

PROGRAMA DE INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO DE PUENTES A ESCALA REDUCIDA

Ing. Pablo Agüero Barrantes, M. Sc.

Ingeniero investigador, Unidad de Puentes, PITRA, LanammeUCR, Costa Rica
pablo.aguerobarrantes@ucr.ac.cr

Ing. Rolando Castillo Barahona, Ph. D.

Coordinador, Unidad de Puentes, PITRA, LanammeUCR, Costa Rica
rolando.castillo@ucr.ac.cr

Introducción

Desde el 2010, la Unidad de Puentes del PITRA-LanammeUCR, viene realizando esfuerzos para mejorar el conocimiento de profesionales y estudiantes de ingeniería civil sobre el diseño de puentes. Para lograr este objetivo, se han identificado tres métodos que permitan diseminar información y con ello solventar de forma rápida y efectiva esta necesidad. Estos métodos son: capacitación, docencia e investigación.

La capacitación periódica es uno de los métodos más eficientes para mejorar en el corto plazo el conocimiento de profesionales sobre diseño y construcción de puentes. Es por ello que el LanammeUCR viene impartiendo cursos de capacitación de forma sistemática en temas tan variados como inspección rutinaria y detallada de puentes, diseño estructural, diseño hidráulico, rehabilitación de puentes existentes y construcción de puentes nuevos.

Paralelamente, se inician esfuerzos para incentivar el interés en diseño de puentes a los estudiantes de la carrera de ingeniería civil de la UCR. Es por ello que a partir del I semestre del 2012, la Escuela de Ingeniería Civil, con apoyo de la Unidad de Puentes, abre por primera vez en su historia un curso optativo dedicado al análisis y diseño estructural de puentes. Al día de hoy, han pasado por el aula más de 35 estudiantes interesados en el tema y esperamos que esta iniciativa comience a brindar frutos en el corto y mediano plazo.

La unidad de puentes es consciente de que la investigación es el pilar fundamental de todo centro universitario y por lo tanto en años recientes viene invirtiendo recursos económicos para adquirir equipos de primer mundo y capacitando personal, permitiendo incrementar la investigación en el área de puentes que ha realizado la Escuela de Ingeniería Civil a lo largo de su existencia.

La meta de la Unidad de Puentes de incrementar la investigación en materia de puentes ya muestra frutos con el inicio del programa de instrumentación y monitoreo estructural de puentes, edificaciones y otras estructuras mediante el uso de modelos a escala reducida. Este programa comprende la realización de ensayos de modelos a escala con el fin de comprender el comportamiento y la respuesta de estructuras de puentes y edificaciones cuando están sujetas a cargas gravitacionales y sísmicas.

El programa en discusión consiste de varias etapas la cuales se describen a continuación:

- Construcción de modelos de puentes, edificaciones y estructuras de carácter genérico.
- Compra de modelos de puentes existentes en el mercado internacional que facilite la investigación

de estructuras sencillas y complejas.

- Investigación sobre equipos, accesorios y sensores con el fin de identificar el equipo idóneo para el proyecto.
- Realizar ensayos experimentales con los diferentes modelos construidos.
- Predecir el comportamiento de los modelos experimentales mediante modelos analíticos.
- Preparar manuales del estudiante y del profesor para que el conocimiento adquirido pueda ser transmitido a estudiantes y profesionales que participan en cursos que imparte la Unidad de Puentes.

Este programa pionero permitirá comprender de primera mano sobre la idoneidad de equipos, accesorios y sensores para realizar el monitoreo de estructuras y además permitirá adquirir destreza en la adquisición, manejo y análisis de datos y en el uso de modelos analíticos para predecir el comportamiento y la respuesta obtenida experimentalmente a partir de modelos a escala.

Además, con esta iniciativa se busca sentar las bases para el desarrollo de dos nuevos proyectos de investigación:

- Instrumentación y monitoreo estructural de puentes existentes del país que está por iniciar en el segundo semestre de este 2014.
- Proyecto de adquisición y puesta en funcionamiento de una mesa vibratoria de 3 x 3 metros, para la realización de ensayos a estructuras o componentes estructurales, tanto a escala natural o a escala reducida.

Objetivos

El objetivo general de este artículo es mostrar los avances que ha realizado la Unidad de Puentes en la implementación del programa de instrumentación y monitoreo de estructuras a escala reducida.

Específicamente, se plantea los siguientes objetivos específicos:

- Presentar y describir los equipos, software, sensores y accesorios adquiridos por la unidad de puentes.
- Describir los modelos adquiridos y construidos.
- Presentar un modelo experimental sencillo de un grado de libertad, su planteamiento teórico y los resultados experimentales obtenidos.
- Predecir la respuesta experimental del modelo de un grado de libertad mediante un modelo analítico.

- Presentar los planes a mediano y largo plazo de la Unidad de Puentes.

Equipo, sistema de adquisición de datos, software y sensores adquiridos

A continuación se presenta brevemente los equipos y accesorios adquiridos por la Unidad de Puentes para el inicio de este proyecto.

Se adquirieron 2 mesas vibratorias portátiles desarrolladas y fabricadas por la empresa canadiense Quanser (ver figura 1). Este equipo es la mesa utilizada por el Consorcio de Universidades de Mesas Vibratorias Instructivas (UCIST, por sus siglas en inglés). El consorcio inició en 1999 con la participación de 23 universidades estadounidenses y actualmente supera los 100 afiliados (Dyke, 2002).

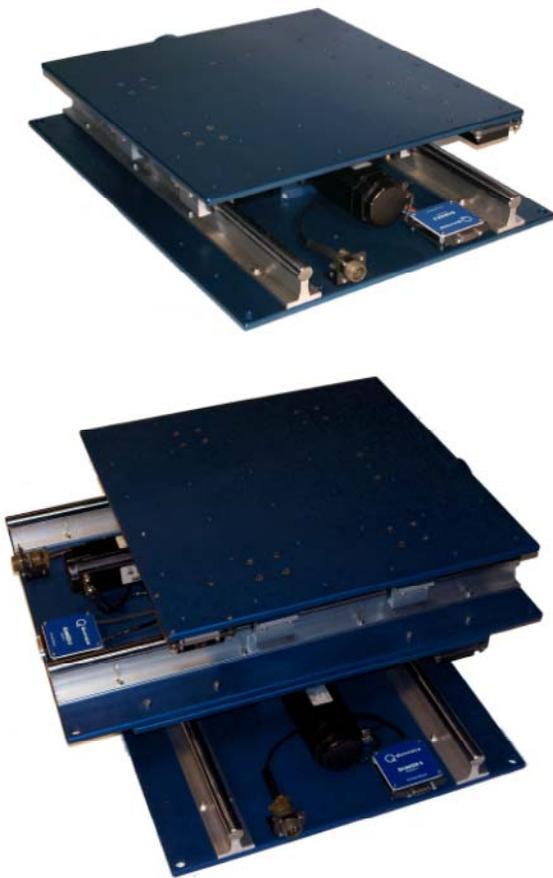


Figura 1.- Mesa vibratoria portátil. Arriba en configuración unidireccional y abajo en configuración bidireccional (Quanser, 2014).

La mesa tiene la capacidad de inducir movimientos sinusoidales, barridos de ondas y registros de eventos sísmicos en modelos estructurales. La mesa puede inducir aceleraciones horizontales de hasta 2.5g en modelos que no excedan un peso de 7,5 kilogramos y tiene un rango de desplazamiento de más menos 76 milímetros (Quanser, 2014).

Además, se adquirió un sistema de adquisición de datos, programado con el software LabView, que permite adquirir y procesar las señales emitidas por diferentes sensores.

Entre los sensores adquiridos durante una primera etapa, se pueden mencionar acelerómetros triaxiales (ver figura 2), celdas de carga (ver figura 3) y transformadores diferencial de variación lineal o LVDT por sus siglas en inglés (ver figura 4). Estos accesorios cuentan con especificaciones técnicas específicas que permiten realizar mediciones a modelos estructurales en el rango esperado de aceleración, fuerza y desplazamiento esperado.



Figura 2.- Acelerómetro triaxial.



Figura 3.- Celda de carga.

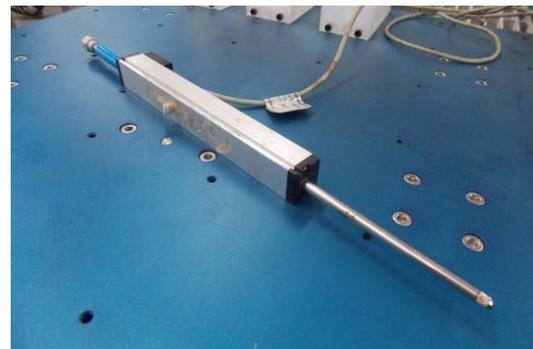


Figura 4.- LVDT.

Modelos estructurales adquiridos

Adicionalmente a los equipos descritos en el apartado anterior se han adquirido y construido varios modelos estructurales que permitan iniciar con mediciones que faciliten transmitir conocimiento a través de la docencia y adquirir nuevo conocimiento a través de la investigación.

Junto con las mesas se adquirió un modelo de dos grados de libertad denominado AMD-2 desarrollado por Quanser (Quanser, 2013) (ver figura 5). Este modelo va a permitir a los estudiantes de ingeniería civil aprender de forma experimental el efecto que tiene el uso de sistemas de amortiguamiento en el comportamiento estructural de modelos. El modelo consiste de dos niveles los cuales están instrumentados con sensores que registran las aceleraciones relativas a la base (la mesa). Cada nivel tiene asignada una masa que funciona de manera activa o pasiva según lo desee el operador. Cada masa consiste de un carro equipado con un motor eléctrico y engranajes apoyados en rieles dentados que permiten el desplazamiento del carro en el mismo sentido de la estructura y cumplen la función de amortiguadores. En modo pasivo el motor permanece apagado y el carro es capaz de desplazarse libremente para contrarrestar el movimiento de la estructura. Cuando el motor está encendido (modo activo) transmite un torque al engranaje controlando el movimiento del carro en los rieles, que es registrado con sensores. El movimiento controlado del carro amortigua de forma activa el desplazamiento de la estructura.



Figura 5.- Modelo de 2 grados de libertad con amortiguamiento activo o pasivo (Quanser, 2014).

También se adquirieron 4 colecciones de estructuras avanzadas las cuales permiten construir de forma modular diversos tipos de puentes como tipo cercha, colgante, atirantado, tipo arco, etc. (ver figuras 6, 7 y 8). Los puentes tienen la particularidad que pueden ser instrumentados con celdas de carga que el mismo fabricante proporciona para obtener, de forma experimental, la carga axial de elementos de interés para el investigador (ver figura 9).



Figura 6.- Puente a escala tipo arco.



Figura 7.- Puente a escala atirantado.



Figura 8.- Puente a escala tipo cercha.



Figura 9.- Celda de carga ubicada en el puente tipo cercha.

La Unidad de puentes ha desarrollado a la fecha dos modelos experimentales. El primero consiste en un modelo tridimensional de tres masas y 9 grados de libertad (ver figura 10). Además se construyó tres modelos de un grado de libertad que se describen en la siguiente sección (ver figura 11).



Figura 10.- Modelo tridimensional de 9 grados de libertad.

Comportamiento experimental de un modelo de un grado de libertad

En este apartado se presenta el ensayo experimental de tres modelos sencillos de un grado de libertad (ver figura 11) creado para facilitar la enseñanza del comportamiento y respuesta dinámica de estructuras a los estudiantes avanzados de la carrera de ingeniería civil.

El propósito del experimento es crear una herramienta para el profesor que le facilite la enseñanza sobre el comportamiento y la respuesta dinámica de estructuras a estudiantes de la carrera de ingeniería civil. El proyecto se complementa con la creación de un manual para el estudiante que le permita replicar, paso a paso, el ensayo, realizar los cálculos teóricos, aprender sobre el uso de sensores y comprender por medio de experimentos la dinámica de estructuras. También se redactó un manual para el profesor donde se resume el planteamiento teórico del experimento y presenta los resultados que se espera del mismo.

Descripción de los modelos

Los modelos consisten de dos columnas construidas con láminas de acrílico “empotradas” en sus extremos. Las columnas se fijan en su extremo inferior a la mesa vibratoria mediante una lámina de acrílico de 3,0 mm de espesor la cual a su vez se fija a la mesa y en su extremo superior se fija a otra lámina acrílica similar que también sirve de apoyo a una masa de acero de 20 N.

Para este experimento la masa sobre los modelos se mantiene constante y la altura de las columnas varía para cambiar su rigidez lateral. En la figura 12 se presenta las dimensiones de los modelos la cual se complementa con la información

incluida en la tabla 1.

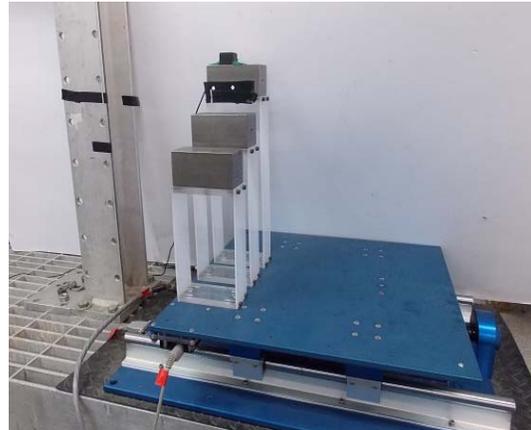


Figura 11.- Modelos de un grado de libertad sobre la mesa vibratoria de Quanser

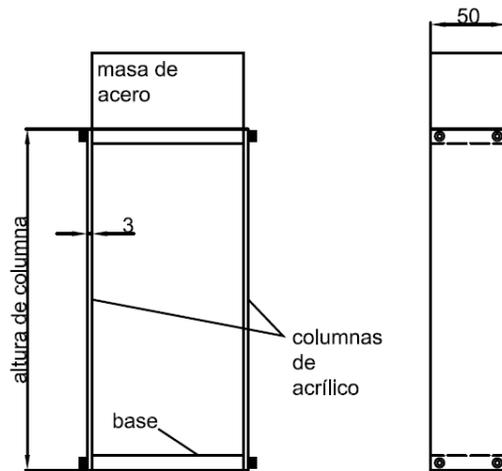


Figura 12.- Dimensiones del modelo de un grado de libertad.

Tabla 1.- Características de los modelos

Modelo	Altura total de columna [mm]	Peso, mg [N]
A	300	20
B	225	20
C	180	20

En la figura 13 se muestra el montaje experimental de los modelos de un grado de libertad y los sensores respectivos. El modelo se ancla a la mesa mediante 2 tornillos, el sensor de desplazamiento (LVDT) se apoya sobre una columna rígida para medir los desplazamientos horizontales de la masa concentrada y el sensor de aceleración se coloca sobre la masa concentrada. Los sensores están conectados al sistema de adquisición de datos, programado con el programa informático LabView, para obtener las lecturas de aceleración y desplazamiento con la frecuencia y formato requerido (ver

figura 14).

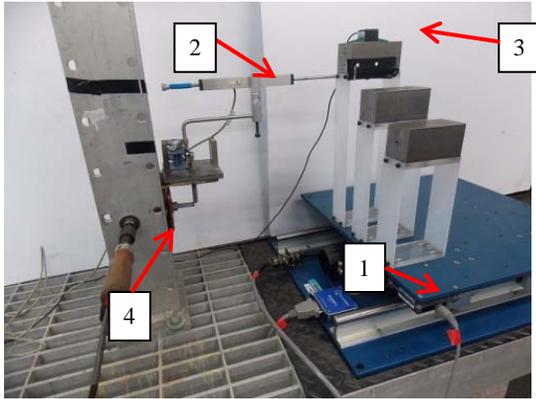


Figura 13.- Montaje experimental: (1)- mesa vibratoria, (2)- LVDT, (3)-acelerómetro, (4)- columna rígida.

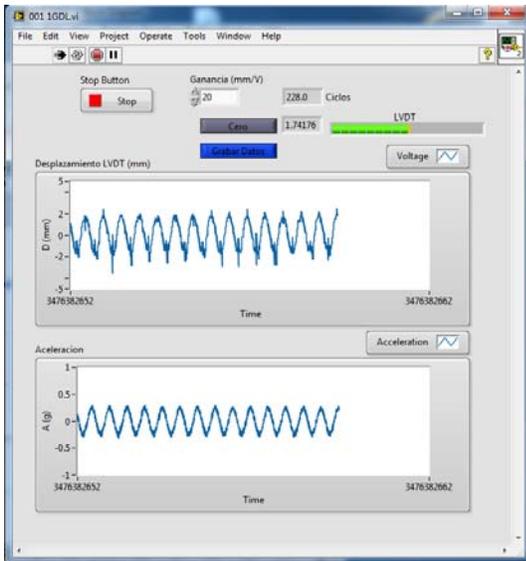


Figura 14.- Aplicación en LabView mostrando la adquisición de datos de desplazamiento y aceleración de manera grafica.

Estimación teórica de las propiedades de los modelos

En este apartado se presenta el marco teórico del experimento con los modelos de un grado de libertad sometidos a un movimiento armónico en resonancia (Chopra, 2001) y los resultados de los cálculos utilizando las dimensiones y masa de los modelos.

En la figura 15 se presenta el modelo teórico de un sistema de un grado de libertad. La masa m se supone concentrada en la cima del modelo y las columnas presentan una rigidez k .

En el caso del modelo de la figura 12 la rigidez del sistema se calcula como:

$$k = \sum \frac{12EI}{h^3} \quad [1]$$

donde:

k = rigidez del sistema,

E = módulo de elasticidad de las columnas,

I = inercia de la sección de las columnas,

h = altura del modelo.

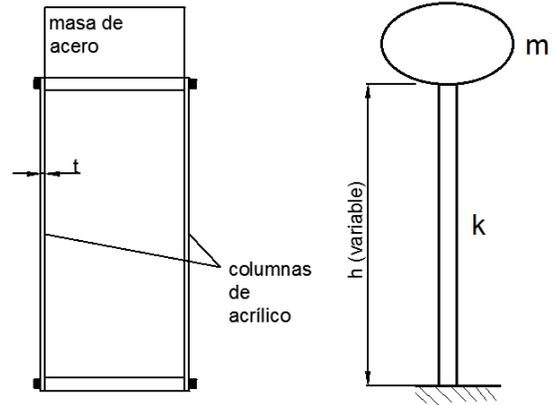


Figura 15.- Modelo teórico.

Con los valores de masa y rigidez se calcula la frecuencia angular natural en resonancia del sistema:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [2]$$

donde:

ω_n = frecuencia natural.

El periodo natural del sistema T_n se calcula como:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad [3]$$

Finalmente, cuando un sistema de un grado de libertad está sometido a una excitación con un periodo igual al periodo natural del sistema el desplazamiento total se calcula como:

$$u_0 = \frac{(u_{st})_0}{2\zeta} \quad [4]$$

donde:

ζ = razón de amortiguamiento crítico,

u_0 = desplazamiento total,

$(u_{st})_0$ = desplazamiento de la mesa,

Se puede observar en la ecuación [4] que el desplazamiento de la mesa u_0 de una estructura en resonancia depende únicamente del desplazamiento en la base inducida por el terreno y de la razón de amortiguamiento crítico.

En la tabla 2 se presenta los resultados obtenidos de la aplicación de las ecuaciones [1] a [4]. En este caso se supuso una razón de amortiguamiento crítico ζ igual a 3,96% reportado en el libro de texto de Chopra (Chopra, 2001) para un modelo similar con un periodo de $T=0,27$ segundos. El desplazamiento de la mesa $(u_{st})_0$ de la tabla 2 es el medido experimentalmente.

Tabla 2.- Resultados teóricos

Modelo	T_n [seg]	$(u_{st})_0$ [mm]	u_0 [mm]
A	0,49	1,80	22,7
B	0,31	1,78	22,5
C	0,23	1,68	21,2

Resultados experimentales

En esta sección se presenta los resultados experimentales obtenidos del ensayo de los tres modelos de un grado de libertad de la figura 11.

Excitación introducida por la mesa

El movimiento de la mesa vibratoria se controla mediante el programa *Shake Table II Software* (Quanser, 2014). Este programa induce en la mesa un movimiento sinusoidal con un periodo que excite el periodo de resonancia de cada modelo.

Se registra la aceleración y el desplazamiento de la masa y de la mesa vibratoria mediante el sistema de adquisición de datos debidamente programado.

Estos datos luego son comparados con las predicciones obtenidas a partir de modelos analíticos.

Cálculo del desplazamiento y amortiguamiento crítico

Para calcular el desplazamiento total de modelo cuando este está en resonancia u_0 se requiere conocer la razón de amortiguamiento crítico ζ . Debido a que no existe una metodología analítica para el cálculo del porcentaje de amortiguamiento crítico, éste se debe obtener experimentalmente.

Para determinar la razón de amortiguamiento crítico ζ de cada modelo se induce vibración libre al modelo, se registra las aceleraciones de la masa versus tiempo. El amortiguamiento crítico se obtiene con ayuda de la ecuación [5] y la información registrada de aceleraciones.

$$\zeta = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{\ddot{u}_i}{\ddot{u}_{i+j}} \quad [5]$$

donde:

i = primer ciclo del cálculo,

j = ciclos para calcular,

\ddot{u} = aceleración de la masa.

En las figuras 16, 17 y 18 se presenta el registro de aceleraciones en vibración libre de los modelo A, B y C, respectivamente. En la tabla 3 se resume el periodo y el amortiguamiento crítico ζ obtenido experimentalmente para cada modelo. Nótese que el amortiguamiento se reduce al disminuir el periodo de cada modelo. Todos los valores obtenidos de la razón de amortiguamiento superan el valor reportado por Chopra (2001) para el modelo de plexiglass reportado en el texto. Lo anterior implica que el utilizar el valor teórico de razón de amortiguamiento igual a 3,96% (Chopra, 2001) se obtendrían predicciones analíticas conservadoras del desplazamiento total u_0 . Si la tendencia de reducción del amortiguamiento crítico ζ se mantiene, es de esperar que para modelos con una rigidez mayor (o periodo menor) que la del modelo C, las predicciones analíticas de u_0 resultarían ser menores a los que se muestran en la tabla 3. Esta diferencia en la razón de amortiguamiento puede estar asociada con la forma como son conectadas las columnas entre elementos. Es probable que las columnas del modelo de Chopra fueran conectadas con pegamento en vez de atornilladas por lo que es de esperar que una conexión atornillada introduzca un amortiguamiento mayor al sistema.

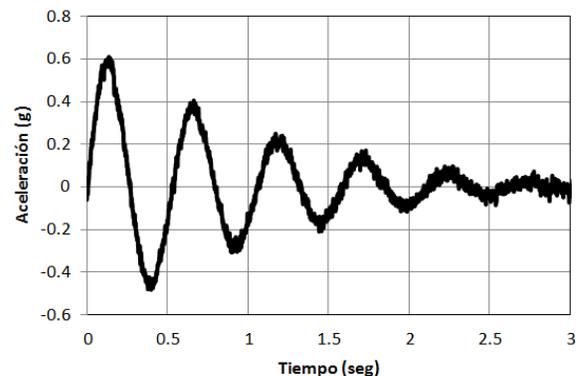


Figura 16.- Registro de aceleraciones del modelo A en vibración libre.

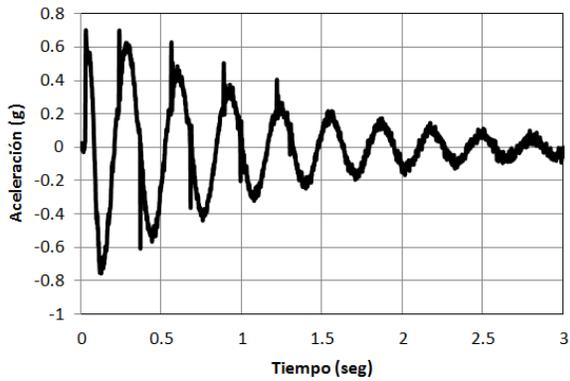


Figura 17.- Registro de aceleraciones del modelo B en vibración libre.

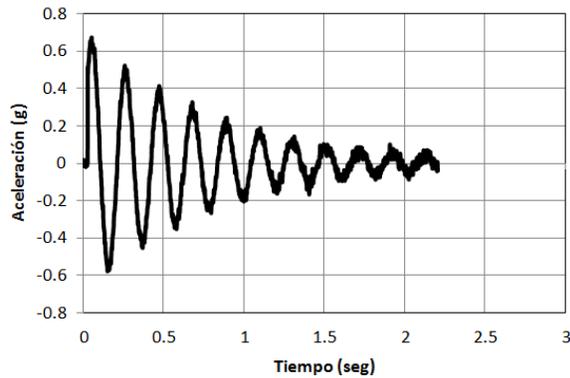


Figura 18.- Registro de aceleraciones del modelo C en vibración libre.

En la tabla 3 también se que los valores experimentales del desplazamiento de la mesa $(u_{st})_0$. Nótese que el desplazamiento total que la mesa induce al modelo u_0 es proporcional al periodo de vibración de la mesa. Los valores de desplazamiento total u_0 obtenidos experimentalmente presentan diferencias de hasta un 55% con respecto a las predicciones analíticas indicadas en la tabla 2, debido a las diferencias en los valores de ζ .

Tabla 3.- Resultados experimentales

Modelo	ζ [%]	T_n [seg]	$(u_{st})_0$ [mm]	u_0 [mm]
A	6,4	0,50	1,80	14,6
B	5,0	0,31	1,78	19,3
C	4,1	0,21	1,68	19,4

Resultados de la predicción analítica

Se utilizó el programa NONLIN (Advance Structural Concepts, 2003) para predecir analíticamente el comportamiento y la respuesta de los modelos experimentales de un grado de libertad (ver figura 19). Para el análisis se

utilizó los valores de ζ y $(u_{st})_0$ obtenidos experimentalmente y resumidos en la tabla 3. En la tabla 4 se presenta el desplazamiento total u_0 obtenido analíticamente para cada modelo. El porcentaje de error máximo del desplazamiento total u_0 con respecto al valor experimental reportado en la tabla 3 es de 8,8% para el modelo B.

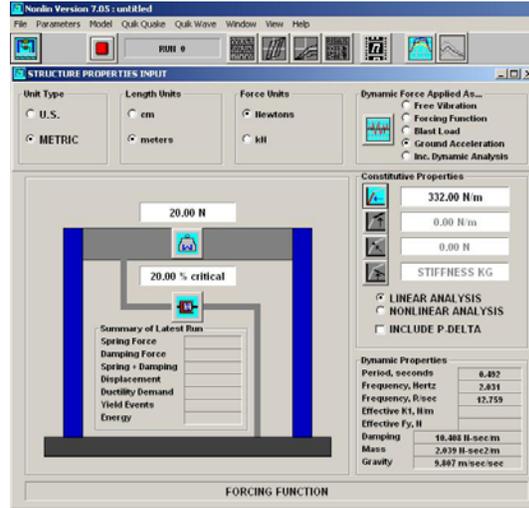


Figura 19.- Programa NONLIN (Advance Structural Concepts, 2003).

Tabla 4.- Desplazamiento total de la mesa obtenido analíticamente

Modelo	$(u_{st})_0$ [mm]	u_0 [mm]	Error [%]
A	1,80	14,1	3,4
B	1,78	17,6	8,8
C	1,68	20,4	5,2

En la figura 20 se presenta la comparación del desplazamiento de la mesa vibratoria (línea azul y sólida), el desplazamiento teórico del modelo (línea a puntos y roja) y el desplazamiento experimental registrado (línea negra y sólida) para el modelo A en resonancia. Los resultados obtenidos se consideran aceptables y sin una diferencia importante. Las figuras 21 y 22 presentan los resultados correspondientes de los modelos B y C respectivamente.

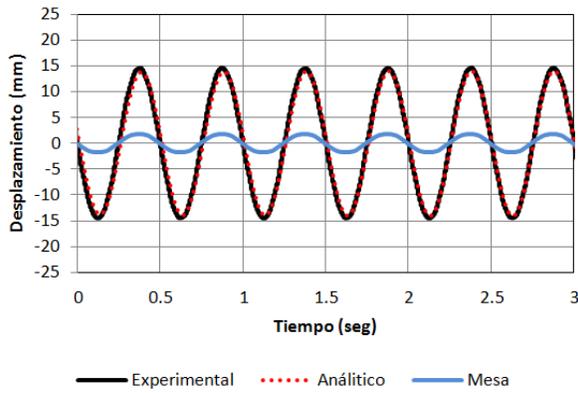


Figura 20.- Registro de desplazamientos del modelo A en resonancia.

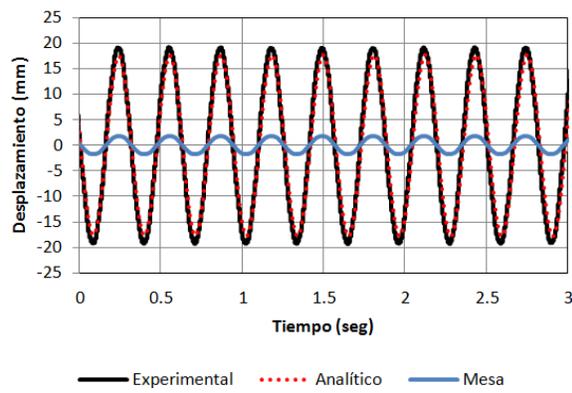


Figura 21.- Registro de desplazamientos del modelo B en resonancia.

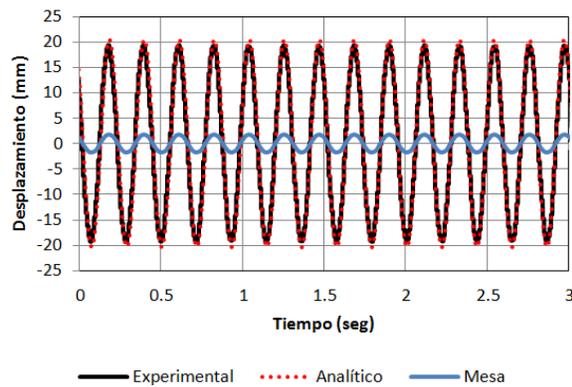


Figura 22.- Registro de desplazamientos del modelo C en resonancia.

Con base en los resultados obtenidos se concluye que la respuesta de un modelo real de un grado de libertad se puede predecir analíticamente si se utiliza el coeficiente de amortiguamiento correcto. Se debe considerar que los valores de amortiguamiento empleados en la práctica profesional son aproximaciones promedio. Una mala elección del coeficiente de amortiguamiento puede conllevar a subestimar la respuesta real de la estructura por lo que su elección es muy importante.

Planes a corto plazo

En el corto plazo se continuará desarrollando modelos simples de puentes y estructuras en general para verificar su respuesta experimental con la respuesta derivada a partir de modelos analíticos. Cada experimento desarrollado contará con un manual del profesor y un manual del estudiante.

Planes a mediano plazo

La primera tarea a ejecutar a mediano plazo es el desarrollo de un sistema de monitoreo rápido en sitio de puentes existentes en la red vial nacional. En esta etapa se realizarán mediciones periódicas con equipo inalámbrico en puentes seleccionados con base en las inspecciones visuales que realiza la Unidad de Puentes del PITRA. Los resultados obtenidos servirán para complementar las inspecciones visuales y tomar decisiones en cuanto a las prioridades de mantenimiento y rehabilitación de los puentes seleccionados.

Los conocimientos adquiridos en las etapas anteriores sirven de base para dos proyectos en los cuales se viene trabajando.

La primera consiste en el monitoreo remoto y permanente de puentes estratégicos de la red vial de Costa Rica. Esta etapa es una continuación del monitoreo rápido con la diferencia de que la instrumentación es con fibra óptica colocada permanentemente y el procesamiento de datos es en tiempo real. Este sistema permitirá detectar deficiencias estructurales en puentes después de eventos como sismos si es que se conocía el comportamiento del puente, en un tiempo relativamente corto. Los resultados permiten conocer el estado estructural y tomar decisiones como el cierre temporal de un puente o las prioridades de rehabilitación de los puentes monitoreados.

La otra etapa consiste en la adquisición de una mesa vibratoria de 3x3 metros capaz de inducir desplazamientos en 3 direcciones ortogonales. Los conocimientos adquiridos con las mesas portátiles y modelos sencillos a escala reducida sirven como preparativo para esta nueva etapa, que presupone el uso de la misma instrumentación y el aumento en el factor de escala de los modelos experimentales. La inversión económica que significa la adquisición futura de la mesa de 3x3 metros justifica la inversión anterior de la mesa vibratoria portátil y el resto de equipos mencionados anteriormente.

La nueva mesa vibratoria permitirá realizar ensayos de modelos a escala reducida o a escala real (ver figura 23). Este tipo de investigaciones servirán para ampliar el conocimiento del comportamiento estructural de puentes, realizar revisiones con base en los códigos extranjeros utilizados en el diseño de puentes y desarrollar normas propias de diseño.



Figura 23.- Modelo experimental a escala 0,40 de un puente curvo
(Buckle, 2013)

Conclusiones y Recomendaciones

Se presentó el avance logrado a la fecha del proyecto de instrumentación y monitoreo de puentes a escala reducida de la Unidad de Puentes del PITRA-LanammeUCR.

Se presentó los resultados experimentales y analíticos de tres modelos de un grado de libertad. Los resultados son aceptables y sirven como base para la realización de ensayos más complejos.

Los experimentos realizados con las mesas vibratorias portátiles aportan conocimiento y experiencia en la definición de sensores, sistemas de adquisición de datos y su programación, accesorios varios y construcción de modelos experimentales. Este conocimiento adquirido facilitará la realización de ensayos a escala natural o escala reducida de modelos en una mesa vibratoria de 3 x 3 metros.

Se está preparando un manual del estudiante que sirva de guía para que los estudiantes puedan replicar el ensayo de un grado de libertad. También se está preparando un manual para el profesor con información detallada del ensayo experimental y la predicción analítica. Los experimentos van a incluir ensayos con excitaciones armónicas y movimientos sísmicos

Este programa de monitoreo de puentes pone en evidencia los beneficios que trae utilizar mesas vibratorias portátiles para fines demostrativos y académicos en cursos introductorios y avanzados de la carrera de ingeniería civil.

Se pretende fabricar nuevos modelos y utilizar en el corto plazo el modelo AMD-2 para facilitar la enseñanza de sistemas estructurales con control activo y pasivo.

Este programa también aporta conocimiento y experiencia para las etapas de monitoreo rápido y monitoreo permanente de puentes en Costa Rica a iniciar en el corto y mediano plazo.

Agradecimiento

Se agradece a todas las unidades del LanammeUCR ajenas al PITRA que han apoyado este proyecto: la Unidad de Mantenimiento coordinada por Jorge Mora, el Laboratorio de Infraestructura Civil coordinado por la Ing. Ana Monge y el Laboratorio de Fuerza coordinado por el Ing. Humberto Tioli.

Referencias Bibliográficas

Advanced Structural Concepts (2003). NONLIN 7.05 Computer Program for Nonlinear Dynamic Time History Analysis of Single and Multi Degree of Freedom Systems: User's Manual". Blacksburg, Virginia, EEUU.

Buckle, I.G. (2013). Improving the seismic resilience of bridges through large-scale experiments. Congreso Estructuras 2013, XII Seminario de Ingeniería Estructural y Sísmica. San José, Costa Rica.

Chopra, A.N. (2001). *Dynamics of Structures. Theory and applications to earthquake engineering*. Second edition. Prentice Hall, New Jersey, E.E.U.U.

Dyke, S.J.; Caicedo, J.M. (2002). *The University Consortium on Instructional Shake Tables*. Proceedings of the ICANCEER Conference, Harbin, CHINA.

Harris, H.G. (1999). *Structural modeling and experimental techniques*. Second edition. CRC Press, Florida, E.E.U.U.

Quanser Inc. (2013). Active Mass Damper – Two Floors (AMD-2) User Manual. Ontario, Canada.

Quanser Inc. (2014). Shake Table II User Manual. Ontario, Canada.