



II CAIM 2010  
Segundo Congreso Argentino  
de Ingeniería Mecánica  
San Juan - Noviembre 2010

## Modelo didáctico de uso múltiple para medición de vibraciones y propiedades dinámicas de máquinas

José E. Stuardi, Marcelo A. Ceballos y Julio C. Massa

*Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba  
Casilla de Correo 916, (5000) Córdoba, Argentina  
Tel/Fax: +54-3514334145 - E-mail: [jstuardi@gmail.com](mailto:jstuardi@gmail.com)*

### RESUMEN

Se describe un modelo didáctico construido para realizar mediciones de vibraciones en múltiples grados de libertad y estudiar aspectos de la dinámica de máquinas. Consiste básicamente en cuerpos rígidos apoyados entre sí y al suelo por medio de distintos sistemas flexibles. Su utilización contribuye a la comprensión de los modos y frecuencias de cuerpo rígido y de la respuesta dinámica a distintos tipos de excitaciones. Uno de los cuerpos es excitado por un motor de velocidad variable, mientras que el desequilibrio es variable para adecuarse a distintos ensayos.

El modelo es utilizado primeramente como ejercicio de modelación, para un posterior ajuste del modelo computacional por medio de técnicas de análisis modal. La medición de vibraciones permite contrastar niveles experimentales con resultados calculados, lo que es un paso previo a la introducción de técnicas de modificación estructural. Los prácticos donde se utilizó el modelo didáctico han resultado experiencias integradoras de procesos que abarcan desde la modelación hasta el uso de normativas para contrastar resultados.

El equipo puede ser configurado para simular el caso de asentamientos elásticos de máquinas con el objeto de lograr el aislamiento de vibraciones. Esta configuración permite la medición de la función de transmisibilidad desde el bloque al apoyo -aislamiento de la emisión- o la medición experimental del aislamiento de la inmisión, simulando la protección de equipos sensibles.

La colocación de un cuerpo secundario con propiedades adecuadas posibilita conformar un absorbedor dinámico y la medición de las funciones de transferencia. El modelo posibilita el uso e interpretación de las funciones asociadas al análisis de vibraciones y la utilización de distintas técnicas de medición de vibraciones.

La idea, que nació como una experiencia de laboratorio aislada, ha sido implementada exitosamente y constituye ahora un puente en el proceso enseñanza-aprendizaje que logra integrar conocimientos y despertar intereses renovados en el alumnado. Todo esto motiva una mejora continua de las posibilidades del equipamiento descripto.

**Palabras Claves:** modelo didáctico, medición de vibraciones, propiedades dinámicas de máquinas.

## 1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN DE LA TEMÁTICA DENTRO DE LA ASIGNATURA

Los problemas dinámicos, especialmente los problemas causados por vibraciones, tienen un rol cada vez más preponderante en la construcción de equipos, máquinas y medios de transporte terrestre, marítimo y aéreo. Diseños con materiales y secciones más livianas para mejorar el rendimiento, potencias más elevadas, incremento en las velocidades, exigencias mayores en los materiales y nuevos materiales especiales traen aparejada la necesidad de un análisis cada vez más detallado de los fenómenos vibratorios, que por otro lado, aparecen con más frecuencia en diseños de las características recién mencionadas. Las vibraciones pueden también generar efectos no deseados y dañinos en seres humanos, edificios y equipos técnicos de medición y control. Sin embargo, también sirven beneficiosamente en muchos procesos tecnológicos e industriales [1, 2].

Para solucionar los problemas que tienen que ver con esta temática, el Ingeniero Mecánico debe estar en condiciones de entender las causas de los fenómenos vibratorios y calcular adecuadamente la respuesta de los sistemas dinámicos que requieren su atención. Esto incluye el desarrollo del modelo de cálculo, del método de análisis y la interpretación de los resultados con auxilio de recomendaciones y normas.

La asignatura “Vibraciones Mecánicas y Dinámica de Máquinas” de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Córdoba, introduce al futuro Ingeniero Mecánico en el estudio de problemas concretos de vibraciones tomando como base los conocimientos de Mecánica Teórica, Cálculo Estructural y Diseño de Máquinas. El dictado de la asignatura se orienta a dotar al alumno con capacidades de analizar, modelar y calcular sistemas mecánicos sometidos a cargas dinámicas, proveyendo conocimientos conceptuales y herramientas de cálculo necesarias para realizar modificaciones estructurales, tendientes a solucionar problemas de carácter dinámico, basándose en datos provenientes de cálculo y mediciones experimentales [3,4].

### 1.1 Contenidos temáticos de la materia

En la asignatura “Vibraciones Mecánicas y Dinámica de Máquinas” se estudian vibraciones mecánicas, cálculo de la respuesta de sistemas dinámicos, vibraciones de sistemas no lineales, vibraciones aleatorias, vibraciones de sistemas continuos, conceptos de dinámica de máquinas, mediciones de vibraciones, interpretación de resultados y aspectos normativos.

### 1.2 Algunos aspectos sobre la metodología de enseñanza

Para mejorar la comprensión de los problemas, se realiza una constante asociación de los temas en estudio con ejemplos prácticos, donde se pone especial atención en la correspondencia entre el modelo de cálculo y el sistema real, para evaluar sus diferencias. El alumno realiza trabajos prácticos, en forma continua durante el desarrollo del cuatrimestre, referidos a problemas concretos con asociación real a temas de la ingeniería mecánica, de alguna manera simplificados o aislados del sistema real complejo, con el fin de posibilitar su interpretación y mejorar la didáctica.

Más allá de los conocimientos aportados por la materia, ésta pretende, en el penúltimo cuatrimestre del plan de estudios, afianzar en el futuro ingeniero una concepción ágil y moderna de la solución de los problemas. Para ello se deben utilizar herramientas adecuadas a los objetivos fijados, logrando celeridad y exactitud en la propuesta técnica y considerando tanto los métodos aproximados como los más exactos, pero valorando el costo y tiempo de solución. Estos aspectos son importantes en la construcción de máquinas con cargas dinámicas elevadas y propensas a problemas de vibraciones [5].

El objetivo de la asignatura es capacitar al alumno de modo que pueda predecir el comportamiento dinámico de un sistema, los problemas de vibraciones y la efectividad de los dispositivos mecánicos agregados para

la corrección del comportamiento. Todo ello con anterioridad a la ejecución de costosas y detalladas modelizaciones y procesos de cálculo, o con anterioridad a la ejecución de prototipos.

En la actualidad existen programas de cálculo para todos los problemas, pero la tarea del ingeniero sigue siendo, la definición de los modelos y los parámetros para el cálculo, la determinación del rango de validez de las hipótesis utilizadas, la interpretación de los resultados y su valoración en función de los resultados a priori esperados. Por todo lo expresado, resulta fundamental que el alumno logre internalizar los conceptos que le permitan enfrentar con éxito los desafíos de la práctica profesional. Precisamente el modelo didáctico que motiva el presente trabajo es una herramienta que ha demostrado colaborar eficazmente con este propósito.

## 2. OBJETIVOS

El modelo didáctico de uso múltiple se desarrolló para ser utilizado en clases de laboratorio, donde se realizan distintos trabajos prácticos sobre el tema medición e interpretación de vibraciones. Es evidente la necesidad de contar con una pieza obra, u objeto de medición, que posea propiedades variables apropiadas a cada temática a estudiar y sea por otro lado excitable dinámicamente. Si bien es claro que el modelo descrito en el presente trabajo no puede cubrir la totalidad de temas y ensayos factibles, tiene bastante versatilidad y por medio de la experiencia en su uso se ha propiciado una integración cada vez más frecuente a las clases teórico-prácticas.

En lo que respecta a la modelación de los problemas físicos, es habitual que durante el desarrollo de la carrera de grado se requiera que el alumno encuentre la solución de problemas, donde los datos aportados por el docente en el planteo, son parte de un proceso de solución previa. Esto se ha generalizado en muchas asignaturas de manera de focalizar mejor los problemas, facilitar la solución y disminuir el tiempo empleado, aportando además uniformidad a los resultados y criterios utilizados por los alumnos. La corrección y seguimiento de las actividades propuestas por el docente se simplifica además en forma notable, lo que es más marcado en cursos con muchos alumnos.

En muy pocas oportunidades los datos son presentados con el estilo propio de la práctica profesional, donde en general el planteo es ciertamente vago y el proceso de recolección de datos constituye parte del proceso de solución. Esto último requiere del conocimiento y de la experiencia del profesional. Lo expuesto es especialmente aplicable a la temática de mediciones de vibraciones, donde existe la necesidad de la pre-concepción de la solución: ello implica que en la mayoría de los casos es necesario tener una idea previa de los resultados a obtener al momento de definir la cadena de medición, seleccionar la ubicación y tipo de sensores, determinar las magnitudes a medir, etc.

El modelo didáctico descrito en este trabajo es utilizado como introducción a ejercicios tipo proyectos, que simulan casos prácticos donde el planteo es similar a los casos reales. Mediante su uso, se estimula la actitud creativa del alumno y la adopción de criterios en todas las etapas del trabajo: desde las hipótesis en la construcción del modelo hasta la interpretación de los resultados en base a los conceptos teóricos.

Desde el punto de vista técnico, el primer objetivo consiste en la definición de un modelo de cálculo en un programa computacional para calcular la respuesta de sistemas de cuerpo rígido sobre medios elásticos. Para estos efectos se utiliza con frecuencia el programa Isomag [6]. Posteriormente se lleva a cabo una calibración del modelo, en función de datos experimentales medidos. En estas condiciones se realizan distintos tipos de mediciones: mediciones de nivel, frecuencias (naturales y excitatrices) y amortiguamiento. Además estos valores son utilizados para contrastar lo medido con normas aplicables a máquinas y seres humanos. Otros temas tratados a partir de lo expuesto son introducciones a las técnicas de análisis modal experimental, modificación estructural, dinámica de sistemas no lineales, etc.

Lejos de propender a un modelo experimental que se aproxime a un modelo ideal teórico perfecto y con ausencia de imperfecciones, el modelo propuesto pretende introducir al alumno en la realidad de los sistemas de múltiples grados de libertad y en forma contrastante con las respuesta ideal de sistemas de uno (o más) grados de libertad lineales disponibles como resultado de las ecuaciones diferenciales de los sistemas vistos en el teórico de la asignatura.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPAMIENTO

El equipo consta básicamente de una caja de vidrio que contiene un motor eléctrico en su interior. La caja está construida en vidrio de 10 mm de espesor, siendo sus dimensiones externas 450 x 250 x 220 mm. Dentro de la regularidad de forma, posee además algunas singularidades, tales como agujeros de diámetro 100 mm en los centros geométricos de los laterales izquierdo y derecho y la ausencia de la tapa trasera. Esto permite la manipulación de los elementos internos. El uso de vidrio como material de base posee algunas ventajas, tales como elevada masa y rigidez, además de que posibilita la visibilidad del modelo en su totalidad.

El motor trifásico es un Siemens Mod. 1LA7070-2AA10 con potencia de 0.37 kW y 3000 rpm máximo. Está acoplado con un disco de acero de diámetro 120 mm y espesor 11,2 mm con tres agujeros roscados, que ubicados a distintos radios y desfasados entre sí, permiten la inclusión de desequilibrios de distinta magnitud, adecuándose a distintas posibilidades de ensayos.

En la Figura 1 se muestra el equipamiento, de izquierda a derecha se encuentra: el variador de frecuencia, el modelo de ensayo con geófonos instalados en su parte superior, el analizador de vibraciones y en la parte inferior de la foto una placa adicional sobre pads elastoméricos.



Figura 1: Modelo didáctico construido para realizar mediciones de vibraciones en múltiples grados de libertad

El regulador de frecuencia es un Siemens Modelo Sinamics G110, que permite una extensa variedad de programaciones de rampas para barridos de frecuencia. El equipo posee una base plana, lo que permite el asentamiento sobre un número variable de apoyos, tales como resortes helicoidales o pads elastoméricos comerciales de distinta densidad y factores de pérdida. Finalmente están disponibles varias placas de vidrio adicionales de 190 x 250 x 20 mm de espesor y pads y resortes adecuados al peso, para simular sistemas de múltiples grados de libertad encadenados.

Respecto de la instrumentación, es variable con fines didácticos. En el presente trabajo se describe p.e. el uso de transductores tipo geófonos Geospace 91413, con una sensibilidad promedio de  $26 \text{ V/ms}^{-1}$ , una frecuencia de resonancia de 4 Hz y una relación de amortiguamiento de 70 %. En la configuración explicada en este trabajo se han colocado 4 sensores en las esquinas superiores de la caja. Las señales son leídas directamente por un analizador de señales Hewlett Packard de cuatro canales HP35670A, que posee las siguientes características generales: procesamiento digital de señales en tiempo real (hasta 102,4 kHz un canal o 25,6 kHz para 4 canales) seguimiento de señal en dominio del tiempo y o frecuencia, filtro antialias incorporado con programación automática, análisis en frecuencia basado en FFT en tiempo real, transferencias, coherencias, promedio de muestras, seguimiento de orden, también en banda de octavas.

Las ventajas del uso de un analizador de esas características son conocidas en el campo profesional. La medición en tiempo real es preferida por la rapidez y versatilidad en los ensayos evitando el post-procesamiento de las señales por software, por lo que también estas ventajas son evidentes en la docencia, donde el resultado es visualizado en forma inmediata. Esto sin detrimento de los casos, en los que las señales grabadas en medios portátiles son distribuidas por Internet con el objeto de su posterior postprocesamiento por medio de software como Octave, Matlab, Scilab, Matcad, Mathematica, etc. En estos casos, el objetivo perseguido es una manipulación de los registros por parte del alumno y una programación orientada a la interpretación de los resultados.

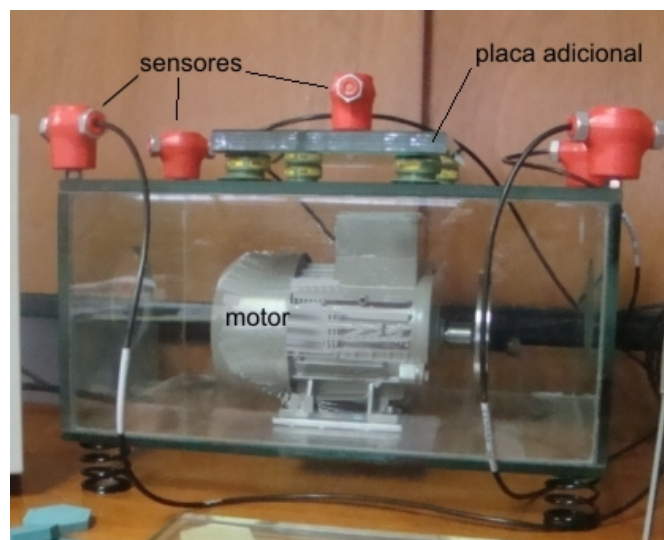


Figura 2: Vista del modelo de ensayo con motor y rotor excéntrico, mostrando sensores y una placa adicional.

La Figura 2 muestra el modelo didáctico en detalle sobre resortes helicoidales. Además se observa una placa adicional montada sobre su parte superior y montada mediante el uso de pequeños aisladores.

#### 4. ALGUNAS MODALIDADES DE TRABAJO ACTUALMENTE IMPLEMENTADAS

##### 1. Cálculo de modos y frecuencias propias de un cuerpo rígido soportado elásticamente:

El modelo habitual usado para el cálculo de fundaciones embebidas en el suelo o máquinas provistas de aislamiento de vibraciones en su base considera un cuerpo rígido apoyado en forma elástica por medio de resortes y amortiguadores. Se suponen pequeñas amplitudes y se considera al sistema lineal, despreciando la influencia de efectos de segundo orden y el efecto del peso en el movimiento. El cuerpo soportado en

forma elástica tiene tantos modos y frecuencias propias como coordenadas generalizadas, esto es seis si se supone que los elementos aisladores están desprovistos de masa, suposición que por otro lado es habitual.

El cálculo de las frecuencias propias y modos de cuerpo rígido de elementos de geometría elemental sencilla montado sobre sistemas resorte-amortiguador es realizado en el curso mediante el uso de fórmulas cerradas. En un caso general, el cuerpo puede estar compuesto de varias partes elementales, por ejemplo, máquina rígida y bloque de fundación (construido por debajo de la máquina y por encima del sistema de aislamiento), e incluso la misma máquina puede estar compuesta de varios sub-cuerpos vinculados rígidamente entre sí, siendo el análisis realizado convenientemente mediante el uso de programas de cálculo. Dentro de este grupo se encuentra el modelo didáctico, que puede ser armado como superposición de componentes individuales de forma geométrica sencilla y con el que se pueden contrastar valores calculados y experimentales.

## **2. Introducción a las técnicas de análisis modal:**

Los registros provenientes de las mediciones son utilizados para la explicación en general de las técnicas de análisis modal, las cuales no son parte del temario analítico de la materia, y por esta razón abordadas en forma global.

## **3. Calibración del modelo didáctico variando su configuración:**

Según se explicó anteriormente la calibración se hace aplicando alguna técnica básica para conseguir una adecuación de las propiedades dinámicas del modelo provistas por el programa de cálculo con las provenientes de los registros experimentales. El modelo puede ser configurado en distintas formas de manera de cambiar sus propiedades.

## **4. Mediciones comparativas:**

Mediciones comparativas de niveles de velocidades y aceleraciones en distintos puntos del modelo.

## **5. Medición de transmisibilidades:**

a) De la inmisión, en forma directa midiendo sobre placas adicionales de masa relativamente baja respecto del cuerpo principal, que han sido sustentadas en forma elástica por sobre el modelo y usando a éste como base vibratoria. El caso sirve para explicar la aplicación y validez de las hipótesis de desacoplamiento introducidas.

b) De la emisión ó transmisibilidad de vibraciones al piso: calculada como la sumatoria de las fuerzas de los resortes y amortiguadores del bloque asumiendo una curva excitatriz de fuerza desbalanceada parabólica (siendo el valor del desequilibrio, expresado como el producto de la masa por el desplazamiento, previamente calibrado).

## **6. Técnicas de mediciones de vibraciones:**

En este caso el modelo didáctico sirve como ejemplo para la elección de los componentes de la cadena de medición, teniendo en cuenta los parámetros principales a medir. Motiva además temas de discusión y análisis como: mediciones libres de distorsiones, predicción de los resultados esperables en función de la cadena de medición existente, acondicionamiento de señales, filtros, uso de conversores A/D, acondicionadores, aliasing, leakage, uso de ventanas de muestreo, etc.

## **7. Introducción al análisis de vibraciones en el diagnóstico de maquinarias:**

Se puede estudiar las consecuencias del desequilibrio en varios planos.

## 8. Corrección de la respuesta:

Corrección de la respuesta de la cadena de medición por medio del uso de la Función de Transferencia de algún componente de la misma: por ejemplo de los transductores.

## 5. RESULTADOS

En esta sección del trabajo se resumen algunos de los resultados referidos a las modalidades de trabajo con el modelo didáctico anteriormente expuestas y las posibilidades de interacción del modelo con los alumnos.

En la Figura 3 se muestra la vista frontal y lateral y en la Figura 4 una perspectiva del modelo didáctico, tal como es mostrado por el programa Isomag. El peso total del modelo resultó 22.8 kgf.

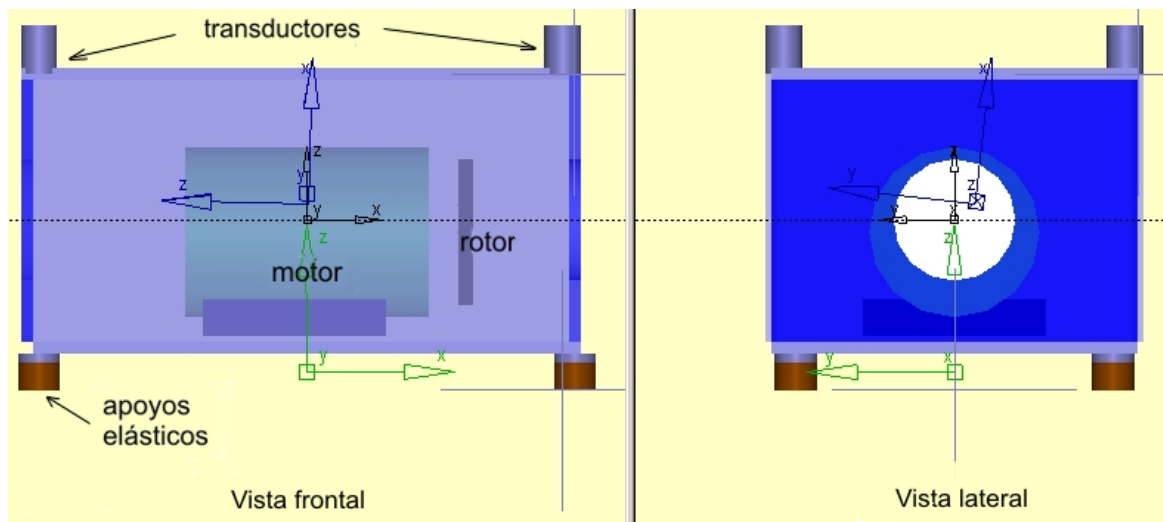


Figura 3: Modelo de ensayo, vista frontal y lateral desde el programa Isomag

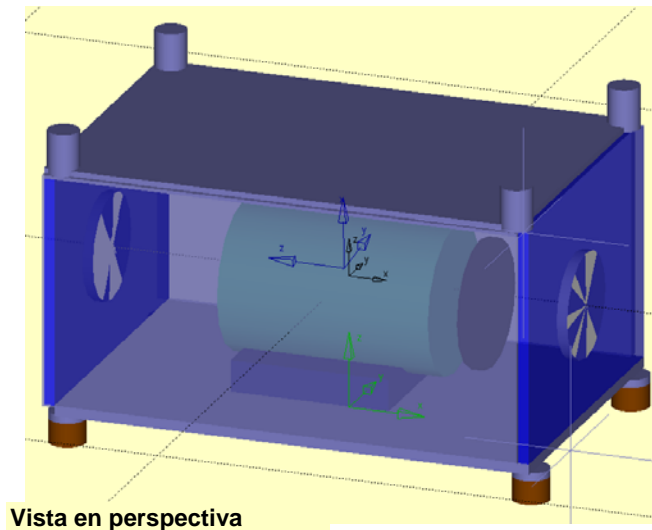


Figura 4: Modelo de ensayo visto en perspectiva

En la Tabla 1 se muestran las frecuencias naturales del modelo sobre cuatro resortes helicoidales de rigidez horizontal 15 N/mm y vertical 13 N/mm. La ausencia de amortiguamiento en los apoyos del modelo es deseable en esta etapa, porque permite identificar más claramente los modos y las resonancias en las experiencias prácticas.

Tabla 1: Frecuencias propias del modelo didáctico sobre resortes helicoidales

Nro. orden	1	2	3	4	5	6
frecuencia [Hz]	4,71	6,23	7,74	12,12	13,23	13,59
Tipo	Pend. X	Pend. Y	Vertical	Torsional	Pend. X	Pend. Y

Mediante una simple manipulación de los parámetros del modelo computacional se logran ajustes de las frecuencias medidas del orden del tercer dígito significativo. No se hace uso en este caso de técnicas especiales de calibración, ya que no son parte curricular de la asignatura, sin embargo se utiliza una técnica de prueba y error donde el razonamiento y la lógica indican la secuencia de parámetros a modificar. Básicamente se trabaja sobre las rigideces y relaciones de amortiguamiento de los apoyos y las propiedades inerciales del cuerpo rígido.

Utilizando el motor instalado y efectuando un barrido de frecuencias entre 2 y 15 Hz es posible visualizar la respuesta dinámica del conjunto mientras se excitan los diferentes modos de cuerpo rígido del sistema. El desequilibrio del rotor puede ser ajustado de manera de que la magnitud de los desplazamientos de baja frecuencia sean fácilmente observables. Se registran también señales en el tiempo y en la frecuencia para determinar la fase del movimiento en los sensores.

Otros ensayos son realizados por medio de impacto suaves, de modo de excitar a las frecuencias propias del sistema e identificar los modos y formas de vibrar. En la Fig. 5 se muestra la señal en el tiempo de vibración libre del sensor frontal derecho y su Transformada de Fourier.

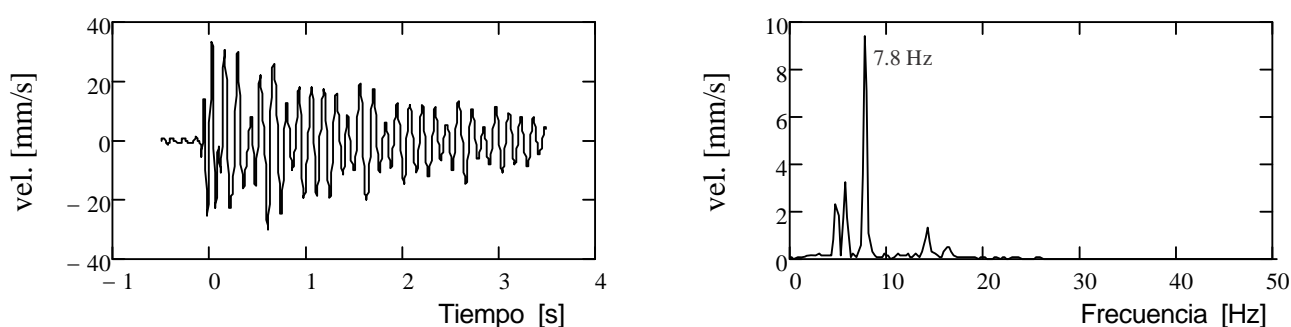


Figura 5: Histograma de respuesta debido a un impacto suave (izq.), Transformada de Fourier (der.).

Los ensayos son repetidos una vez que los resortes de apoyo son cambiados por pads elastoméricos de distinta rigidez y factor de pérdida. Esto permite la estimación del amortiguamiento modal mediante decremento logarítmico. Los archivos de texto registrados son repartidos al alumnado para su post-procesamiento en carácter de trabajo práctico. Estas actividades permiten además el afianzamiento del conocimiento en el uso de software de procesamiento de datos, análisis y graficación.

Las mediciones de nivel son hechas preferentemente en frecuencias típicas de operación de motores y equipos rotativos y alternativos. Se pueden así comparar los niveles de severidad de vibración con distintos desequilibrios y contrastar con los resultados del modelo computacional. En la Figura 6 se muestra un histograma en el tiempo y el espectro de respuesta para el modelo funcionando a una frecuencia fija fundamental de 900 rpm y un desequilibrio de 388 gmm. Se observa un pico en correspondencia con la primera armónica, además es perceptible la presencia de respuesta dinámica en las tres primeras frecuencias propias del sistema. Los registros son utilizados como disparadores de cuestionamientos acerca de la justificación técnica de la presencia de respuesta en frecuencias idealmente no excitadas. Se aplican aquí técnicas para diferenciar frecuencias propias de frecuencias de excitación forzada.

En cuanto al nivel medido a partir de los registros, este es comparado con el proveniente del modelo (calibrado para el caso). Para el ejemplo, es una onda armónica ideal de amplitud 6 mm/s. Valores de este orden de magnitud pueden ser percibidos en forma táctil, de manera que el alumno posea una idea comparativa de los valores permitidos por normas, concepto de severidad de vibración, etc. También se vinculan estos conceptos al nivel de desequilibrio según normas aplicadas a distintos grupos de máquinas, como ventiladores, máquinas alternativas, turbomáquinas, etc.

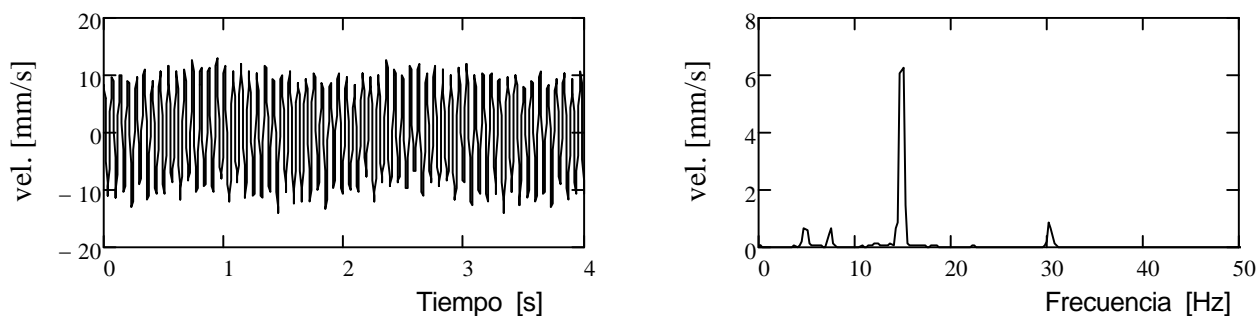


Figura 6: Respuesta del modelo girando a una frecuencia fija de 900 rpm.

El uso de distintos tipos de ventanas de muestreo, filtros -incluyendo antialiasing- es realizado en distintas etapas de las mediciones. Utilizando una ventana de medición rectangular por ejemplo, el espectro cambia al de la Fig. 7 bis con una amplitud máxima de 5.34 mm/s en la frecuencia de giro del rotor. Los cambios pueden ser rápidamente observados al mismo tiempo que se relaciona la teoría de análisis de señales con los resultados obtenidos.

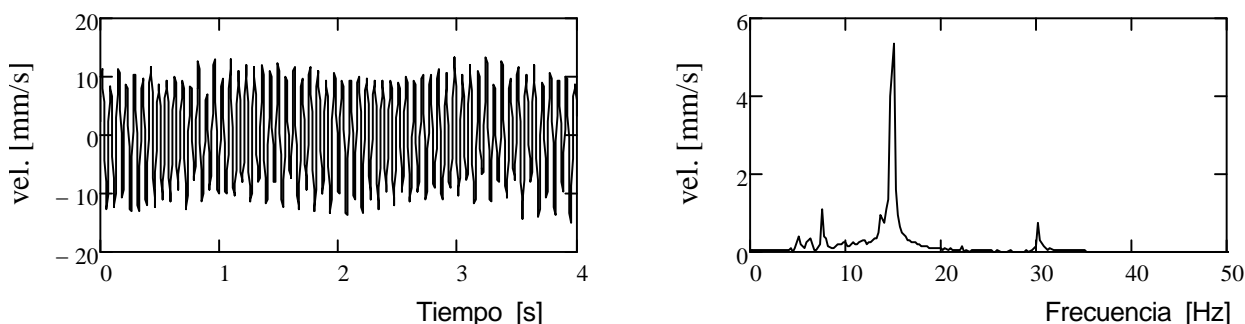


Figura 7: Respuesta del modelo girando a una frecuencia fija de 900 rpm, ventana de muestreo rectangular

El uso de los adicionales del modelo, tales como placas con soporte elástico hace posible mediciones de respuesta libre tales como se aprecia en la Figura 8, ajuste de histogramas y validez de la hipótesis de amortiguamiento viscoso, si correspondiere. Un conjunto placa-aisladores puede ser agregado por sobre el modelo, simulando la presencia de un absorbedor, en este caso la sintonización de la frecuencia propia vertical de la placa es próxima a la del sistema principal. El modelo permite la observación directa de la reducción de vibraciones del bloque principal mediante el agregado del sistema adicional, que posee una masa de aproximadamente 11 % respecto del cuerpo principal. Los modos de vibrar que corresponden con el movimiento vertical de las masas en fase y en contrafase pueden ser visualizados, además la magnitud y fase de los desplazamientos pueden ser cuantificados. Otros cálculos adicionales pueden ser realizados en carácter de práctico con esta configuración del sistema, que si bien es de 12 grados de libertad permite una rápida visualización del propósito del absorbedor, y que conserva las complicaciones que pueden aparecer en la práctica constructiva real.

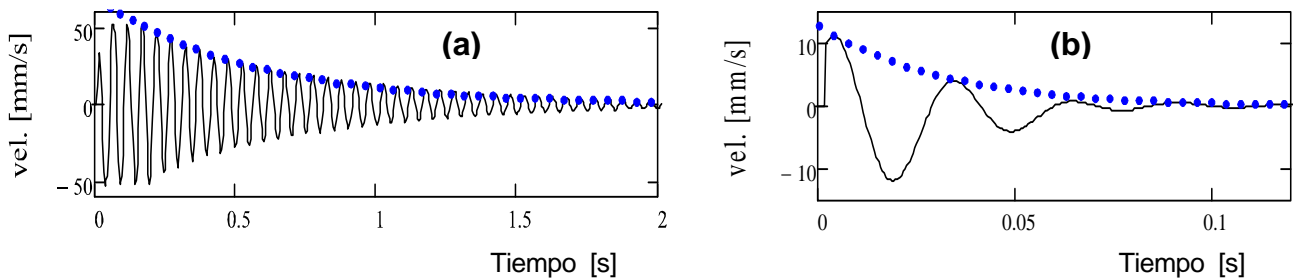


Figura 8: Respuestas libres con distintos medios elásticos:  
(a) Resortes helicoidales, (b) Material elastomérico con 30% factor de pérdida

La función de transmisibilidad es medida utilizando al modelo como base vibratoria y montando en su parte superior una placa de dimensiones adecuadas sobre cuatro aisladores. Utilizando por ejemplo una placa de 250 x 190 x 20 con peso 2,5 kgf y resortes helicoidales de rigidez vertical 1,55 N/mm, se obtiene un sistema con una frecuencia propia vertical de 7,9 Hz y amortiguamiento medido de 1,2 %. La placa adicional tiene montado un sensor en su centro geométrico. Mediante un barrido de frecuencias entre 0 y 50 Hz con un tiempo total de 650 segundos, se obtiene la transmisibilidad entre la superficie superior de la base vibratoria y la placa, promediando muestras de 4 seg. cada una.

El resultado puede ser visto en Figura 9, en dos gráficos: el segundo muestra en forma ampliada la zona de interés en el aislamiento de vibraciones. Los resultados son cuestionados en cuanto a la validez de las hipótesis adoptadas y su comparativa con la transmisibilidad de un sistema de 1 GL, la que aparece sobreimpresa con líneas de puntos como transmisibilidad teórica en los gráficos. Las siguientes cuestiones son a modo de ejemplo analizadas: a) validez de la hipótesis de base vibratoria con movimiento impuesto, en relación al sistema real de 12 GLD formado. b) comparativa de transmisibilidades y posibilidad de cálculo simplificado con sistemas de 1 GL, dependiendo del rango de frecuencias y ubicación de los sensores. c) validez del barrido en frecuencias y de las funciones de coherencia obtenidas.

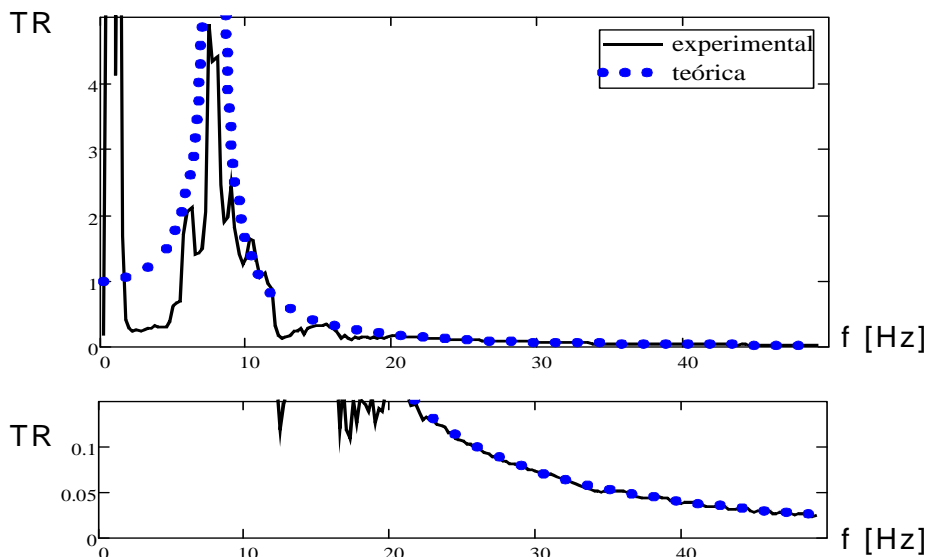


Figura 9: Función de transmisibilidad entre la base vibratoria y una placa aislada.  
Ajuste con curva teórica de un sistema de 1GL.

Lo expuesto permite numerosas interacciones con el alumno durante la actividad docente: en el aula y fuera de ella, en temáticas que abarcan desde la modelación, medición e interpretación, el post-procesamiento de datos y el cálculo experimental de parámetros en base a mediciones hechas en clase.

## 6. CONCLUSIONES

El modelo didáctico de cuerpo rígido descrito en el presente trabajo permite medir vibraciones en múltiples grados de libertad y sirve de material de apoyo para estudiar aspectos de la dinámica de máquinas. Tiene la posibilidad de generar vibraciones armónicas por medio de una masa rotante desbalanceada y ser excitado por golpes. Su configuración es variable para adaptarse a los distintos ensayos y tareas de laboratorio, que abarcan desde la calibración de modelos, las mediciones de nivel, o el uso aplicativo de normas para valorar los resultados.

En una asignatura donde abundan las ecuaciones diferenciales y los métodos numéricos, se ha mantenido como objetivo el entendimiento de los fenómenos físicos y la conceptualización de los contenidos. Desde este punto de vista, la utilización del modelo ha demostrado que puede motivar a los alumnos y les ayuda a comprender la teoría, mediante la simple observación del movimiento de sus componentes, o mediante el posterior análisis e interpretación de los registros obtenidos. Esto último constituye el paso inicial para ejercicios de post-procesamiento de datos a partir de los registros recolectados en clase, y propende a la familiarización y mejora en el conocimiento del uso de las herramientas computacionales modernas.

La construcción del modelo tuvo como propósito inicial simular el caso de asentamientos elásticos de máquinas y hacer mediciones de transmisibilidad de la inmisión y de la emisión. Posteriormente y debido al éxito en su aplicación a la docencia, el modelo se amplió mediante la colocación de cuerpos secundarios y medios elásticos y de disipación con diferentes propiedades. Además, lo que inicialmente estaba previsto para realizar una única práctica de laboratorio, ha mutado en su aplicabilidad integrándose a las clases teórico-prácticas y posibilitando nuevas metodologías de docencia. La utilización del modelo didáctico ha resultado en experiencias integradoras del proceso de enseñanza, al conectar los conceptos teóricos con la práctica y dando la posibilidad de una rápida internalización del conocimiento.

Debido a la participación y actitud activa que el equipo didáctico despierta en el alumno, sus respuestas son elaboradas a partir de conceptos adquiridos como propios y evitando la mera repetición de conceptos no debidamente asimilados. Como conclusión final los autores quieren recalcar el éxito de la implementación de este tipo de actividades docentes y la motivación que genera, no sólo para los alumnos sino también para los docentes, lo que redundará además en una mejor comunicación docente-alumno.

## 7. REFERENCIAS

- [1] C.W. de Silva, *Vibration and Shock Handbook*, CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN 0-8493-1580-8, ISBN 0-8493-1580-8
- [2] C.M. Harris, *Shock and Vibration Handbook*, 4th edition, McGraw-Hill Professional Publishing; ISBN 0070269203. 1995.
- [3] *The Fundamentals of Signal Analysis, Application Note 243*, ISBN 5952-8898E, 1994.
- [4] B. Balachandran and E.B. Magrab. *Vibrations*, Thomson Learning. 2009.
- [5] *Holzweißig Dresig, Lehrbuch der Maschinen-dynamik, Fachbuchverlag Leipzig-Köln*, ISBN 3-343-00866-4. 1994.
- [6] ISOMAG - *Programmgestützte Schwingungsisolierung von Maschinen und Geräten, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*, véase también ISOMAG 1.1 - *Design and Calculation of the Vibration Isolation of Machines and Devices* ISBN 3-89701-804-7, 2002, Información en <http://www.baua.de>, 2009.