El desplazamiento, velocidad y aceleración son controlados por señales eléctricas en una electroválvula. Estas son recibidas desde un controlador, el cual toma acciones en función de la orden dada. Para sostener y permitir el desplazamiento de la mesa, se incorporan unos soportes y rodamientos lineales, igual que en caso de actuador hidráulico. Pero ahora se compone de un sistema neumático, formado por un compresor de aire que proporciona el flujo de aire necesario, con su filtro y regulador de aire, una válvula que proporciona la de presión, con una servo válvula o electroválvula, un servo-controlador para la adquisición de datos, control y comunicación con la electroválvula y el actuador neumático. Para dimensionar adecuadamente el actuador, hay que calcular la fuerza que este debe transmitir a la mesa.[25] Figura 7.

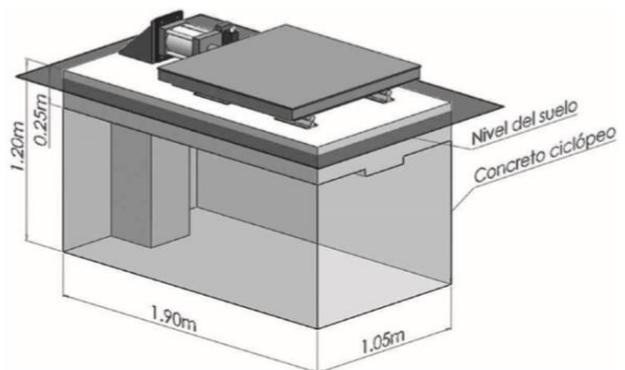


Fig. 7: sistema neumático. Fuente: evaluación del diseño de una pequeña mesa vibratoria.

Los sistemas de excitación neumática son menos precisos que los de hidráulica, por ser el aire un fluido compresible. Pero

sigue siendo una buena opción para este tipo de sistemas. Igualmente que los actuadores hidráulicos, tienen el inconveniente de un montaje bastante complejo y el alto coste económico[25].

F. Sistema de excitación con motor lineal

El movimiento del motor lineal es controlado por un driver que requiere para su funcionamiento, una señal de referencia SP (señal que indica el movimiento: sismo, armónico o barrido en frecuencia) y una señal de realimentación, proveniente del encoder lineal que mide la velocidad y desplazamiento de la mesa vibratoria. La señal de referencia es generada por un ordenador y enviada en forma de voltaje a través de la tarjeta de adquisición y control de datos hacia el servo-controlador.

Este sistema se compone de los rodamientos que deben soportar las cargas y realizar los desplazamientos, con baja fricción y altas velocidades. Se incorpora el encoder lineal y el motor lineal siendo los síncronos de imán permanente (PMLSM) los más utilizados por alcanzar altas aceleraciones y además no requieren de elementos de transmisión como cajas reductoras, cadenas o tornillos de acople para convertir el movimiento de rotación en traslación. Esto evita la fricción y las limitaciones mecánicas en aceleración y velocidad. Además el servo controlador que sea capaz de entregar al motor las corrientes nominal y de pico que va a consumir durante su movimiento. Y el ordenador o dispositivo que genere la señal para producir el movimiento.[25]

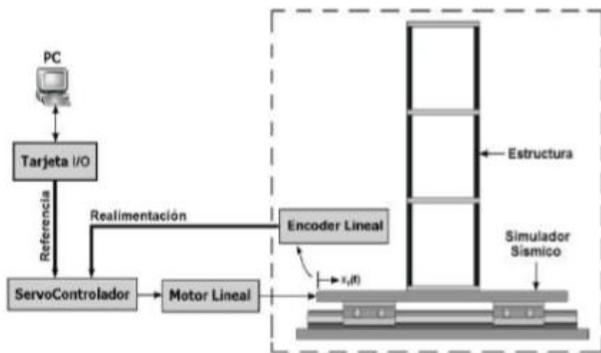


Fig. 8: esquema de sistema de excitación con motor lineal. Fuente: diseño, prototipaje y caracterización de mesas vibratorias.

El sistema de excitación con motor lineal es la mejor opción para un control total de los desplazamientos y evitar holguras y ruidos. Pero su elevado coste lo descarta como opción por completo. Figura 8.

VII. MESAS VIBRATORIAS A NIVEL INTERNACIONAL.

A. Mesa vibratoria de la Universidad Autónoma de Baja California (México).

Está funcionando en el Laboratorio de Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de la Facultad de Ingeniería Ensenada de la Universidad Autónoma de Baja California. Se tiene definida su respuesta y se utiliza dicha mesa para adquirir, de una manera sencilla, un claro entendimiento del comportamiento dinámico de estructuras. La mesa actúa unidimensionalmente con una frecuencia de 1 a 10 Hz, una aceleración de $\pm 2 \text{ m/s}^2$ y una carga máxima de 20 kg. La mesa consta de una plataforma de 68.5 cm de altura sobre la cual están sujetos dos motores de corriente directa marca SIEMENS de uso automotriz, una fuente de poder eléctrica y un eje perpendicular a la plancha sobre el cual

Están montados una polea y un sistema mecánico a base de poleas, el cual está también conectado a una placa perforada, sobre la que se pueden sujetar los especímenes que se requiera probar.[26]

B. Sistema de mesa vibratoria Portátil Shake Table II. PITRA, LanammeUCR.

El sistema de mesa vibratoria está compuesto por una fuente



Fig. 9: Componentes del sistema. Fuente: Quancer Consulting inc.

de poder (UPM), una tarjeta de adquisición de datos (DAC), una computadora ejecutando el software de control WinCon y la mesa vibratoria en sí. Como se muestra en la figura 9.

La mesa vibratoria unidireccional del sistema, es controlada por computadora por medio de una interfaz sencilla, es

portable, de bajo mantenimiento, y de fácil manipulación para prevenir accidentes o daños. Además es de ensamblaje sencillo y requiere de un tiempo mínimo para iniciarse antes de comenzar un experimento.[26]

Este sistema de mesa vibratoria tiene un funcionamiento sencillo y amigable con el usuario. El software WinCon, instalado en la computadora, permite al usuario especificar la amplitud y la frecuencia de las ondas a reproducir. La corriente necesaria para mover la mesa es luego calculada por el WinCon y enviada a través del canal de salida análogo del panel de adquisición de datos al dispositivo UPM. El amplificador de poder en el UPM amplifica la corriente y acciona el motor, moviendo la mesa hacia adelante y hacia atrás a la posición y frecuencia de la onda especificada por el usuario. El desplazamiento y la aceleración resultante de la plataforma son medidos por los sensores respectivos, los cuales están conectados a la tarjeta DAC del panel de adquisición de datos y sus señales pueden ser visualizadas y procesadas en detalle por el WinCon. La mesa Shake Table II es capaz de reproducir ondas sinusoidales, ondas aleatorias y pulsos, así como registros históricos de sismos, como el terremoto de El Centro de 1940.

Los requisitos que cumple la mesa portátil, se muestra en la tabla 1 que se presenta a continuación:

ESPECIFICACIÓN	VALOR
Sobrecarga de diseño	11,3 kg (25 lbf)
Aceleración pico	1 g
Rango de frecuencias operacional	0 - 20 Hz
Velocidad pico	506 mm/s (20 in/s)
Dimensiones de la plataforma deslizante	460 mm x 460 mm (18 in x 18 in)
Desplazamiento máximo	150 mm ± 76 mm (6 in ± 3 in)
Pasos de la mesa vibratoria	< 45, 4 kg (100 lbf)

Tabla 1: Requisitos Especificados Para la Mesa ShakeTable II. Fuente: Dyke, Truman, & Gougl, 2000.

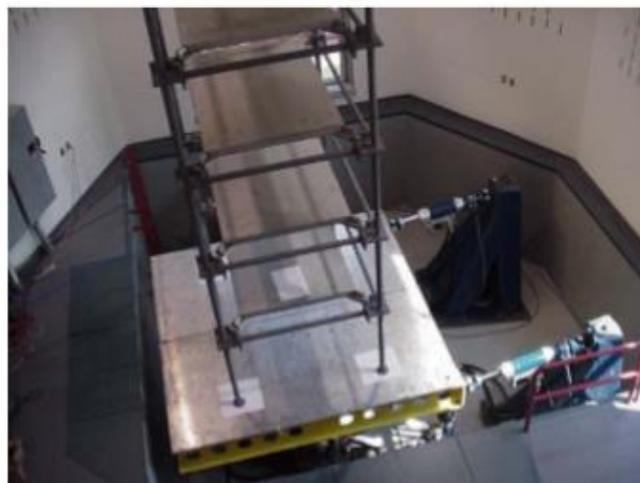


Fig. 8: mesa vibratoria GW-NSF de la universidad de Washington. Fuente: diseño y construcción de mesa vibratoria.

El presupuesto de dicha shaketable II, proporcionado por CARTIF es el siguiente: Precio final = 25984.00€

C. Mesa Vibratoria GW-NSF. The George Washington University - Virginia Campus.

La mesa vibratoria GW-NSF de la Universidad de George Washington es una de las más grandes mesas de 6 grados de libertad de los Estados Unidos. Figura 10:

:

Las dimensiones de la superficie de la placa de acero son de 10' x 10'. Como característica principal se encuentran los seis grados de libertad: 3 Grados Traslacionales – en las dos direcciones de lado a lado (plano horizontal) así como movimiento vertical. 3 Grados Rotacionales – rotaciones en las dos direcciones y un giro torsional.

Por debajo de la mesa se tiene una enorme masa de concreto con un peso aproximado de 340,000 lbs. (170 Toneladas) y alcanza una profundidad de 25-30 pies. La conexión de esta masa de concreto a la base rocosa se realiza mediante 18 pilas con perfil “H”. La finalidad de este sistema a base de una enorme masa de concreto es la de estabilizar la mesa y evita que el movimiento sea transferido al edificio donde se encuentra la mesa vibratoria.

El sistema de la mesa está formado por seis actuadores que aplican una "carga" que permite el movimiento de la mesa. El desplazamiento total de cada actuador es de aproximadamente 8 pulgadas, por lo tanto es el desplazamiento máximo que presenta la mesa en las seis direcciones permitidas. Los actuadores aplican las cargas dinámicas hasta de 80 kiloNewtons.

El movimiento del actuador sobre la mesa vibratoria se produce mediante un sistema hidráulico, el cual genera presión suficiente para originar los movimientos vibratorios necesarios. [27]

El movimiento de los actuadores es a base de dos unidades hidráulicas que proporcionan 1,000 litros (260 galones) por minuto de aceite a 4,000 psi. (libras / pulgadas cuadradas). Cuando la bomba está encendida y la mesa vibratoria está funcionando, el aceite mueve los actuadores y el agua de 65°F circula para enfriar el sistema.[27]

VII. MESAS VIBRATORIAS EN COLOMBIA

En Colombia, la aplicación de mesas vibratorias ha estado en crecimiento debido a la gran utilidad que tiene para la simulación de sismos permitiendo ensayar modelos de edificaciones para evaluar su comportamiento ante cargas dinámicas. Las mesas que se han diseñado y construido en Colombia, se muestran a continuación:

A. Simulador Sísmico Univalle

Esta mesa se encuentra ubicada en el laboratorio de ingeniería Sísmica y Dinámica estructural de la Universidad del valle en la Ciudad de Cali. Este, es el primer simulador sísmico construido en Colombia, y su reproducción de movimientos se limita a una dirección.

Las características de esta mesa, se muestran en la siguiente tabla:

MOVIMIENTO	DIMENSIONES (m)	CAPACIDAD DE CARGA (kg)	RANGO DE FRECUENCIA (Hz)	VELOCIDAD (cm/s)	ACELERACIÓN
Unidireccional	1.1X1.5	1000	0-50	90	4g

Tabla II: Características De la Mesa Sísmica De La Universidad Del Valle. Fuente: Propia.

El simulador sísmico posee cojinetes lineales Schneeberg, y tiene un desplazamiento máximo de 15 cm, todos los componentes relacionados con el simulador (simulador y sistema de adquisición de datos), ocupan un área de aproximadamente 120 m². Este simulador se apoya sobre una base de concreto reforzado de 4 m X 3 m X 1.5 m, aislada del piso.

El sistema hidráulico consiste en un actuador hidráulico lineal de alto rendimiento, una unidad de potencia hidráulica y un controlador digital. El actuador de Shore Western Inc, tiene dos servo-válvulas duales de 15 gpm. Cada una, un LVDT interno y fue seleccionado para cumplir con las

especificaciones de aceleración, velocidad y rango de frecuencias. La unidad de potencia hidráulica, suministrada por Hyco Ltda., opera a 3000 psi y tiene un caudal máximo de 32 gpm. Los controladores fueron diseñados en MATLAB/ SIMULINK y compilados al DSP usando el Real-Time Workshop. El controlador permite al operario escoger el tipo de ensayo a realizar, incluyendo movimientos senoidales, barridos, movimientos aleatorios, y formas predeterminadas como registros de movimientos sísmicos.

Este simulador está enfocado a la verificación y desarrollo de sistemas de control estructural y la implementación de nuevos sistemas constructivos[16]. Figura 11:



Figura 11: simulador sísmico univalle. Fuente, diseño y construcción del simulador sísmico uniaxial de la universidad del valle.

B. simulador sísmico universidad de los andes



Figura 12: simulador sísmico universidad de los andes. Fuente: diseño y construcción de la cimentación para la mesa vibratoria de la universidad de los andes.

Ubicado en el laboratorio de materiales y estructuras de la Universidad de los Andes, existen dos mesas vibratorias una académica y otra de gran tamaño

La mesa vibratoria de gran tamaño y la académica es una mesa sísmica unidireccional, la cual posee las características que se presentan en las tablas 3 y 4 respectivamente:

MOVIMIENTO	DIMENSIONES (m)	CAPACIDAD DE CARGA (kg)	RANGO DE FRECUENCIA (Hz)	ESCALA DE ESTRUCTURAS
Unidireccional	4,5x4,5	50000	0-30	1:1 a 1:4

Tabla III: Características De La Mesa Vibratoria De Gran Tamaño De La Universidad De Los Andes. Fuente: propia

MOVIMIENTO	DIMENSIONES (m)	CAPACIDAD DE CARGA (kg)	RANGO DE FRECUENCIA (Hz)	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO (cm)
Unidireccional	1,05x1,05	2000	0-50	15

Tabla IV: Características De La Mesa Vibratoria Académica De La Universidad De Los Andes. Fuente: Propia

Diferentes tipos de estructuras se pueden someter a pruebas sísmicas con diferentes intensidades. La última de ellas fue en una casa de guadua laminada de un piso.[8]

Tiene otras aplicaciones, por ejemplo, para establecer la resistencia de los brazos que sostienen los televisores en los hospitales o de los cauchos que reciben el impacto de los barcos que atracan en los muelles. La mesa puede reproducir sismos de diferentes intensidades, hasta de 8 grados en escala de Richter[16]

La inversión en la mesa vibratoria fue de aproximadamente 1.000 millones de pesos. Cada prueba puede costar de 15 a 30 millones de pesos. En la actualidad se tiene previsto realizar alrededor de 4 pruebas durante el año, como parte de proyectos de investigación del grupo CIMOC.

C. Simulador sísmico Universidad EAFIT

La mesa vibradora de la Universidad EAFIT está compuesta por una plataforma metálica que emplea vigas de acero de gran peralte y diagonales en tubería de gran diámetro, la cual puede considerarse como infinitamente rígida. Sus dimensiones en planta son de 6 m x 6 m. La cimentación empleada es de concreto reforzada y de gran masa, con el objeto de que no se afecte el movimiento inercial de la mesa.

La plataforma metálica está guiada por cuatro rodillos de caucho lo cual permite que su movimiento se realice solo en una dirección. La mesa vibradora está sostenida por ocho juegos de cables; cuatro a cada lado en la dirección del movimiento de la plataforma. La longitud de los cables es de 7 m y están anclados en una viga de gran peralte de concreto

reforzado, que hace parte del sistema estructural de la nave donde se ubica la mesa. [9]

La mesa tiene la posibilidad de desplazarse ± 30 cm en dirección horizontal. La plataforma está conectada a un actuador hidráulico controlado por computador, de tal manera que, por medio del mismo, se puede definir el movimiento que se desea aplicar a la plataforma y por lo tanto al modelo construido encima de ésta. La carga máxima que se le puede aplicar al actuador es de 10 t, con un desplazamiento máximo de ± 5 cm y una velocidad máxima de 80 cm/s. Estas tres variables, además del peso sobre la plataforma, definen el tipo de señal que se le puede aplicar a la mesa vibradora y por ende al modelo. [8] Las características de la mesa se muestran en la tabla 5:

MOVIMIENTO	DIMENSIONES (m)	CAPACIDAD DE CARGA (kg)	RANGO DE FRECUENCIA (Hz)	VELOCIDAD (cm/s)	DESPLAZAMIENTO
Unidireccional	6x6	70000	0-50	80	10

Tabla V: Características De La Mesa Vibratoria De La Universidad EAFIT. Fuente: Propia.

IX. ANÁLISIS DE COSTOS

El costo generado por la mesa vibratoria dependerá del nivel de equipamiento utilizado, por lo que la mayoría de las mesas vibratorias existentes presentan menores grados de movimiento, y los científicos se deben adaptar a las características presentes para obtener los resultados adecuados.

Para este caso, se muestra una comparación de costos, un sistema neumático y un sistema hidráulico de mesas vibratorias, incluyendo el costo de cada elemento del sistema. Los resultados del análisis de costos de los dos sistemas se muestran en las Tablas 6 y 7. Para incluir la depreciación del peso colombiano, el análisis de costos se realizó en función del salario mínimo mensual vigente (SMMV) para el año 2013. En los costos se ha incluido el valor del Impuesto al Valor Agregado (IVA).

Por consiguiente, considerando dichos costos en función del salario mínimo mensual vigente para el 2018, se tiene para el sistema neumático un costo aproximado de \$42'101,131.38, y para el sistema hidráulico un costo aproximado de \$37'600,299.10. Cabe resaltar que en el presupuesto estimado para el sistema hidráulico no se contempla un elemento que tiene un costo aproximado de treinta millones de pesos, por lo cual queda demostrado que el mecanismo hidráulico es más costoso que el neumático.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO SMMY	VALOR TOTAL SMMY
Cilindro neumático	1	2.17	2.17
Montaje de horquilla en el émbolo del cilindro (pieza metálica formada por tubos y brazos)	1	0.27	0.27
Montaje de platina	1	0.29	0.29
Válvula 5/2 vías, puertos en ¼"	1	1.82	1.82
Electroválvula 5/2, 24 VDC	1	0.65	0.65
Acoples en acero y polipropileno	5	0.07	0.34
Silenciador de alto flujo con conexión de 1"	2	0.09	0.17
Manguera encauchada de ¾"	3	0.27	0.81
Acople válvula pilotada a electroválvula	1	0.16	0.16
Unidad de filtro regulador, lubricador de aire	1	3.81	3.81
Compresor SK-15 con tanque	1	43.40	43.40
Total, SMMY			53.89
Total (\$), 2013			\$ 31,769.697

Tabla VI: Costo Del Sistema Neumático. Fuente: diseño, prototipaje y caracterización de mesas vibratorias.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO SMMY	VALOR TOTAL SMMY
Cilindro hidráulico	1	1.90	1.90
Montaje de horquilla	1	0.25	0.25
Montaje de platina	1	0.25	0.25
Válvula direccional proporcional, accionamiento electrónico	1	13.06	13.06
Base en aluminio tipo colector	1	1.33	1.33
Válvula proporcional de alivio	1	9.83	9.83
Acumulador hidráulico de ¼" de GL	1	3.68	3.68
Manguera encauchada ¾"	5	0.31	1.54
Bomba hidráulica 8 GPM, de paleta compensada y volumen ajustable	1	6.04	6.04
Motor eléctrico de 5 HP con selector de protección térmica	1	3.28	3.28
Montaje de campana y acoples de ejes	1	1.23	1.23
Tanque de aceite de 25 galones, con accesorios	1	3.05	3.05
Transmisor de presión 0-6.9 Mpa (0-1000 psi)	1	2.66	2.66
Total, SMMY			48.09
Total (\$), 2013			\$ 27,250.720

Tabla VII: costo del sistema hidráulico. Fuente: diseño, prototipaje y caracterización de mesas vibratorias.

En la tabla VIII, se puede evidenciar un resumen del costo aproximado de las diferentes mesas vibratorias que han sido estudiadas.

PRESUPUESTOS DE LAS ALTERNATIVAS ESTUDIADAS	
MECANISMO BIELA-MANIVELA	\$1.248.355
MECANISMO CORREA-POLEA O SLIDER	\$1.442.270
MECANISMO HUSILLO Y GUÍAS	\$6.526.084
ACTUADOR HIDRÁULICO	\$ 2.336.685
ACTUADOR NEUMÁTICO	\$ 2.194.584
MOTOR LINEAL	
Miniatura de Shaker con amplificador integrado, que soporta 20 N de pico de fuerza	\$20.907.281
Miniatura de Shaker con amplificador integrado, que soporta 31N de pico de fuerza.	\$21.268.374
MÓDULOS LINEALES ROLLON	\$6.605.762
MÓDULOS LINEALES TECNOPOWER	
Módulo unimotion MTV-65-1610-ISO7-0-130	\$4.538.086
Módulo unimotion MTJ-40-130-S-0-R-R	\$ 3.580.532
Módulo unimotion MTJECO-40-130-S-0-R	\$ 2.861.230

Tabla VIII: presupuesto de las alternativas de mesas vibratoria. Fuente: propia

Como se muestra en las Tablas 6 y 7, el costo del sistema hidráulico consta de más componentes lo que la hace más completa y a menor costo con referencia al sistema neumático. Por tanto, el análisis de costos demuestra que, para mesas vibratorias pequeñas, la utilización del sistema hidráulica es una opción muy adecuada para los centros de investigación o en universidades donde se podrá estudiar el desempeño dinámico de estructuras sometidas a efectos sísmicos.[30]

X. PARAMETROS DE DISEÑO PARA UNA MESA VIBRATORIA.

Cuando se trabaja con una mesa vibratoria se tienen dos problemas principales: (a) que los requerimientos dinámicos sean correctamente escalados, y (b) que los movimientos de la mesa vibratoria sean correctamente controlados para obtener la respuesta deseada. Los modelos que se deseen ensayar deben mantener completamente la similitud dinámica con la estructura real, para que el escalamiento no afecte los resultados del ensayo. En cuanto a las características de movimiento que ofrecen las mesas vibratorias, no existe normatividad ni reglamentación para su elección. Por ejemplo, en términos de frecuencia se encuentran mesas vibratorias que llegan a simular movimientos que varían desde 1 Hz hasta 100 Hz; cada una con diferentes capacidades de carga y de aceleraciones máximas. [27]

Los parámetros como aceleración máxima, frecuencia mínima, frecuencia máxima, capacidad de carga, o desplazamiento, son determinantes a la hora del costo de la mesa y del ensayo que se realizará. Por tanto, la elección de los parámetros se realiza con base en las necesidades particulares de cada diseñador. En cuanto a las características de los movimientos que serán reproducidos por la mesa vibratoria y las demandas sísmicas transmitidas al modelo, se consideran los datos de amenaza sísmica en Colombia y los valores de aceleración pico efectiva (Aa) en zonas de amenaza sísmica media en Colombia. Otro parámetro importante es la frecuencia máxima que debe reproducir la mesa. [28]

Los parámetros de diseño de la mesa vibratoria se muestran en la Tabla siguiente:

PARÁMETROS
Peso máximo sobre la mesa
Grados de libertad
Desplazamientos máximos
Aceleración máxima
Frecuencia máxima de operación

XI. CONCLUSIONES

Las mesas vibratorias son herramientas cruciales para estudiar el desempeño de estructuras ante acciones sísmicas. Estos aparatos se han convertido en una parte fundamental para la ingeniería sísmica resistente, ya que permiten mejorar el comportamiento de las estructuras mediante la experimentación en las mismas, además se ha evidenciado su efectividad para estudiar modelos estructurales complejos, siendo aprobadas en muchas universidades que las han implementado dentro de los laboratorios de ingeniería para hacer investigación y permitir un mejor entendimiento teórico-práctico a los estudiantes.

A nivel mundial existen alrededor de 42 instalaciones con simuladores sísmicos de gran escala, los más relevantes son el simulador de la ciudad de Miki en Japón con capacidad de 1,200 toneladas, y el simulador de Tadotsu también ubicado en Japón con capacidad de 1,000 toneladas (OECD/NEA, 2004). Existen simuladores sísmicos de elevados costos, así como hay otros que su diseño y construcción no representan costos tan significativos, siendo las más costosas aquellas mesas de gran tamaño, con alta capacidad de carga (mayores a 1000 kN), por lo que requieren para su construcción

material con adecuadas características, y las de menor costo, son más pequeñas en dimensión y tienen capacidad de carga inferiores (menor a 200 kN).

Por otro lado, los simuladores sísmicos pueden clasificarse de acuerdo a los actuadores que emplean, los cuales pueden ser neumáticos, hidráulicos o eléctricos, de tal manera que existen mecanismos hidráulicos, los cuales operan a bajas velocidades, siendo esta su principal desventaja, por lo que deben seleccionarse adecuadamente sus elementos de potencia (Motor eléctrico y bombas hidráulicas). Además hay que tener especial cuidado para no exceder las presiones de operación admisibles a las que han sido diseñados los elementos hidráulicos. Sin embargo, este sistema garantiza la generación de movimientos con la precisión del orden de las micras y la aplicación de fuerzas considerables, las cuales juegan un papel importante para garantizar que el simulador sísmico sea capaz de reproducir los movimientos sísmicos.

Por su lado, el sistema neumático, no garantiza el control del movimiento con precisión debido a la alta compresibilidad del aire. El costo inicial de un sistema neumático es bajo debido a que estos sistemas son económicos y tienen un diseño sencillo compuesto de materiales de menor costo. Sin embargo, el costo de operación a largo plazo de estos sistemas puede ser alto porque se necesita una gran cantidad de energía para comprimir el suficiente gas para permitir que el sistema ejerza una cantidad adecuada de presión.

Con un sistema de control muy simplificado, los dispositivos electro-mecánicos tienen importantes ventajas. No requieren un sistema complementario complejo de válvulas, bombas, filtros y sensores. Por lo tanto, las unidades ocupan mucho menos espacio. Tienen muy larga vida de trabajo, prácticamente sin mantenimiento y sin fugas de líquido hidráulico. Los niveles de ruido se reducen significativamente. Adicionalmente, ofrece una gran flexibilidad y simplicidad de control.

XII. REFERENCIAS

- [1] Miguel Angel Osorio Chong «SISMOS, centro nacional de prevención de desastres» Mexico, 2014.
- [2] Ing. Agustín Bertero, Dr. Ing. Raúl Bertero, «Ensayos Dinámicos Sobre Una Columna De Hormigón Armado A Escala En Mesa Vibradora», Buenos Aires septiembre del 2014
- [3] Carmen Patiño Mendoza, Veritas Et Scientia Vol. 7, N° 1, 836-847, «Análisis De Un Modelo Analítico Para Evaluar La Interacción Entre Una Mesa Vibratoria Y Una Estructura De Ensayo Durante Ensayos

De Simulación Sísmica». Enero - Junio del 2018.

- [4] Ing. Alejandro Lehmann, Ing. Alejandro Verri, Agustín Bertero, Ing. Sergio Muñoz, «*Consideraciones De Diseño Y Construcción De Una Mesa Vibradora Para Ejecución De Ensayos Dinámicos*»- Facultad de Ingeniería – Buenos Aires, Septiembre 2012.
- [5] Ing. Patricia Peralta Abadía, Ing. Rolando Castillo Barahona, PhD, Unidad de Puentes, PITRA, LanammeUC. «*Mesa Vibratoria Portátil Para Simular El Efecto De Sismos Sobre Estructuras De Puentes Y Edificaciones*», Costa Rica, Junio 2013
- [6] Juan Pablo Stacey Ruales, Fabricio Yépez, Ph.D. «*Remodelación De Mesa De Excitación Dinámica: Comportamiento Dinámico De Estructuras A Escala* Quito, julio 2015
- [7] Rafael Salinas-Basualdo1, Mario E. Rodríguez2, Roque A. Sánchez. «*Ensayos En Mesa Vibradora De Edificios Miniatura Con Muros Estructurales De Concreto Convencionales Y Autocentrados*». México, D.F. Agosto de 2013.
- [8] Ing. José Luis Bustos, Ing. Francisco Zabala, Ing. Alberto R. Masanet, Ing. Jorge R. Santalucía, Investigadores del Instituto de Investigaciones Antisísmicas de la Universidad Nacional de San Juan. San Juan – Argentina Noviembre 2000
- [9] Espinoza Barreras Fortunato1,2, Flores Aburto Carlos1,2, Miranda Velasco Manuel Moisés1, Huerta López Carlos Isidro3, Parra Meza Alberto1, Vargas Vera Manuel1, Covarrubias Medina Karinal, Carreño Mario1, Ríos Z. Pedro1, Montañez Gil Rubí1, Cristina Valle Méndez1, Ana Laura Romero Luna1, Ismael Vargas Puente, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Guanajuato noviembre 2010.
- [10] «*Unidad de Puentes, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales*» - Universidad de Costa Rica San José, Costa Rica 18 febrero 2013
- [11] Evelyn Andrea Vilches Gonzalez, Universidad de Chile, facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento ingeniería civil. Santiago de Chile, agosto 2010.
- [12] Ing. Morales Reyes, Judith, Universidad De Valladolid, «*Diseño, Prototipaje Y Caracterización De Una Mesa Sísmica De 1 Grado De Libertad A Escala*» Valladolid, Abril 2017.
- [13] Kleber Enrique Romero Núñez, Ing. Mg. Carlos Navarro, «*Implementación De Una Mesa Vibratoria Para El Análisis Dinámico De Estructuras Civiles A Escala En Los Laboratorios De La Facultad De Ingeniería Civil De La Universidad Técnica De Ambato*», Ecuador 2016
- [14] Ing Juan Álvarez Reyes, Instituto Tecnológico Y De Estudios Superiores De Monterrey. Monterrey, Mayo 2008.
- [15] Mauricio Bernal* Jorge Aponte** Julián Carrillo***, «*Sistemas De Control Para Mesas Vibratorias: Una Revisión Crítica.Universidad Militar Nueva Granada (Colombia)*». Volumen 33, N°2 Julio-diciembre, 2015.
- [16] Néstor Mauricio Bernal Ruiz, «*Automatización del Equipo de Simulación Sísmica Uniaxial del Laboratorio de Estructuras*», Bogotá D.C 2013.
- [17] Jorge Mario Cueto Baiz, Laboratorio de modelos estructurales. «*Una alternativa para la enseñanza y la investigación*», Revista Épsilon N.º 15: 237-250 / julio-diciembre de 2010.
- [18] Luis E. Yamin , Ángel E. Rodríguez, Luis R. Fonseca, Juan C. Reyes, «*Comportamiento Sísmico Y Alternativas De Rehabilitación De Edificaciones En Adobe Y Tapia Pisada Con Base En Modelos A Escala Reducida Ensayados En Mesa Vibratoria*», Researgate, june 2005.
- [19] Julian Carrillo, Nestor Bernal, «*Evaluación Del Diseño De Una Pequeña Mesa Vibratoria Para Ensayos En Ingeniería Sismo-Resistente*», Bogota 2013.
- [20] Ing. Luis Antonio Bautista Hernández*, Ph.D. Ricardo Cruz Hernández*, Msc. Edgar Barrios Uruña** «*Mesa Vibratoria Para La Simulación De Movimientos Sísmicos En Una Dirección*». ISSN: 1692-7257 - Volumen 1 - Número 11 - Enero 2008
- [21] «*Automation of a uniaxial simulator for experimental studies on earthquake-resistant engineering. First International Conference on Advanced Mechatronics*», Design, and Manufacturing Technology - AMDM 2012
- [22] ARTÍCULO DE REVISIÓN / REViEW ARTICLE <http://dx.doi.org/10.14482/inde.33.2.5865>. «*Sistemas de control para mesas vibratorias: una revisión crítica.Universidad Militar Nueva Granada (Colombia)*». Julio-diciembre, 2015.
- [23] Catalina Ochoa Cardona José Ignacio Uribe Dorado Juan David Londoño Vargas Sebastián Peláez Castaño. // «*Diseño Y Desarrollo De Una Experiencia Interactiva Que Trata El Tema Del Comportamiento De Edificaciones Frente A Sismos, Para La Sala Colombia Geodiversa Del Parque Explora*». MEDELLÍN 2006
- [24] Osvaldo Albarracín – Mary Saldivar–Lucas Garino Libardi. //«*Alternativas Tecnológicas Para La Mitigación De La Vulnerabilidad Sísmica De Las Construcciones De Adobe*». Universidad Nacional de San Juan, Argentina. November 2016.
- [25] Lucy Laura Lázaro Luna. «*Ensayo A Escala De Edificio De Dos Alturas Sometido A Desplazamientos Horizontales*». UPC Barcelona, Octubre De 2015
- [26] Horacio A. Coral, José M. Ramírez, Esteban E. Rosero, Peter Thomson, Daniel Gómez**, Johannie Marulanda. //«*Diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele-operable para modelos estructurales a pequeña escala*». Ingeniería y Competitividad, Volumen 12, No. 2, p. 95 - 115 (2010)
- [27] Tesis: «*Diseño Y Fabricación De Mesa Vibratoria Para Análisis De Sismos Con Fines Académicos*». VILLAVICENCIO 2018.
- [28] Olmer. García Bedoya, Mauricio Duque Escobar, Bernardo Caicedo Hormaza. //«*Diseño e implementación de un sistema de control de movimiento con actuador hidráulico para simulador de terremotos a escala sobre una máquina centrífuga*». Tesis Universidad de los Andes: 2010.
- [29] Ing. Alejandro Lehmann, Ing. Alejandro Verri, Agustín Bertero, Ing. Sergio Muñoz Laboratorio de Dinámica de Estructuras - Facultad de Ingeniería – UBA. // «*Consideraciones De Diseño Y Construcción De Una Mesa Vibradora Para Ejecución De Ensayos Dinámicos*». Septiembre 2012.

- [30] Garcia, O. Duque, M. Caicedo, B.EEE-90837170 «*Control System for 1DOF Vibrating Machine for soil scale model by centrifugal forces*». 2010.