



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE

Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

LM-PI-UP-04-2013

Adquisición de mesas vibratorias para la docencia e investigación sobre el comportamiento dinámico de estructuras de puentes

Preparado por:

Unidad de Puentes



San José, Costa Rica

18 febrero 2013





1. Informe: LM-PI-UP-04-2013		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Adquisición de mesas vibratorias para la docencia e investigación sobre el comportamiento dinámico de estructuras de puentes		4. Fecha del informe 18 febrero 2013
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. Notas complementarias Ninguna.		
7. Resumen Este informe presenta información relevante para justificar la compra de dos mesas vibratorias para la docencia e investigación sobre el comportamiento dinámico de estructuras de puentes. Este equipo permitiría implementar un programa de investigación de estructuras de puentes para cumplir con las responsabilidades establecidas en la Ley 8114. Además, los conocimientos adquiridos por medio de las diferentes etapas del proyecto permitirán brindar capacitación y transferencia de conocimientos y tecnología.		
8. Palabras clave Puentes, mesa vibratoria, instrumentación, dinámica	9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas 40
11. Informe por: Patricia Peralta Abadía Asistente de ingeniería Candidata a Lleda. en Ingeniería Civil  Fecha: 18 / 01 / 2013		
12. Revisado por: Lic. Miguel Chacón Alvarado Asesor Legal LanammeUCR  Fecha: 18 / 01 / 2013	13. Revisado por: Ing. Rolando Castillo Barahona, PhD Coordinador Unidad de Puentes  Fecha: 18 / 01 / 2013	14. Aprobado por: Ing. Guillermo Loria Salazar, PhD. Coordinador General PITRA  Fecha: 18 / 01 / 2013





TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVOS.....	7
3. QUÉ ES Y PARA QUÉ SIRVE UNA MESA VIBRATORIA	7
4. EJEMPLOS DE ENSAYOS DE MODELOS DE PUENTES UTILIZANDO MESAS VIBRATORIAS.....	9
5. PROPUESTA	13
6. DESCRIPCIÓN DE LA MESA VIBRATORIA SHAKE TABLE II	13
6.1 MESA VIBRATORIA SHAKE TABLE II	13
6.2 OPERACIÓN DE LA MESA VIBRATORIA	14
6.3 AMORTIGUADOR DE MASA ACTIVO AMD	16
7. EMPRESA QUANSER – FABRICANTE DEL EQUIPO	18
8. CONSORCIO DE UNIVERSIDADES UCIST.....	19
9. JUSTIFICACION PARA LA COMPRA DE LA MESA VIBRATORIA.....	22
10. MODELOS ESTRUCTURALES POR DESARROLLAR	24
10.1 ENSAYOS DINÁMICOS DE MODELOS ESTRUCTURALES EN GENERAL	24
10.2 ENSAYOS DINÁMICOS DE MODELOS ESPECIFICOS DE PUENTES	26
11. COSTO DEL EQUIPO.....	29
12. CONSIDERACIONES FINALES	30
13. REFERENCIAS.....	31



1. INTRODUCCIÓN

El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica LanammeUCR por medio de su Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) realiza labores de fiscalización del sector vial nacional, dicha labor se realiza de conformidad con la disposición del artículo 6 de la Ley No. 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributaria y su reforma mediante la Ley N° 8603.

En el caso de puentes, el Lanamme cuenta con una Unidad de Puentes la cual se encarga de cumplir con los trabajos de fiscalización de estructuras de puentes mediante actividades de inspección y evaluación. Adicionalmente, la unidad es responsable de contribuir con la investigación y la transferencia de tecnología mediante la docencia y capacitación de profesionales en temas de puentes.

Este informe presenta información acerca de los aspectos relevante para justificar la compra de dos mesas vibratorias que permitan realizar docencia, investigación y transferencia de tecnología sobre el comportamiento y la respuesta dinámica de estructuras de puentes para efectos de mejorar el conocimiento y diseminarlo mediante investigación, cursos de docencia a nivel de pregrado y posgrado y cursos de capacitación profesional.



2. OBJETIVOS

El objetivo general de este informe es brindar información relevante que justifique la adquisición de dos mesas vibratorias para la docencia e investigación sobre el comportamiento de estructuras de puentes. Los objetivos específicos de este proyecto son:

1. Brindar razones que justifiquen la adquisición de una mesa vibratoria.
2. Brindar información de la mesa vibratoria y el equipo complementario.
3. Proveer información de la empresa fabricante del equipo.
4. Describir de manera general el programa de trabajo de docencia e investigativo que pretende realizar la unidad de puentes con este equipo.

3. QUÉ ES Y PARA QUÉ SIRVE UNA MESA VIBRATORIA

La simulación sísmica, física y virtual, generalmente se realiza para estudiar los efectos de los sismos sobre estructuras hechas por el hombre, o en elementos naturales que puedan presentar una amenaza durante un sismo. La mesa vibratoria es un simulador sísmico físico que permite reproducir condiciones representativas del movimiento del suelo a causa de un sismo, obteniendo la respuesta sísmica de una estructura fijada a ella de manera precisa.

La necesidad de conocer el comportamiento dinámico de estructuras de puentes es imprescindible para el diseño de las mismas, para que estas tengan un desempeño adecuado durante un sismo con el fin de reducir el efecto negativo de estos eventos extremos. De esta manera, se podrá asegurar que los puentes se mantengan en funcionamiento para facilitar el transporte de personas, equipos y vehículos a las zonas afectadas.

Las estructuras de puentes permiten la interconexión de los diferentes tramos de carreteras. Estas estructuras son un elemento fundamental de la red vial nacional, las cuales en muchos casos son decisivas en cuanto a capacidad funcional de la vía, así como en la seguridad de los usuarios. Un eventual colapso o falla en estas estructuras representaría



pérdidas económicas por la interrupción del tránsito, y posiblemente pérdidas de vidas humanas debido a su nivel de importancia y de uso.

Ampliar el conocimiento particular de los elementos que componen los puentes y la forma en que estos se deterioran ante cargas dinámicas resulta clave en el desarrollo de conocimiento orientado a la evaluación, diseño y construcción de estas estructuras. Los ensayos de modelos de puentes utilizando una mesa vibratoria permitirían determinar la respuesta dinámica esperada de estos elementos ante eventos sísmicos de varias intensidades y períodos. De esta forma, se podrá predecir el comportamiento sísmico de las estructuras, aspecto imprescindible para su diseño y evaluación, para reducir los efectos negativos que la estructura pueda sufrir, para así evitar su falla, producto de la acción de cargas dinámicas.

Esta costumbre se ha ido desarrollando en distintas universidades y centros de investigación alrededor del mundo, aplicado principalmente a elementos y estructuras de edificios y puentes. Su finalidad es profundizar de manera práctica en los temas de ingeniería sísmica, primordialmente en el proceso de comprensión del comportamiento sísmico de estructuras, validación de modelos y verificación de métodos de análisis. Estos estudios han permitido desarrollar nuevas técnicas de construcción, mejorar las normativas de diseño, así como determinar el comportamiento sísmico de distintos tipos de puentes con elementos y características innovadoras.

Por lo tanto, con el fin de fortalecer los esfuerzos que se realizan para la fiscalización de la red vial nacional, el contar con información de laboratorio a partir de ensayos con mesas vibratorias, con resultados representativos, permitirá maximizar el rendimiento de las inversiones que el país debe realizar en el área de diseño y construcción de puentes; siempre manteniendo un alto estándar en la protección de las vidas humanas y los patrimonios viales.

4. EJEMPLOS DE ENSAYOS DE MODELOS DE PUENTES UTILIZANDO MESAS VIBRATORIAS

Como parte del desarrollo de la ingeniería sísmica a nivel mundial, el uso de mesas vibratorias en países desarrollados se ha vuelto una práctica común en el proceso de comprensión del comportamiento sísmico de estructuras, validación de modelos y verificación de métodos de análisis. Este equipo permite simular el efecto del movimiento de terreno durante un sismo sobre modelos estructurales representativos de puentes o edificaciones.

Esta práctica se ha ido implementando en el área de puentes en los últimos años en la investigación del comportamiento de distintos tipos de puentes, elementos estructurales y materiales y diseños innovadores. Ejemplos de algunos estudios se puede observar en el Cuadro 1 y en las Figuras 2-4.

Estos ensayos demuestran el beneficio de la utilización de las mesas vibratorias en la investigación y estudio de los puentes. Igualmente permiten tomar como referencia sus experiencias para determinar el proceso de desarrollo e investigación a seguir para la generación de datos y estadísticas que reflejen la cultura constructiva y de diseño nacional.

Cuadro 1. Estudios en ingeniería sísmica de puentes utilizando mesas vibratorias

	Estudio	Autores	Descripción
1	Ensayo en mesa vibratoria de un modelo de un puente a escala con apoyos tipo rodillo sismo-aislantes	<ul style="list-style-type: none"> • Meng-Hao Tsai (Universidad Nacional de Pingtung de Ciencia y Tecnología, Taiwán) • Si-Yi Wu (Federal Engineering Consultants Ltd., Taiwán) • Kuo-Chun Chang (Universidad Nacional de Taiwán, Taiwán) • George C. Lee (Universidad de Buffalo, E.E.U.U.) 	Este estudio investiga el comportamiento sísmico de un modelo a escala de un puente aislado con apoyos tipo rodillo. Se deriva una expresión aproximada para predecir la respuesta de aceleración pico de una estructura aislada con este tipo de apoyos.

	Estudio	Autores	Descripción
2	Estudios en mesas vibratorias de una pila de concreto de puente utilizando bisagras en dos direcciones Pipe-pin	<ul style="list-style-type: none"> Arash E. Zaghi (Universidad de Connecticut, E.E.U.U.) Saiidi M. Saiid (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) Saad El-Azazy (California Dept. of Transportation, E.E.U.U.) 	Este estudio propone un método racional, basado en los estados límites, para obtener la capacidad lateral de las bisagras en dos direcciones.
3	Ensayo en mesa vibratoria de un modelo de puente escalonado	<ul style="list-style-type: none"> Q.T. Ma (Universidad de Auckland, Nueva Zelanda) M.H. Khan (Universidad de Auckland, Nueva Zelanda) 	Este estudio se basa en el diseño y construcción de un modelo a escala del South Rangitikei Railway Bridge (SRRB) para investigar el comportamiento dinámico general de estructuras en balanceo por medio de excitaciones armónicas.
4	Ensayos en mesa vibratoria para un modelo de un puente con sistema aislado usando dispositivos de control estructural	<ul style="list-style-type: none"> Takao Okada (Public Works Research Institute, Japón) Shigeki Unjoh (Public Works Research Institute, Japón) 	Este estudio evalúa la respuesta sísmica de un modelo de un puente con sistema aislado usando apoyos deslizantes y amortiguadores.
5	Comportamiento sísmico de un sistema de pilas tipo marco de FRP-concreto	<ul style="list-style-type: none"> Bin Li (Universidad Internacional de Florida, E.E.U.U.) Yilei Shi (Universidad Internacional de Florida, E.E.U.U.) Amir Mirmiran (Universidad Internacional de Florida, E.E.U.U.) 	Este estudio se investiga el comportamiento sísmico de tubos de FRP rellenos con concreto como alternativa constructiva de puentes. Se analizan cuatro especímenes, uno de control de concreto reforzado y tres híbridos, bajo la acción constante de carga axial y cargas cíclicas laterales invertidas.
6	Estudio sísmico analítico y experimental a gran escala de un sistema de puente de dos tramos de concreto reforzado	<ul style="list-style-type: none"> Nathan S. Johnson (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) Saiidi M. Saiid (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) David H. Sanders (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) 	Este estudio investiga la respuesta de un modelo de puente de concreto reforzado sujeto principalmente a excitaciones sísmicas transversales. Incluye los efectos de rotaciones irregulares en planta con respecto a la distribución de fuerzas entre las distintas pilas y la interacción de los diferentes componentes del puente
7	Comportamiento sísmico de sistemas de puentes con diseño convencional y diseño innovador (Puente de cuatro tramos)	<ul style="list-style-type: none"> Saiidi M. Saiid (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) Robert Nelson (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) Carlos A. Cruz Noguez (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) Fatemeh Kaviani-pour (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) 	Este estudio investiga y compara el comportamiento de tres distintos modelos de un mismo puente, variando sus materiales, bajo la acción de una serie de excitaciones sísmicas biaxiales con amplitudes crecientes. El primer modelo era un puente asimétrico de concreto reforzado convencional. El segundo modelo utilizó materiales y detalles innovadores en las zonas críticas. El tercer modelo incorporó tubos y textiles de polímero reforzados con fibras (FRP), construcción segmentada y columnas prefabricadas, conexiones <i>pipe pin</i> y
Propuesta LM-PI-UP-04-2013		Fecha de emisión: 18 de febrero de 2013	Página 10 de 40

	Estudio	Autores	Descripción
		<ul style="list-style-type: none"> Misha Raffiee (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) 	técnicas aceleradas de construcción para puentes.
8	Efectos sísmicos en un puente de múltiples tramos con alto grado de curvatura horizontal	<ul style="list-style-type: none"> Ian Buckle (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) Ahmad Itani (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) David Sanders (Universidad de Nevada, E.E.U.U.) 	Este estudio investiga los efectos sísmicos de un puente curvo con múltiples tramos. Se examinan los diferentes componentes del puente como el diseño de las columnas, bastiones y aislación sísmica; así como el efecto de la carga viva.

Nota: Información recopilada de las referencias [1], [5], [6], [7], [8], [13], [15], [20]



Figura 1. Modelo de puente de múltiples tramos con alto grado de curvatura horizontal
Fuente. Buckle, Itani, & Sanders, 2011



Figura 2. Modelo de sistema de puente de cuatro tramos con diseño innovador
Fuente. Saiidi, Nelson, Cruz, Kavianipour, & Raffiee, 2011

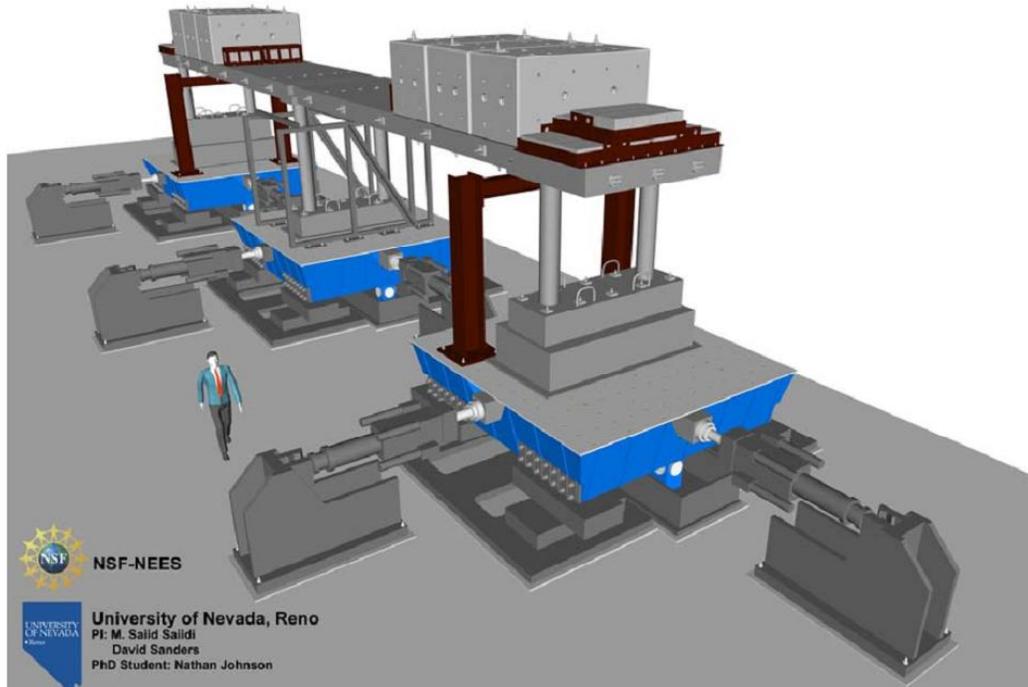


Figura 3. Modelo del sistema de puente de dos tramos de concreto reforzado
Fuente. Johnson, Saiidi, & Sanders, 2006



5. PROPUESTA

Considerando el panorama antes descrito, se propone la compra de dos mesas instructivas bidireccionales fabricadas por la empresa *Quanser*, específicamente el modelo *Shake Table II* (Ver Figura 4) recomendado por el *University Consortium on Instructional Shake Tables* (UCIST).

A través de modelos estructurales será posible estudiar y entender el comportamiento dinámico de distintas estructuras, principalmente puentes. De igual manera, permitirán una comprensión íntegra del funcionamiento del equipo para luego ser aplicado a mesas vibratorias de mayor capacidad para realizar ensayos a escala reducida.

6. DESCRIPCIÓN DE LA MESA VIBRATORIA SHAKE TABLE II

El equipo provisto por *Quanser* consiste de una mesa vibratoria con su respectivo acelerómetro y fuente de poder, un panel de adquisición de datos y una computadora con el software demostrativo para registrar y procesar los datos, así como para controlar la mesa. Además incluye estructuras de prueba opcionales conocidas como AMD que permiten modelar estructura de uno o varios grados de libertad como puentes y edificaciones. El equipo se explica a continuación:

6.1 Mesa vibratoria Shake Table II

La mesa *Shake Table II* es un equipo unidireccional, está controlada por computadora por medio de una interfaz sencilla, es portable, de bajo mantenimiento, y de una fácil manipulación para prevenir accidentes o daños. Además es de un ensamblaje sencillo y requiere de un tiempo mínimo para iniciarse antes de comenzar un experimento. Adicionalmente puede acoplarse a una segunda mesa para un movimiento bidireccional (XY). Contando con dos mesas bidireccionales, se puede trabajar utilizándolas de manera independiente o se pueden hacer funcionar en paralelo, permitiendo ensayar modelos más elaborados.



Figura 4. Mesa vibratoria Shake Table II de Quanser
Fuente. Quanser Inc, 2012

6.2 Operación de la mesa vibratoria

Los principales dispositivos usados para la operación de la mesa vibratoria se describen en la Figura 5. El sistema está compuesto por una fuente de poder (UPM), una tarjeta de adquisición de datos (DAC), una computadora ejecutando el software de control WinCon, con soporte para Matlab/Simulink, y la mesa en sí.

Usando el WinCon en la computadora, el usuario especifica la amplitud y frecuencia de las ondas a reproducir. La necesidad de mover la plataforma de la mesa a la posición deseada, para la onda establecida, es calculada en 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. La mesa se mueve hacia adelante y hacia atrás a la posición y frecuencia de la onda comandada. El desplazamiento y aceleración resultantes de la plataforma son medidos por el sensor de desplazamiento (encoder) y el acelerómetro. El encoder y el acelerómetro están conectados al panel DAC y sus señales pueden ser visualizadas y procesadas adicionalmente en el WinCon.

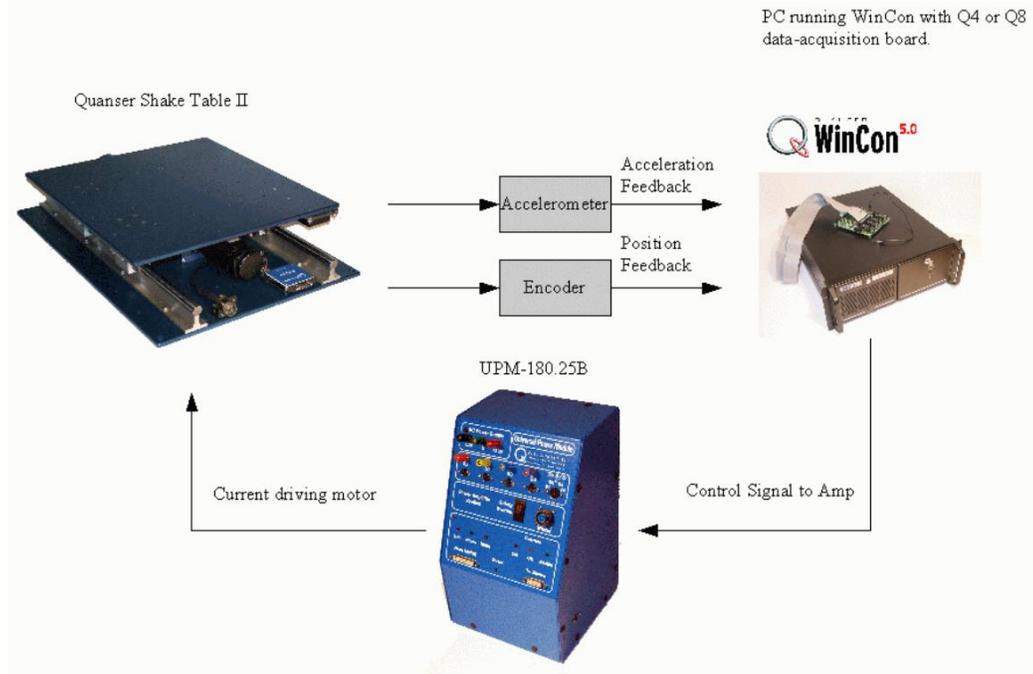


Figura 5. Componentes principales del sistema
Fuente. Quanser Inc, 2012

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.

En el Cuadro 2 se muestran las especificaciones generales para la mesa vibratoria *Shake Table II*.

Cuadro 2. Especificaciones de la mesa vibratoria Shake Table II

Especificación	Valor
Sobrecarga de diseño a 2,5 g	7,5 kg (25 lb)
Aceleración pico	2,5 g
Rango de frecuencia	0 – 20 Hz
Velocidad pico	665 mm/s (20 in/s)
Dimensiones de la mesa	460 mm x 460 mm (18 in x 18 in)
Desplazamiento	150 mm ± 76 mm (6 in ± 3 in)
Peso de la mesa	27,2 kg (100 lb)
Rango del acelerómetro	±49 m/s ²
Sensibilidad del acelerómetro	1,0 g/V

Fuente. Quanser Inc

6.3 Amortiguador de masa activo AMD

Hay tres tipos de estructuras de prueba conformadas por módulos de amortiguamiento activo o *active mass damper modules* (AMD), instrumentadas con acelerómetros:

- AMD-1
- AMD-2
- 2xAMD-1 (compuesta por dos AMD-1).

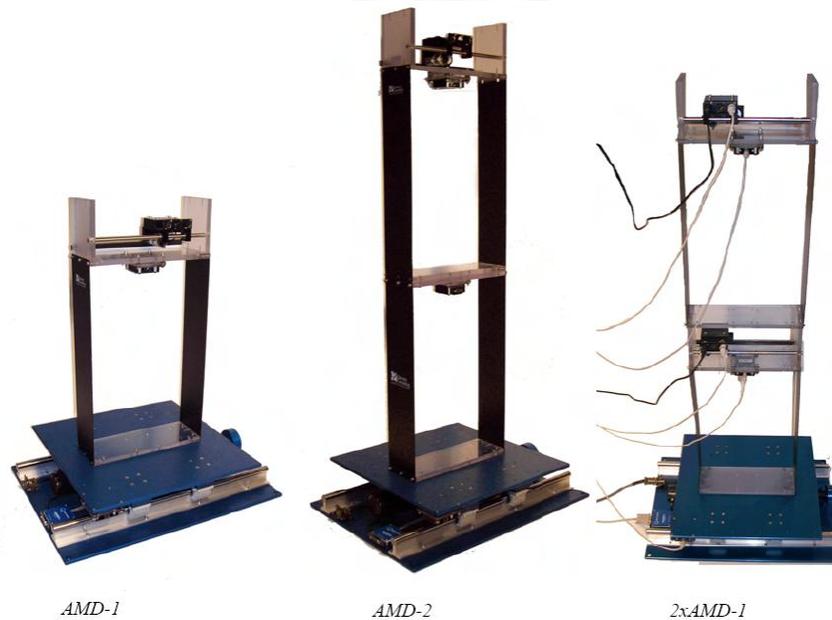


Figura 6. Sistema con las estructuras de prueba opcionales

Fuente. Quanser Inc, 2012

El AMD es una estructura de uno o mas grados de libertad que puede representar el comportamiento de un puente, edificación u otra estructura que está instrumentada con un acelerómetro para medir la aceleración en puntos preseleccionados con relación a la base. La estructura es flexible comprende elementos flexibles que permite deformaciones de fácil percepción. Un carro accionado por un mecanismo de cremallera y piñón (*rack and pinion*) está montado en la parte superior de la estructura y es libre de moverse a lo largo en la misma, se puede mover con la estructura, en dirección contraria o mantener una posición fija.

El AMD básicamente es un controlador de realimentación que mide la posición del carro y la aceleración del "techo" de la estructura para amortiguar eficazmente las vibraciones de la estructura.



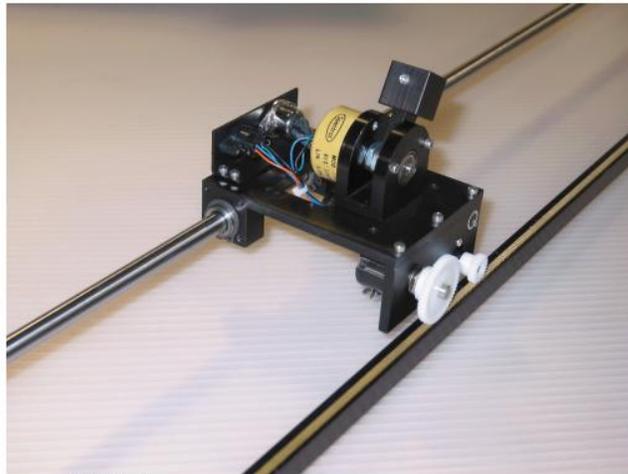
Figura 7. Amortiguador de masa activo o Active Mass Damper
Fuente. Quanser Inc

El carro en la parte superior actúa como un péndulo invertido (IP), está hecho de aluminio sólido y es impulsado por un motor de corriente continua. El carro se desliza a lo largo de un eje de acero inoxidable con apoyos lineales y es accionado a través de un mecanismo de cremallera y piñón; garantizando una tracción constante y continua. Existen dos tipos de carros: IP01 e IP02.

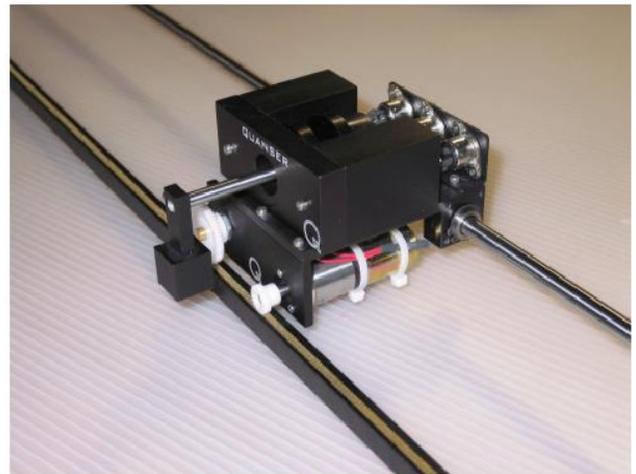
El IP01 detecta su posición a través de un potenciómetro (ten-turn potentiometer). El carro además está equipado con una articulación con apoyos esféricos a la cual una varilla de libre oscilación se puede conectar. Esta varilla funciona como un "péndulo invertido", así como un péndulo regular. El ángulo de la varilla es detectado utilizando un potenciómetro conductivo plástico.

El IP02 detecta su posición a través de un sensor de desplazamiento óptico (quadrature optical encoder) cuyo eje se acopla con la pista a través de un piñón adicional. El carro está equipado con una articulación a la cual una varilla de libre oscilación se puede conectar, quedando suspendida en frente del carro. Esta varilla funciona como un péndulo invertido auto-erigible, así como un péndulo regular. El ángulo de la varilla es detectado utilizando un encoder y es por lo tanto ilimitada en el rango y continua durante todo el círculo.

Propuesta LM-PI-UP-04-2013	Fecha de emisión: 18 de febrero de 2013	Página 17 de 40
----------------------------	---	-----------------



IP01 System



IP02 System

Figura 8. Carros de péndulo invertido
Fuente. Quanser Inc

7. EMPRESA QUANSER – FABRICANTE DEL EQUIPO

Quanser, fundada en 1990 por Dr. Jacob Apkarian, es una empresa líder mundial en el diseño y fabricación de sistemas avanzados para el diseño y aplicación de controles en tiempo real utilizados en la industria, la educación y la investigación. Sus soluciones de control de arquitectura abierta son ideales para la implementación y evaluación de las estrategias de lo más simple a lo extremadamente complejo.

Dentro del área de la ingeniería sísmica, Quanser ofrece soluciones académicas y de investigación que permiten comprender el comportamiento de estructuras sujetas a desplazamientos variables en el tiempo.

Entre los equipos que ha desarrollado Quanser se pueden encontrar una serie de mesas vibratorias portátiles instructivas en las cuales se pueden realizar experimentos prácticos, ayudando a desarrollar una comprensión de la dinámica estructural y de los principios de control. Estos experimentos permiten ver cómo las estructuras responden a una carga de sismo, ofreciendo capacidades de modificar las características dinámicas de los casos de prueba, seleccionando diferentes sismos, y midiendo y analizando las respuestas estructurales. Las mesas vibratorias portátiles instructivas permiten aplicar con éxito los principios de control estructural e investigar en el campo de la ingeniería sísmica.



Quanser *Shake Tables* se puede utilizar para enseñar o investigar los siguientes temas:

- Respuesta de las estructuras
- Diseño de estructuras y componentes estructurales
- Métodos experimentales y ensayos de estructuras y componentes
- Movimiento del suelo y sismicidad

8. CONSORCIO DE UNIVERSIDADES UCIST

La mesa *Shake Table* II de Quanser forma parte del equipo utilizado por el Consorcio de Universidades de Mesas Vibratorias Instructivas o *University Consortium on Instructional Shake Tables* (UCIST), formado en 1999 por Dr. Shirley Dyke con 23 universidades miembro en Estados Unidos y con la ayuda del *National Science Foundation* (NSF) y el *National Network for Earthquake Engineering Simulation* (NEES). Este tiene como objetivo integrar la ingeniería sísmica y la dinámica de estructuras dentro del curriculum de pregrado en las distintas universidades miembro, por medio del desarrollo de experimentos de modelos de estructuras civiles. El consorcio ahora cuenta con más de 100 universidades miembro alrededor del mundo.

Dado a su trayectoria académica en universidades alrededor del mundo, este modelo de mesa vibratoria fue seleccionado como plataforma inicial para el estudio del comportamiento sísmico de puentes. Igualmente, esta mesa cuenta con documentación de varios experimentos realizados en ella, desarrollados por las universidades miembro del UCIST. Esto provee una amplia gama de ensayos para utilizar como base para las pruebas que se deseen realizar, dentro del rango elástico y no-elástico de los materiales. Estos experimentos permiten determinar el espectro de respuesta, aceleraciones, desplazamientos relativos e interacción suelo-estructura de los modelos utilizados, entre otros aspectos.

Los módulos educativos desarrollados por las universidades miembro del consorcio consisten en documentación didáctica (manuales, fotografías, videos) para reproducir los experimentos elaborados para el UCIST, con el fin de facilitar una mejor comprensión de la ingeniería sísmica. Estos módulos se describen a continuación:

Propuesta LM-PI-UP-04-2013	Fecha de emisión: 18 de febrero de 2013	Página 19 de 40
----------------------------	---	-----------------

Cuadro 3. Módulos educativos de UCIST

Módulo educativo	Autores	Descripción
1. Introducción a la dinámica de estructuras	<ul style="list-style-type: none"> Juan Martin Caicedo Sinique Betancourt Dr. Shirley J. Dyke Washington University in saint Louis	El propósito de este experimento es introducir a los estudiantes a los principios de dinámica de estructuras. Frecuencias naturales, formas, modales y razones de amortiguamiento para una estructura de pequeña escala se obtienen experimentalmente por medio de una serie de ensayos.
2. Algoritmo iterativo de la función de transferencia	<ul style="list-style-type: none"> R. Tyler Ranf Dr. Shirley J. Dyke Washington University in saint Louis	Como la mesa vibratoria es un sistema dinámico, el desplazamiento comandado no puede ser reproducido perfectamente a todas las amplitudes y frecuencias. El algoritmo iterativo de la función de transferencia es utilizado comúnmente para controlar una mesa vibratoria, facilitando la reproducción de registros históricos de sismos. Se pretende implementar el algoritmo a la mesa de UCIST, midiendo la aceleración de la mesa para determinar el comando para la señal apropiada para el panel de datos (Multi-Q)
3. Competencia de puentes sismo-resistentes	<ul style="list-style-type: none"> Kurt McMullin San Jose State University	El principal objetivo es usar conceptos básicos de ingeniería para diseñar y construir un puente q sea capaz de resistir fuerzas inducidas durante 8un sismo. Se pretende diseñar un pequeño puente de cercha de balsa y la competencia está basada en la habilidad de soportar una carga gravitacional establecida mientras está expuesto a un movimiento lateral en dirección transversal.
4. Demostración del acoplamiento lateral-torsional en edificios	<ul style="list-style-type: none"> Carol Choi Jack Rosenfeld Dr. Joel P. Conte University of California, Los Angeles	Este experimento es una demostración del efecto del acoplamiento lateral-torsional en estructuras de edificios debido a excentricidades entre el centro de masa y de rigidez. Además se correlacionara el estudio experimental con los resultados obtenidos de un modelo matemático.
5. Comportamiento dinámico de sistemas simples de estructuras de suelo	<ul style="list-style-type: none"> Stefano Berton Tara C. Hutchinson Dr. John E. Bolander University of California at Davis	Este experimento permite explorar los roles interrelacionadas de la frecuencia impuesta, las propiedades del sitio y el periodo de una estructura. Además se demostrara los efectos no desaseados de la coincidencia de los periodos de la estructura y del sitio.
6. Actividades de divulgación de ingeniería sísmica a nivel de primaria y secundaria	<ul style="list-style-type: none"> Dr. B.F. Spencer, Jr. University of Notre Dame	Para una mejor comprensión de la forma en que las estructuras civiles responden a sismos severos, se investigara el comportamiento sísmico de dos tipos de edificios, de mampostería y de acero. Se diseñara y construirá los modelos de los edificios para ser ensayados en la mesa vibratoria, con materiales como Lego.
7. Demostración de la	<ul style="list-style-type: none"> Stuart Bennion 	El objetivo de este experimento es demostrara la respuesta de

Módulo educativo	Autores	Descripción
respuesta dinámica de un edificio de base aislada	<ul style="list-style-type: none"> • Jason Collins • Nat Wongprasert • Michael D. Symans Washington State University	edificios de base aislada sujetos a cargas dinámicas. Los efectos del aislamiento de la estructura serán explorados por medio de ensayos de vibración libre, de vibración forzada, de carga armónica, y de sismos históricos.
8. Experimentos de pequeña escala y su comparación con predicciones analíticas	<ul style="list-style-type: none"> • Brenda E. Shonkwiler • Thomas H. Miller Oregon State University	Este experimento describe los pasos necesarios para realizar una simulación sísmica por medio de un modelo tridimensional en la mesa vibratoria y con un modelo analítico. Se determinan las propiedades del modelo tridimensional, como la rigidez y el amortiguamiento, la escala del sismo, la aceleración como una función del tiempo para cada piso del modelo y el desplazamiento relativo del piso superior

Nota: Información recopilada de UCIST

Además, por medio de la aplicación de los módulos educativos, se le posibilita a la Universidad de Costa Rica (UCR) pertenecer al UCIST dentro de sus 11 miembros a nivel de América Latina y el Caribe que actualmente cuentan con estas mesas vibratorias (Cuadro 4).

Cuadro 4. Instituciones en Latinoamérica con mesa vibratoria Shake Table II de Quanser

País	Institución
México	Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ)
México	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)
México	Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) ^(*)
Brasil	Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Brasil	Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP)
Guatemala	Universidad Mariano Gálvez de Guatemala (UMG)
Chile	Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC)
Chile	Universidad de Santiago de Chile (USCH)
Perú	Universidad Privada del Norte (UPN) ^(*)
Puerto Rico	Universidad de Puerto Rico (UPR)
Rep. Dominicana	Pontificia Universidad Católica Madre y Maestra (PUCMM)

^(*) En proceso de implementación

Fuente. Fernández, 2012



9. JUSTIFICACION PARA LA COMPRA DE LA MESA VIBRATORIA

Con base en lo anterior se justifica la compra de dos mesas vibratorias *Shake Table II* bidireccionales por las siguientes razones:

1. Permite realizar docencia sobre el comportamiento dinamico de estructuras de una manera practica e interesante.
2. Permite realizar investigación sobre el comportamiento dinamico de las estructuras par mejorar el conociiento sobre el comportamiento sísmico de estructuras, validación de modelos y verificación de métodos de análisis.
3. El contar con información de laboratorio a partir de ensayos con mesas vibratorias, con resultados representativos, permitirá maximizar el rendimiento de las inversiones que el país debe realizar en el área de diseño y construcción de puentes.
4. La utilización de estos equipos ha aumentado en diversos centros de investigacion, principalmente en los paises desarrollados, aplicado principalmente a elementos y estructuras de edificios y puentes. Costa Rica debe alinearse con esta tipo de tecnología.
5. En el caso de puentes, estos estudios han permitido desarrollar nuevas técnicas de construcción, mejorar las normativas de diseño, así como determinar el comportamiento sísmico de distintos tipos de puentes con elementos y características innovadoras.
6. La mesa *Shake Table II* cuenta con respaldo internacional, ya que es el equipo recomendado por el consorcio UCIST; además cuenta con una importante trayectoria a nivel academico al ser utilizada en varios proyectos de investigación en universidades alrededor del mundo.
7. Este equipo se puede utilizar de inmediato ya que incluye acelerometro, fuente de poder, panel de adquisicion de datos y computadora con el software para controlar la mesa y registrar y procesar datos. Además cuenta con estructuras de prueba que permiten modelar edificios.
8. Las mesas vibratorias de Quanser son muy versatiles ya que se pueden utilizar en paralelo, lo que facilita obtener una configuración bidireccional, al acoplar dos mesas perpendicularmente, si así se requiere. Por lo tanto al adquirir dos mesas bidireccionales, en realidad se estarían adquiriendo cuatro mesas unidireccionales, lo que permite realizar gran variedad de ensayos.

Propuesta LM-PI-UP-04-2013	Fecha de emisión: 18 de febrero de 2013	Página 22 de 40
----------------------------	---	-----------------



9. La utilidad del equipo esta documentado en diversas investigaciones, lo que permitiría su reproducción. Estos estudios permiten perfeccionar la manipulación del equipo ya que se pueden comparar los resultados obtenidos.





10. MODELOS ESTRUCTURALES POR DESARROLLAR

Con la adquisición de este equipo, se pretende desarrollar investigación en dos etapas de ensayos:

- a) Ensayos dinámicos de modelos estructurales en general
- b) Ensayos dinámicos de modelos específicos de puentes

10.1 Ensayos dinámicos de modelos estructurales en general

En esta primera etapa tiene como prioridad el desarrollo de destrezas y conocimiento para el desarrollo de ensayos dinámicos con modelos de diversas estructuras, en el rango elástico y no-elástico. De esta forma se desarrollarán los conocimientos técnicos básicos del funcionamiento de las mesas vibratorias así como su interacción con los modelos estructurales.

Inicialmente se realizarán dos ensayos, basados en los experimentos desarrollados por el UCIST, el cual utiliza la misma mesa vibratoria, que permitirán comprender el funcionamiento del equipo, así como la interpretación de los resultados obtenidos:

a. Experimentos a pequeña escala para la mesa vibratoria y su comparación con predicciones analíticas (Módulo educativo No. 8 desarrollado por UCIST):

Se trata de analizar el comportamiento sísmico (desplazamiento máximo relativo y la aceleración de cada piso) de un modelo en tres dimensiones, construido en el laboratorio, de un edificio de tres niveles mediante la simulación de un sismo por medio de la mesa vibratoria. Estos resultados luego se comparan con aquellos obtenidos analíticamente por medio del programa SAP 2000.

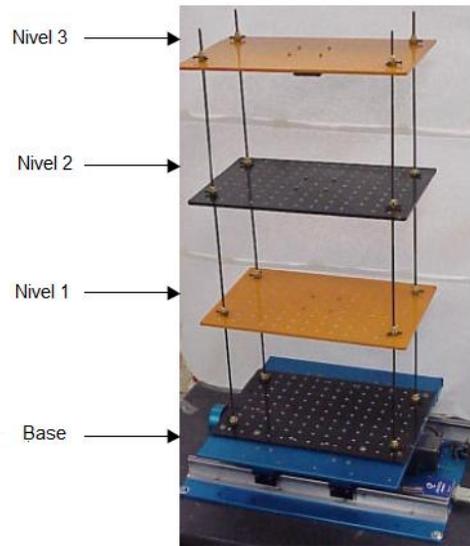


Figura 9. Modelo tridimensional de tres pisos del módulo 8
Fuente. UCIST

b. Modificación del experimento anterior:

Se repetirá el experimento del Módulo educativo No.8 del UCIST pero para tres estructuras tridimensionales con distintas rigideces entre sí, las tres siendo afectadas simultáneamente por el mismo sismo. Se variara el período del sismo para que coincida con el período de vibración de cada una de las estructuras, excitando con cada variación de período una de las tres estructuras. Esto con el fin de estudiar como varía la respuesta sísmica de estructuras con distintas rigideces ante un mismo evento sísmico.

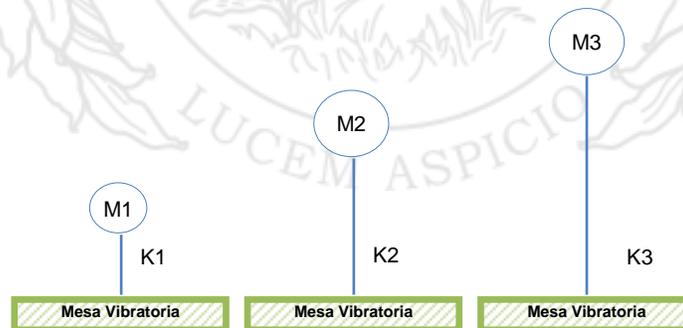


Figura 10. Esquema simplificado del ensamblaje de las tres estructuras tridimensionales

10.2 Ensayos dinámicos de modelos específicos de puentes

La segunda etapa del proyecto se vislumbra como la oportunidad de conocer con gran detalle el comportamiento dinámico de diferentes estructuras de puentes, variando los elementos sismo-resistentes de la estructura.

Partiendo de la experiencia generada del ensayo de modelos de estructuras en general, ahondar en el conocimiento específico de diferentes estructuras de puentes puede brindar un aporte trascendental al estudio sísmico de estas obras.

Para esto se planea desarrollar varios modelos distintos de puentes de uno y varios tramos, donde los elementos sismo-resistentes sean los bastiones y/o las pilas. La variación en los elementos sismo-resistentes se logrará variando los tipos de apoyos que se modelaran, ya sean fijos o expansivos.

a. Ambos bastiones forman parte del sistema sismo-resistente

Se modelara un puente de un solo tramo con apoyos fijos en ambos bastiones, en donde los dos elementos sean capaces de absorber las fuerzas y desplazamientos causados por un evento sísmico.



Figura 11. Esquema de un puente con ambos bastiones formando parte del sistema sismo-resistentes

b. Un bastión forma parte del sistema sismo-resistente

Se modelara un puente de un solo tramo con apoyos fijos y expansivos en los bastiones, en donde el bastión con el apoyo fijo sea el único elemento capaz de absorber las fuerzas y desplazamientos causados por un evento sísmico.



Figura 12. Esquema de un puente con un único bastión formando parte del sistema sismo-resistentes

c. *Pilas o bastiones formando parte del sistema sismo-resistente*

Se modelara puentes de tres a cinco tramos con apoyos fijos y expansivos en los bastiones y pilas. Para este modelo las pilas y bastiones con apoyos fijos son los elementos capaces de absorber las fuerzas y desplazamientos causados por un evento sísmico.



Figura 13. Esquema de un puente de tres tramos con una única pila formando parte del sistema sismo-resistentes



Figura 14. Esquema de un puente de cuatro tramos con una única pila formando parte del sistema sismo-resistentes

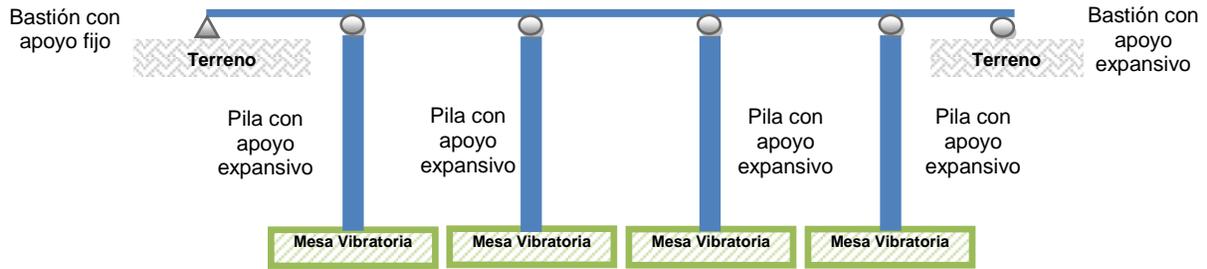


Figura 15. Esquema de un puente de cinco tramos con un único bastión formando parte del sistema sismo-resistentes



11. COSTO DEL EQUIPO

Dentro de la gama de opciones de mesas vibratorias que presenta la empresa Quanser (ver Figura 16 en el Anexo), se opto por la mesa Shake Table II en una configuración biaxial. Esta opción consiste en dos mesas colocadas ortogonalmente una sobre la otra, actuando simultáneamente, para crear el efecto de un movimiento sísmico biaxial.

Cuadro 5. Costo general del equipo

Descripción		Costo
Equipo	2 Shake Table II XY Dual Parallel Workstation (se convierten en 4 mesas vibratorias unidireccionales)	\$ 103.892,50
	Envío y seguro	\$ 5.190,00
	Descuento	\$ 17.583,88
	Total	\$ 91.498,62



12. CONSIDERACIONES FINALES

Se plantea la compra de dos mesas vibratorias portátiles biaxiales en el corto plazo con capacidad para trabajar en paralelo o independientemente, específicamente el modelo *Shake Table II* de *Quanser*, las cuales permitirán hacer ensayos uniaxiales y biaxiales a estructuras de uno y varios grados de libertad para estudiar su comportamiento dinámico.

Con la adquisición de estas mesas se pretende realizar docencia e investigación sobre el comportamiento dinámico de estructuras de puentes y edificaciones. Estas investigaciones se realizarían en dos etapas: (1) Ensayos dinámicos de modelos de estructuras de uno y varios grados con el fin de familiarizarse con el equipo, su funcionamiento y los resultados que se obtienen y (2) Ensayos dinámicos de modelos específicos de puentes donde se aplican los conocimientos adquiridos en distintas estructuras de puentes para estudiar su comportamiento sísmico según sean los elementos sismo-resistentes de la estructura.

13. REFERENCIAS

Buckle, I., Itani, A., & Sanders, D. (2011). *Seismic effects on multi-span bridges with high degrees of horizontal curvature*. Recuperado el 14 de enero de 2013, de NEES: University of Nevada: http://nees.unr.edu/projects/curved_bridge.html

Dyke, S., Truman, K., & Gougl, P. (2000). Current directions in earthquake engineering education: The University Consortium on Instructional Shake Tables. *Reunión Anual ASEE*. St. Louis, Estados Unidos.

Fernández, H. (5 de diciembre de 2012). *Comentario de la respuesta a Cotización Shake Table II [Mens 18]*. Mensaje enviado a: rolando.castillo@ucr.ac.cr.

Johnson, N., Saiidi, S. M., & Sanders, D. (2006). *Large scale experimental and analytical seismic studies of a two span reinforced concrete bridge system*. Reno: University of Nevada.

Li, B., Shi, Y., & Mirmiran, A. (2008). *Seismic performance of hybrid FRP-Concrete pier frame system*. Florida: Florida International University.

Ma, Q., & Khan, M. (2008). Shake table tests of a stepping bridge model. *14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.

Okada, T., & Unjoh, S. *Shake table tests for isolated bridge model using structural control devices*. Japón: Public Works Research Institute.

Quanser Inc. (2012). *Bench-Scale Shake Tables*. Recuperado el 10 de enero de 2013, de Quanser: <http://www.quanser.com/flippers/Earthquake-Engineering/2012/>

Quanser Inc. (2012). *Earthquake Engineering*. Recuperado el 10 de diciembre de 2012, de Quanser: http://www.quanser.com/english/html/home/fs_homepage.html

Quanser Inc. (s.f.). *IP01 and IP02 User Manual*. Recuperado el 16 de enero de 2013, de Istanbul Teknik Üniversitesi: http://web.itu.edu.tr/~mutlui/IP01_2%20User%20Manual.pdf

Quanser Inc. (2007). *Shake Table II User Manual*. Recuperado el 14 de enero de 2013, de Quanser: http://quanser.com/english/downloads/products/Shake_Table_II_manual.PDF



Saiidi, S. M., Nelson, R., Cruz, C., Kavianipour, F., & Raffiee, M. (2011). *Seismic Performance of Bridge Systems with Conventional and Innovative Design*. Reno: University of Nevada.

Shonkwiler, B., & Miller, T. (s.f.). *Module 8: Small scale shake table experiments and comparison to analytical predictions*. Recuperado el 10 de enero de 2013, de UCIST: Teaching Modules: <https://engineering.purdue.edu/UCIST/TeachingModules/teaching%20modules%202.htm>

Tsai, M.-H., Wu, S.-Y., Chang, K.-C., & Lee, G. (2006). *Shaking table test of a scaled bridge model with rolling-type seismic isolation bearings*. Elsevier Ltd.

University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST). (2011). *Instructional Shake Tables*. Recuperado el 10 de diciembre de 2012, de NEEShub: <https://nees.org/groups/benchshaketables/wiki/MainPage>

University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST). (s.f.). *University Consortium on Instructional Shake Tables*. Recuperado el 10 de diciembre de 2012, de Purdue University: <https://engineering.purdue.edu/UCIST/default.html>

Wikipedia. (14 de enero de 2013). *Earthquake engineering*. Recuperado el 14 de enero de 2013, de Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_engineering

Wikipedia. (16 de diciembre de 2012). *Earthquake shaking table*. Recuperado el 14 de enero de 2013, de Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_shaking_table

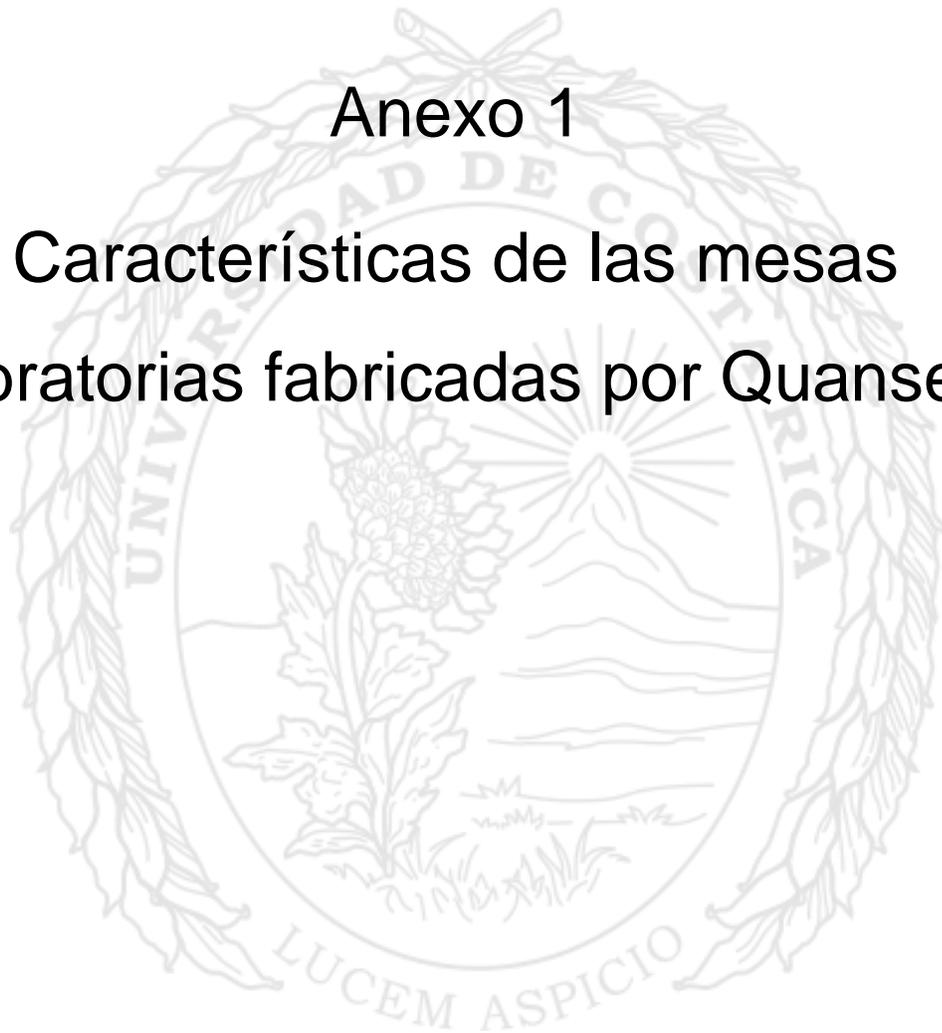
Zaghi, A., Saiidi, S. M., & El-Azazy, S. (2011). *Shake table studies of concrete bridge pier utilizing pipe-pin two-way hinges*. American Society of Civil Engineers.

http://www.meqtronics.com/public/requests/QCI_PERM/Shake_Table_II_User_Manual/Shake%20Table%20II%20User%20Manual%20-%20QUARC.pdf



Anexo 1

Características de las mesas vibratorias fabricadas por Quanser





SHAKE TABLES AND SMART STRUCTURE FOR TEACHING AND RESEARCH																																		
This section provides a detailed overview of the cutting-edge laboratory systems available for teaching or research. There are seven turn-key earthquake engineering experiments. Their key attributes and technical specifications are presented here.																																		
To request a demonstration or quotation, please visit www.quanser.com/earthquake																																		
PRODUCTS	DESCRIPTION	KEY FEATURES	WORKSTATION COMPONENTS	TECHNICAL SPECIFICATIONS																														
SHAKE TABLES	SHAKE TABLE I-40 Linear shaker	The Shake Table I-40 system is a single-axis seismic device that can be used to teach structural dynamics and control, earthquake engineering and other topics related to Civil Engineering. Shake Table I-40 is a portable yet powerful shake table which can be easily programmed through a Desktop User Interface environment. The provided software allows easy need for hard coding while it enables you to monitor and analyze the response. This inexpensive platform facilitates an easy-to-connect setup for a quick and effortless interface with computer.	<ul style="list-style-type: none"> Compact, portable, clean and low maintenance Precise and accurate positioning, high-resolution encoder and low-backlash guide Ball-bearing mechanism for robust actuation Can be run with simple standalone software operation using Shake Table I-40 Software or highly flexible operation and control design using MATLAB/Simulink® via QUARC® Can connect to Quanser WVECS system for wireless remote operation Complete, cost-effective turnkey system Integrated safety features and limits Fully documented system models and parameters 	<ul style="list-style-type: none"> Shake Table I-40 VOIRAQ-2 QU-SS Optional Active Mass Damper One Floor or Two Floor (AMD O1 or AMD O2) QUARC® 	Shake Table System Overall Dimensions (L x W x H) 57.5 x 12.7 x 7.62 cm Shake Table System Mass 5.88 kg Table Dimensions, a.k.a. Payload Area (L x W) 43.2 x 10.2 cm Maximum Payload at 1.0 g 1.4 kg Travel 4.8 cm Operational Bandwidth 30 Hz Peak Velocity 48.0 cm/s Peak Acceleration 1.32 g	Lead Screw Pitch 1 cm/rev Brushless Servo Motor Power 70 W 3 A Maximum Continuous Current 3.53 A Motor Maximum Torque 8.93 count/rev Encoder Resolution 8192 counts/rev Accelerometer Range ±0.5 g Accelerometer Sensitivity 1.0 V/g																												
	SHAKE TABLE II Heavy-load linear shaker	Developed in cooperation with the University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST) and recommended by the Consortium to more than 100 instructional members, the Shake Table II offers a wide table-top surface which can accommodate several structures to increase the complexity of the experiment. Shake Table II has been used in business programs involving community services as well as K-12 education. This portable, bench-scale table moves along a single axis, however, two tables can be coupled for dual axis, xy operation.	<ul style="list-style-type: none"> Purpose designed and built for the University Consortium on Instructional Shake Tables (UCIST) partnered with National Network for Earthquake Engineering Simulation (NNEES) Easy integration of your structures, sensors and actuators Simple, standalone software operation using Shake Table II Software or highly flexible operation and control design from MATLAB/Simulink® via QUARC® or LabVIEW® Fully documented system models and parameters Shared lab resources contributed by a large community of like-minded users Single (x) or Dual (xy) axis configurations Complete, cost-effective turnkey systems provided Supports scaling and playback of earthquake data Integrated safety features and limits 	<ul style="list-style-type: none"> Shake Table II UMI80-208-PWM Q4 Real-Time Control Board Optional Active Mass Damper One Floor or Two Floor (AMD O1 or AMD O2) VOIRAQ-1 or VOIRAQ-2 QUARC® 	Shake Table System Overall Dimensions (L x W x H) 61 x 46 x 13 cm Shake Table System Mass 27.2 kg Table Dimensions, a.k.a. Payload Area (L x W) 46 x 46 cm Motor Maximum Torque 1.65 N·m Lead Screw Encoder Resolution 8192 counts/rev Accelerometer Range ±48 cm/s² Accelerometer Sensitivity 2.50 V/g	Lead Screw Pitch 1.27 cm/rev Brushless Servo Motor Power 145.7 W 12.5 A Maximum Continuous Current 1.65 N·m Motor Maximum Torque 8192 counts/rev Encoder Resolution ±48 cm/s² Accelerometer Range ±48 cm/s² Accelerometer Sensitivity 2.50 V/g																												
	XY SHAKE TABLE III Heavy-load planar shaker	The xy Shake Table III is a high-power system that can deliver high accelerations and velocities with loads up to 100 kg. It presents more advanced analysis with the introduction of multi-dynamics of particular interest. It is also useful for structural dynamics research relating to earthquake base reduction. It is covered using linear motor technology, eliminating the need for hydraulics. It has three linear motors, two of them operate in parallel to activate the x-axis, while a single motor is used to activate the y-axis.	<ul style="list-style-type: none"> Dual-axis operation Linear motors and robotics with loads up to 100 kg Linear motors for reliable and quiet operation Extensive data acquisition and control capability Easy integration of your structures, sensors and actuators Flexible operation and control design from MATLAB/Simulink® via QUARC® or LabVIEW® Fully documented system models and parameters Supports scaling and playback of earthquake data Synchronous motion profiles with multiple tables and/or other data acquisition systems Integrated safety features and limits 	<ul style="list-style-type: none"> Shake Table III 220 VAC, integrated Power System Real-time PC preconfigured with your choice of software & hardware Q4 Real-Time Control Board Optional Active Mass Damper One Floor or Two Floor (AMD O1 or AMD O2) QUARC® 	Shake Table System Overall Dimensions (L x W x H) 106.7 x 104.7 x 20.3 cm Shake Table System Mass 55.0 kg Table Dimensions, a.k.a. Payload Area (L x W) 71.1 x 71.1 cm Stage Mass 175.5 (x), 95.22 (y) kg Maximum Payload at 1.0 g 100 kg Travel 21.59 (x), 21.59 (y) cm Operational Bandwidth 30 Hz Peak Velocity 164.8 (x), 164.8 (y) cm/s Peak Acceleration 10.98 (x), 11.70 (y) g Real Linear Motor Power 4554 W	Continuous Linear Motor Power 526 W 12 A Maximum Continuous Current 36 A Linear Motor Maximum Continuous Force 860.7 N 1.65 N·m Linear Motor Peak Force 2,642.4 N 120 kg Encoder Resolution 4 cm Accelerometer Range ±48 cm/s² Accelerometer Sensitivity 1.0 V/g																												
SMART STRUCTURES	HEXAPOD Multi-axis shaker	This multi-axis shake table is a parallel robotic device capable of moving heavy loads at high accelerations, within a small footprint. Featuring six Degrees of Freedom (DOF), this industrial grade platform is suitable for research in earthquake simulation, vibration, structural dynamics, rehabilitation and more. Unlike most commercially available Stewart platforms, the Hexapod is driven by superior electrical motors which make this six DOF motion platform precise, responsive and low-maintenance.	<ul style="list-style-type: none"> High precision ball screw mechanism Safety brake logic circuit and built-in mechanical brakes Easy inter face through USB connection Optional six DOF force/torque sensor High performance amplifier (built-in) Easy integration of third party structures, sensors and actuators Bulk software safety watchdog including runaway detection and collision avoidance Flexible operation and control design from MATLAB/Simulink® via QUARC® or LabVIEW® Precise, soft and heavy-duty machined components Fully documented system models and parameters High-resolution optical encoders to measure the joint positions 	<ul style="list-style-type: none"> Hexapod QUARC® Hexapod-ready PC Optional force/torque sensor Optional Active Mass Damper One Floor or Two Floor (AMD O1 or AMD O2) QUARC® 	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>X</th> <th>Y</th> <th>Z</th> <th>Roll</th> <th>Pitch</th> <th>Yaw</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Maximum Force, Torque</td> <td>156.84</td> <td>132.86</td> <td>3707.62</td> <td>548.14</td> <td>632.54</td> <td>500.95 N, N·m</td> </tr> <tr> <td>Workspace</td> <td>0.30</td> <td>0.30</td> <td>0.16</td> <td>36.81</td> <td>36.81</td> <td>50.14 m, deg</td> </tr> <tr> <td>Maximum Speed</td> <td>0.67</td> <td>0.67</td> <td>0.35</td> <td>153.76</td> <td>153.76</td> <td>80.82 m/s, deg/s</td> </tr> </tbody> </table>		X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw	Maximum Force, Torque	156.84	132.86	3707.62	548.14	632.54	500.95 N, N·m	Workspace	0.30	0.30	0.16	36.81	36.81	50.14 m, deg	Maximum Speed	0.67	0.67	0.35	153.76	153.76	80.82 m/s, deg/s	Arm Length 27.5 cm Actuator Maximum Force 234 N a 30.0 cm Encoder Resolution 10000 counts/rev 100 kg Rated Power 1728 W
		X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw																											
	Maximum Force, Torque	156.84	132.86	3707.62	548.14	632.54	500.95 N, N·m																											
Workspace	0.30	0.30	0.16	36.81	36.81	50.14 m, deg																												
Maximum Speed	0.67	0.67	0.35	153.76	153.76	80.82 m/s, deg/s																												
SMART STRUCTURE Flexible beam and pendulum	This standalone structure consists of a flexible beam and a servomotor driving an eccentric load. A large pendulum with an inertial load is used to actively compensate the swaying motion of the structure. This experimental platform teaches undergraduate students how to dampen vibrations of the structure using various control concepts. The Smart Structure can be used as a standalone or as an add-on to any shake table.	<ul style="list-style-type: none"> Inertial load consisting of two rigid beams and a round crossbeam Base plate instrumented with a precise strain gage Flexible operation and control design from MATLAB/Simulink® via QUARC® or LabVIEW® High quality DC servo motor and gearbox High resolution optical encoder Precisely machined solid aluminum parts Fully documented system models and parameters Open architecture design 	<ul style="list-style-type: none"> Smart Structure VOIRAQ-1 QU-SS QUARC® 	Motor Torque Constant 0.0787 Nm/Amp Motor Armature Resistance 2.6 ohm Motor Internal Gear Ratio 14 Motor External Gear Ratio 5 Total Gear Ratio 70 Encoder Resolution 4096 counts/rev Motor Frame Mass 0.8 kg Rigid Beam Length 28.5 cm	Rigid Beam (Mass each) 0.072 kg Rigid Beam Inertia About End (both beams) 0.0396 kg·m² Cross Beam Mass 0.050 kg Flexible Beam Length 44.0 cm Flexible Beam Mass 0.22 kg Strain Gage Sensitivity 0.4 V/cm Strain Gage Gain 2.94 cm/V																													
AMD O1 1 Floor Active Mass Damper	This experiment is similar in nature to active mass dampers used to suppress vibrations in tall structures against earthquakes and strong wind. It is a tall building-like structure, instrumented with an accelerometer to measure the acceleration of the "roof" relative to earth. The structure is flexible along its facade. A cart driven by a rack and pinion mechanism is mounted at the top of the structure and is free to move along in the same direction as the structure. The cart is controlled to minimize the building deflection. The AMD O1 can be used as a standalone or as an add-on to any shake table.	<ul style="list-style-type: none"> Flexible operation and control design from MATLAB/Simulink® via QUARC® or LabVIEW® High quality DC servo motor and gearbox High resolution optical encoders to sense the cart position Precisely machined solid aluminum cart Fully documented system models and parameters Variable cart load mass Open architecture design 	<ul style="list-style-type: none"> AMD O1 VOIRAQ-1 QU-SS QUARC® 	Structure Floor Height 53 cm Flexible Structure Length 32 cm Structure Depth 11 cm Flexible Structure Total Mass 1.63 kg Structure Top Floor Mass 0.68 kg Rack Mass 0.70 kg	Top Floor Natural Frequency 2.5 Hz 500 N/m Cart Mass (with two weights) 0.65 kg Cart Travel 4 x 6.5 cm Cart Planetary Gearbox Efficiency 100 % Floor Accelerometer Sensitivity 1.0 V/g																													
AMD O2 2 Floor Active Mass Damper	This advanced active mass damping experiment is useful to study the benefits of employing AMD on a two floor structure. A tall building-like structure consisting of two floors is instrumented with an accelerometer on each floor to measure their acceleration. The structure is flexible along its facade. A cart driven by a rack and pinion mechanism is mounted at the top of the second floor. The cart is controlled to minimize the building deflection. AMD O2 is particularly valuable for teaching and research in structural dynamics as it includes two dynamic modes.	<ul style="list-style-type: none"> Flexible operation and control design from MATLAB/Simulink® via QUARC® or LabVIEW® High quality DC servo motor and gearbox High resolution optical encoders to sense the cart position Precisely machined solid aluminum cart Fully documented system models and parameters Variable cart load mass Open architecture design 	<ul style="list-style-type: none"> AMD O2 VOIRAQ-1 QU-SS QUARC® 	Second Floor Height 103.5 cm Structure Depth 11 cm Structure Total Mass (with no rack and no cart) 2.2 kg First Floor Mass 1.160 kg Second Floor Mass 1.360 kg Rack Mass 0.70 kg	First and Second Floor Linear Stiffness 500 N/m 0.65 kg 4 x 6.5 cm Cart Planetary Gearbox Efficiency 100 % Floor Accelerometer Sensitivity 1.0 V/g																													

FOR MORE INFO VISIT WWW.QUANSER.COM/EARTHQUAKE

Products and/or services pictured and referred to herein and their accompanying specifications may be subject to change without notice. Products and/or services mentioned herein are trademarks or registered trademarks of Quanser Inc. and/or its affiliates. Other product and company names mentioned herein are trademarks or registered trademarks of their respective holders. ©2010 Quanser Inc. All rights reserved.

Rev. 1.0

*Quanser Shake Tables can be ordered by adding Smart Structures - test building-like bench-scale structures with active mass damper. This means the Shake Table is not applicable for multi-story structures. These structures are used for seismic Shake Table (S-T) and "Rebuild" experiments in the experiment in the source of your test building model. Assuming other the DOF is not at home position.
 ©2010 Quanser Inc. All rights reserved.

Figura 16. Modelos de mesas vibratorias y estructuras para la enseñanza e investigación de la ingeniería sísmica de Quanser

Fuente. www.quanser.com



Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

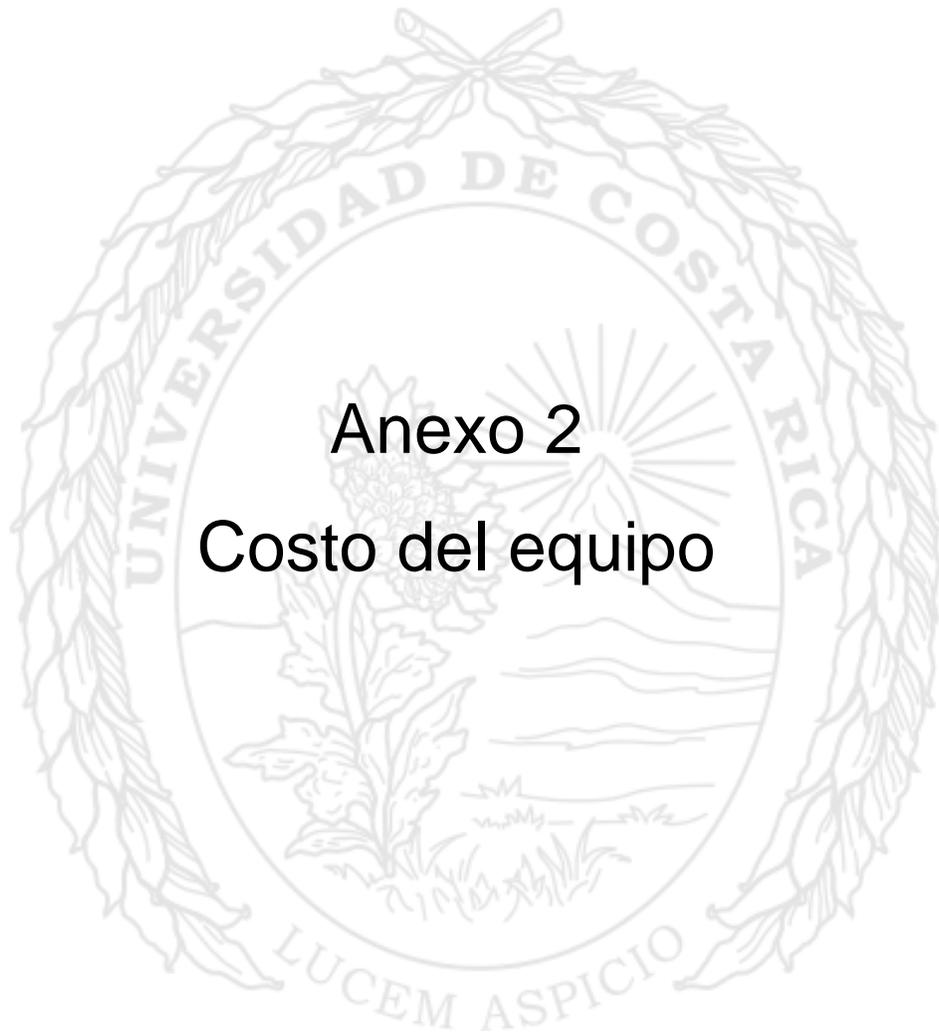


PROGRAMA DE
INFRAESTRUCTURA DEL
TRANSPORTE



Página intencionalmente dejada en blanco

Propuesta LM-PI-UP-04-2013	Fecha de emisión: 18 de febrero de 2013	Página 36 de 40
----------------------------	---	-----------------



Anexo 2

Costo del equipo





COTIZACIÓN:

QUOTATION

Number: 1213-1009D

Date of Issue: January 08, 2013

 QUANSER <small>INNOVATE. EDUCATE.</small>	Quanser Consulting Inc. 119 Spy Court Markham, Ontario, CANADA L3R 5H6 Tel: (905) 940-3575 Fax: (905) 940-3576 E-mail: sales@quanser.com http://www.quanser.com
--	--

ALL PRICES IN CAD UNLESS SPECIFIED OTHERWISE

Prepared for: Mr. Rolando Castillo Civil Engineering University of Costa Rica Casa 6 Res Lantana Sabanilla, San Pedro San Jose, 0001, Costa Rica Tel: (506) 2511-4247 (Work)	E-mail: rolando.castillo@ucr.ac.cr
---	------------------------------------

SALESPERSON	DOCK DATE (From receipt of P.O.)	SHIPPING VIA	SHIPPING TERMS (Exclusive taxes, duties and brokerage)	PAYMENT TERMS
Hans Fernandez	60 days	Freight Forwarder	CPT San Jose airport (SJO)	50% in advance, 50% net 30

QTY	DESCRIPTION	REG. PRICE	EDU. PRICE	TOTAL CAD
2 x Shake Table II XY Workstations				
4	SHAKE TABLE II - Shake Table II	\$18,143.75	\$14,515.00	\$58,060.00
4	UPM180-25-PWM-B - Universal Power Module (180V, 25A) - PWM-B	\$4,557.50	\$3,645.00	\$14,580.00
2	AMD01 - Complete - Building structure for vibration control - w/ Cart, Track and Accelerometer module	\$3,645.00	\$2,916.25	\$5,832.50
1	VoltPAQ-X2 - Real-Time Control Hardware	\$3,125.00	\$2,500.00	\$2,500.00
4	Q8 - Hardware-In-The-Loop Board - 8 Encoder Channels - w/ terminal board and ribbon cable	\$5,600.00	\$4,480.00	\$17,920.00
2	QuaRC for Windows single-user license - Real-Time Control Software - Quanser's new & professional multi-functional rapid controls development and deployment environment for use with MathWork's software. Please see on-line documentation for full feature list and descriptions and QuaRC Compatibility Table for specific hardware and software version requirements. Stand-alone License only - for networked license, please choose the network license option.	\$625.00	\$500.00	\$1,000.00
2	Turn-key Computer - PC pre-installed and configured - keyboard and mouse included. No monitor.	\$2,500.00	\$2,000.00	\$4,000.00
SUB-TOTAL				\$103,892.50
SHIPPING AND INSURANCE				\$5,190.00
SPECIAL WORKSTATION DISCOUNT**				(\$15,583.88)
COMPUTER DISCOUNT**				(\$2,000.00)
TOTAL				\$91,498.62

E.&E.O.

NOTES

- ** Special Consideration discount only valid on the purchase of all items above.
- ** Discount valid for the duration of this quote, i.e. 30 days from date above.

QUOTATION VALID UNTIL 30 DAYS FROM ISSUE DATE (A NEW QUOTE IS REQUIRED ONCE THE VALIDITY HAS EXPIRED)
 HARMONIZED COMMODITY CODE: 1 YEAR FULL REPLACEMENT WARRANTY
 PRICE DOES NOT INCLUDE CUSTOMS DUTIES TAXES OR TARIFFS. THESE ARE THE RESPONSIBILITY OF THE RECIPIENT
 Late Payment Penalty: Payment is due within 30 days of the issue date of the Invoice. A penalty of 2% per month is applied from the 31st day onwards.

Bank Information:
 Canadian Imperial Bank of Commerce (CIBC)
 7125 Woodbine Ave
 Markham, Ontario CANADA L3R 1A3
 For International / Domestic Transfers in CAD, please use: 01002242-7607318

Bank Transit #: 02242
 BANK No: 010
 CAD Account#: 7607318
 Swift Code: CIBCCATT

Page 1 of 2

Propuesta LM-PI-UP-04-2013	Fecha de emisión: 18 de febrero de 2013	Página 39 de 40
----------------------------	---	-----------------



QUOTATION

Number: 1213-1009D

Date of Issue: January 08, 2013

 QUANSER <small>INNOVATE. EDUCATE.</small>	Quanser Consulting Inc. 119 Spy Court Markham, Ontario, CANADA L3R 5H6 Tel: (905) 940-3575 Fax: (905) 940-3576 E-mail: sales@quanser.com http://www.quanser.com
--	--

ALL PRICES IN CAD UNLESS SPECIFIED OTHERWISE

Prepared for: Mr. Rolando Castillo Civil Engineering University of Costa Rica Casa 6 Res Lantana Sabanilla, San Pedro San Jose, 0001, Costa Rica Tel: (506) 2511-4247 (Work)	E-mail: rolando.castillo@ucr.ac.cr
---	------------------------------------

TERMS & CONDITIONS

- 1. Payment:** Payment terms are as described in the quotation under consideration, time to be of the essence.
- 2. Entire Agreement:** It is agreed that should the Purchaser use its own form of purchase order for ordering items from Quanser, all sales to the Purchaser shall be subject to all provisions of this Agreement and to the trade terms of Quanser then in effect. Any provision of such purchase order which is inconsistent with the provisions of this agreement or such trade terms, or which imposes any greater burden upon Quanser than the obligations set forth in this document, or which confers on the Purchaser additional rights shall be of no effect whatever unless expressly accepted by Quanser in writing specifically referring to the inconsistency, added burden or additional rights and specifically stating that such provision will govern.
- 3. Purchaser Stipulations:** Purchaser acknowledges to Quanser that Purchaser has stipulated the specifications for the products supplied by Quanser to the Purchaser and the Purchaser is not relying on Quanser with respect to the fitness or suitability of the product for the Purchaser's intended purposes. Purchaser specifically agrees to indemnify and save harmless Quanser and those for whom Quanser is in law responsible against any claims of any kind or nature against Quanser, including any claims in contract, by tort or under any statutory provisions, by any person claiming under or through the Purchaser, for any cause or matter in any way referable to the products supplied by Quanser to the Purchaser including any claims for damages to persons or property or for consequential or economic losses or damages and whether or not such damages are attributable to negligence or gross negligence by Quanser or those for whom it is in law responsible or for any other reason.
- 4. Purchaser Acceptance:** Purchaser acknowledges and agrees with Quanser that by accepting delivery of the products from Quanser, the Purchaser has inspected the products and has confirmed that the products meet the Purchaser's specifications as to the model or part number(s) and that in all other respects the products appear to have been delivered in good order and condition and in accordance with the purchase order and the invoice.
- 5. Warranty/Liability:** Quanser warrants its products for a period of 1 calendar year from the date of this invoice to be free of defects and Quanser's only liability under this warranty shall be to repair, and if necessary, in Quanser's sole discretion, to replace the defective product. All other warranties, express or implied, or conditions whether statutory or otherwise are expressly excluded. In any event, the Quanser's liability, and the liability of anyone for whom Quanser is legally responsible, for any cause or damage, and regardless of the form of action, whether in contract or in tort including negligence or gross negligence, shall be limited to the LESSER of the Purchaser's direct damages and the amount paid by the Purchaser in respect of the product. This exclusion of liability and limitation of liability shall apply whether such damages may be characterized as arising from a breach of a fundamental term or otherwise. In no event shall Quanser be liable for any consequential damages or damages for loss of profits or other economic losses of any kind or nature whatsoever.
- 6. Delay, etc.:** The failure to take any action with respect to, nor the waiver of, any default by either Quanser or the Purchaser shall not affect such person's rights nor obligations with respect to such default nor any other default. Quanser shall not be liable for delay or failure in performance resulting from acts beyond the control of Quanser, unless by reason of Quanser's own negligence provided that where Quanser claims to be excused by reason of acts beyond Quanser's control Quanser shall, however, use reasonable diligence to put Quanser again in a position to carry out the Quanser's obligations.

QUOTATION VALID UNTIL 30 DAYS FROM ISSUE DATE (A NEW QUOTE IS REQUIRED ONCE THE VALIDITY HAS EXPIRED)
HARMONIZED COMMODITY CODE: 1 YEAR FULL REPLACEMENT WARRANTY
PRICE DOES NOT INCLUDE CUSTOMS DUTIES TAXES OR TARIFFS. THESE ARE THE RESPONSIBILITY OF THE RECIPIENT

Late Payment Penalty: Payment is due within 30 days of the issue date of the invoice. A penalty of 2% per month is applied from the 31st day onwards.

Bank Information:
 Canadian Imperial Bank of Commerce (CIBC)
 7125 Woodbine Ave
 Markham, Ontario CANADA L3R 1A3
 For International / Domestic Transfers in CAD, please use: 01002242-7607318

Bank Transit #: 02242
 BANK No: 010
 CAD Account#: 7607318
 Swift Code: CIBCCATT

Page 2 of 2