



Laboratorio de análisis computacional de sistemas vibratorios

Laboratory of computational analysis in vibratory systems

Cristina Aguilar-Porro¹, Mario Ruz-Ruiz² & Francisco J. Blanco-Rodríguez³

Fecha de recepción: 15/05/2019; Fecha de revisión: 21/07/2019; Fecha de aceptación: 04/09/2019

Cómo citar este artículo:

Aguilar, C, Ruz-Ruiz, M, Blanco-Rodríguez, Francisco J. (2019). Laboratorio de análisis computacional de sistemas vibratorios. *Revista de Innovación y Buenas Prácticas Docentes*, 8(3), 113-121.

Autor de Correspondencia: caquilar@uco.es

Resumen:

Las vibraciones en sistemas mecánicos constituyen un problema clave en Ingeniería Mecánica por lo que resulta primordial su estudio en cualquier asignatura relacionada con Ingeniería Mecánica. Las ecuaciones que describen el movimiento de las vibraciones mecánicas son de sobra conocidas. Sin embargo, su solución puede ser muy compleja en función de las suposiciones del modelo empleado y las condiciones de contorno del sistema mecánico. La comprensión del significado físico de los parámetros involucrados en las ecuaciones y su influencia relativa es importante para los estudiantes. Se propone así el desarrollo de una interfaz gráfica bilingüe (español-inglés) para una mejor comprensión de los conceptos físicos y matemáticos implicados en teoría de vibraciones. Dicha herramienta serviría para la resolución de diferentes casos de estudio en función del nivel de complejidad requerido y se podría utilizar como laboratorio virtual de cara al análisis de la influencia de las distintas variables y parámetros implicados en el movimiento. Así, se potencia el enfoque autónomo del aprendizaje y por tanto se promueven el desarrollo de habilidades personales por parte del alumnado. La herramienta fue compilada en MatLab© y se ha utilizado por primera vez en la Universidad de Córdoba en el curso académico 2017-2018.

Palabras clave: Aprendizaje autónomo, GUI, soluciones analíticas, Vibraciones mecánicas

Abstract:

Vibrations in mechanical systems is a key topic in mechanical engineering and its proper understanding is paramount for students of any course related to Mechanical Engineering. The equations of movement describing mechanical vibrations are well-known. The solutions of these equations can be very complex in terms of the assumptions of the models and the boundary conditions to which they are subjected. The understanding of the physical meaning of the parameters involved in the equations and their relative influence is important for students. This paper presents the development of a bilingual graphical interface (Spanish-English) for a better understanding of the physical and mathematical concepts related to discrete vibrations with multiple degrees of freedom in mechanical systems. The tool here developed constitutes a virtual lab for the analysis of the variables and parameters involved in the equations of movement in a step-by-step way, allowing to easily change the input parameter values so as to understand the importance of the different variables. Thus, the autonomous apprenticeship and the development of personal skills of students is enhanced and promoted. This lab was coded in MatLab© and is being used for the first time at the University of Cordoba during the academic year 2017-2018.

Key Words: Analytical approaches, Autonomous apprenticeship, GUI, mechanical vibrations.

¹ Universidad de Córdoba (España), caquilar@uco.es; <https://orcid.org/0000-0002-9418-1679>

² Universidad de Córdoba (España), mario.ruz@uco.es; <https://orcid.org/0000-0002-2356-5253>

³ Universidad de Sevilla (España), frodriguez@us.es; <https://orcid.org/0000-0001-5762-4613>

1. INTRODUCCIÓN

La teoría de vibraciones se encarga fundamentalmente del estudio del movimiento oscilatorio de los sistemas físicos. La experiencia demuestra que el comportamiento de un sistema mecánico es muy diferente cuando las fuerzas aplicadas al mismo varían con el tiempo que cuando no lo hacen, aunque el orden de magnitud de dichas fuerzas sea similar. Las vibraciones aparecen en multitud de situaciones en las máquinas y estructuras que nos rodean: ej. al viajar en coche (Figura 1), tren o avión, las que soportan los edificios durante un terremoto, etc. Asimismo, dichas máquinas y estructuras pueden crear vibraciones en el suelo originando molestias a las personas que se encuentran en las proximidades.

Las vibraciones pueden, además, causar el rápido desgaste de algunas partes de las máquinas (ej. apoyos, engranajes, rodamientos, etc.) al mismo tiempo que generan ruido. También pueden provocar que los elementos de unión presentes (ej. tornillos y tuercas) se aflojen afectando, por tanto, su funcionalidad. Por los serios efectos que las vibraciones pueden provocar en máquinas y estructuras, los sistemas mecánicos deben diseñarse verificando su comportamiento bajo vibraciones.

El amplio ámbito de aplicación del estudio de la teoría de vibraciones hace que sea necesario abordar su estudio de una forma lo más realista posible. De este modo, el ámbito de aplicación del estudio de los procesos vibratorios es muy variado, desde investigación básica y aplicada, hasta aplicaciones en numerosas disciplinas que afectan a numerosos sectores profesionales: ingeniería industrial, transportes, maquinaria agrícola, etc.

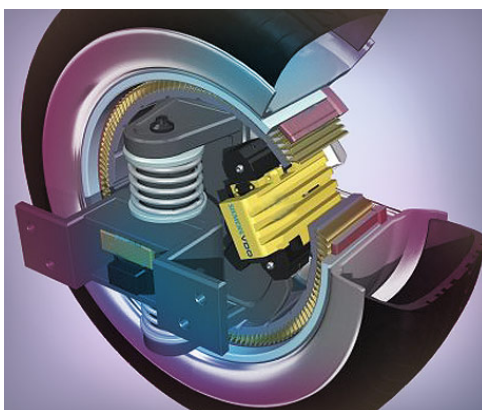


Figura 1. Sistema de suspensión de un vehículo.
Fuente: <https://www.asme.org>

Las ecuaciones para el cálculo de vibraciones en un sistema resultan de plantear las ecuaciones de Newton-Euler o la ecuación de Lagrange en un sistema discreto fijando las condiciones iniciales y de contorno del problema. Surgen así ecuaciones diferenciales ordinarias que en función de los grados de libertad considerados y de la discretización del sistema de estudio, pueden llegar a resultar complejas de solucionar de forma analítica siendo necesario recurrir a métodos computacionales que, a menudo, superan el potencial de aplicación en clases convencionales. Un planteamiento similar puede ser válido para analizar un sistema continuo como puede ser una estructura sin más que realizar un proceso previo de discretización. Entre los métodos numéricos más utilizados destacan el método de Elementos Finitos (FEM) y el método de los modos impuestos o de Rayleigh-Ritz, que trata el problema como uno de variables separadas (Meirovitch, 1986, 1997).

El mundo requiere de profesionales con las habilidades y el entusiasmo necesario en la ciencia para abordar los retos futuros por lo que los laboratorios virtuales de física y ciencia, en general, constituyen una herramienta en desarrollo durante siglo XXI (De Jong, et al., 2013). El principal problema encontrado en el aula a la hora de abordar la teoría de vibraciones es la solución analítica de las ecuaciones que definen el comportamiento de un sistema mecánico. Con los métodos matemáticos tradicionales, los estudiantes están limitados a analizar una cantidad muy reducida de casos por la complejidad de la solución de las ecuaciones diferenciales que surgen (Sastry et al., 2016). Esto dificulta la comprensión de la importancia de las distintas variables dentro de la ecuación, como son la naturaleza temporal de la excitación aplicada o los parámetros del modelo analizado (masa, rigidez y amortiguamiento).

En paralelo, el estudio de casos constituye una metodología activa de acuerdo con las implicaciones estructurales del Espacio Europeo de Educación Superior (EEES). Los casos de estudio permiten al docente diseñar actividades que generan el conocimiento en los estudiantes motivándoles a buscar información, discutir y ser autónomos en lugar de ser meros receptores pasivos del conocimiento como se hace en los sistemas de enseñanza tradicionales (Declaración de Bolonia, 1999). Por otro lado, las herramientas informáticas y las Tecnologías de la Información y de la Comunicación (TIC) juegan un papel crucial debido a sus características interactivas y la posibilidad de superar los límites de coincidencia en tiempo y espacio que presenta la modalidad didáctica tradicional (Sharpe et al. 2003; Stefanovic et al., 2009). Así la combinación de casos de estudios con herramientas TIC constituyen un método interactivo, instantáneo y flexible con una nueva interacción entre estudiantes y profesores. También se ha demostrado que el uso de instrumentos virtuales puede mejorar las habilidades matemáticas del alumnado (Minda et al., 2015).

El objetivo principal es desarrollar una herramienta docente interactiva, visual y bilingüe para el estudio por parte del alumnado de procesos vibratorios en sistemas discretos de creciente complejidad. Aplicaciones similares se han desarrollado recientemente con resultados muy satisfactorios para el alumnado en otros ámbitos de la Ingeniería como el estudio de sismos (Guerrero, Gómez, & Thomson, 2018). Los objetivos específicos de esta propuesta son:

- Diseñar una serie de casos prácticos en el ámbito de especialización de la materia, con fases evolutivas a medida que el cuatrimestre progresa, común a todas las materias involucradas, que permita que el alumno se enfrente a un problema desde un modelo inicial simplificado hasta modelos complejos más próximos a condiciones “reales”, es decir, similares a las extraacadémicas. Con esto, se persigue potenciar su capacidad de autonomía y de toma de decisiones en función del caso de estudio.
- Generar una herramienta docente para el aprendizaje que permita solucionar los casos prácticos de manera interactiva.

2. DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA DE INNOVACIÓN

2.1 Programación de las soluciones a las ecuaciones del movimiento (base teórica de la herramienta)

El desarrollo de la herramienta propuesta requiere en primer lugar por parte del profesor una implicación absoluta en el desarrollo de esta, ya que es el que mejor conocimiento

tiene sobre los objetivos que se pretenden alcanzar. Como se dijo en la introducción, las ecuaciones del movimiento del sistema se obtienen aplicando las ecuaciones de Newton-Euler o la formulación de Lagrange (Meirovitch, 1986, 1997; Gingsberg, 2001) obteniéndose, en general, un sistema acoplado de ecuaciones diferenciales ordinarias del siguiente tipo:

$$[M]\ddot{\mathbf{q}} + [C]\dot{\mathbf{q}} + [K]\mathbf{q} = \mathbf{f}(t),$$

$$\mathbf{q}(0) = \mathbf{q}_0, \quad \dot{\mathbf{q}}(0) = \dot{\mathbf{q}}_0,$$

donde $[M]$, $[C]$, $[K]$ son las matrices de inercia, amortiguación y rigidez del sistema mecánico, respectivamente, $\mathbf{f}(t)$ es la excitación externa y $\mathbf{q}(t)$ el desplazamiento temporal. El problema de valores iniciales se completa imponiendo condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad en el instante inicial.

De las ecuaciones planteadas se derivaron las soluciones completas de las mismas mediante su programación en MatLab© (Blanco-Rodríguez, Ruz-Ruiz, & Aguilar, 2017; Hatch, 2000), generándose así la evolución temporal del sistema mecánico para los parámetros del modelo y las condiciones iniciales y forzamientos establecidos por el usuario (Figura 2).

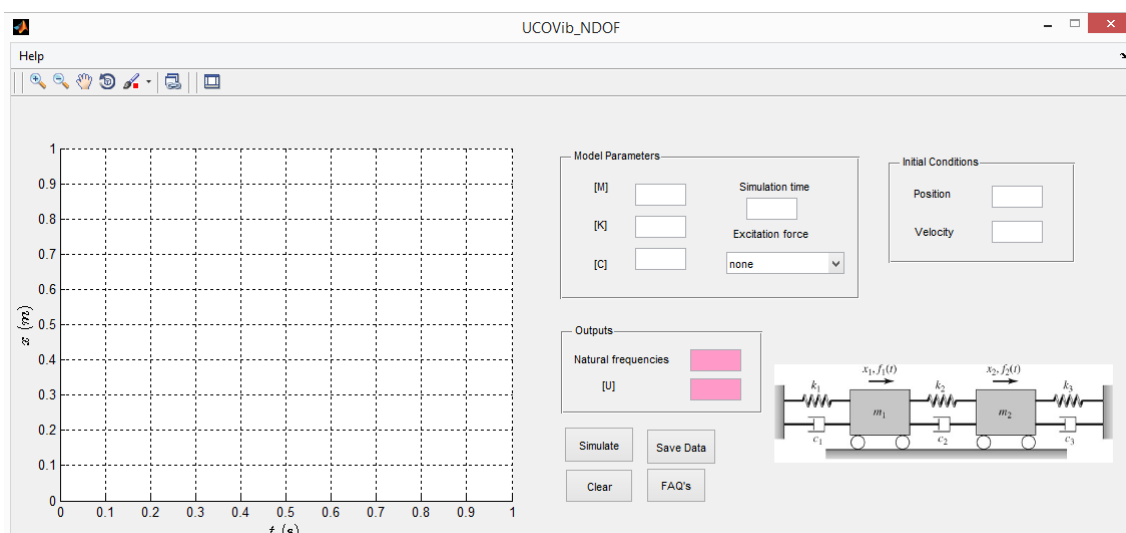


Figura 2. Estructura de la GUI.
Fuente: elaboración propia

A continuación, se implementaron los métodos más utilizados para la solución de vibraciones tanto libres como forzadas de sistemas discretos de varios grados de libertad. Así, si la matriz de amortiguamiento $[C]$ es proporcional a la de rigidez y/o a la de masas ($[C]=\alpha[M]+\beta[K]$), aproximaciones analíticas a través de análisis modal permiten la generación de la respuesta del sistema. Por el contrario, si la matriz de amortiguamiento no es proporcional a ninguna de las anteriores se implementaron métodos computacionales para determinar el movimiento del sistema. En este último caso, se aplicó la función `ode45` implementada en MatLab©.

Además de la codificación matemática, los profesores recopilaron la base teórica tras cada método en un documento. Este documento aparece en el botón FAQ's fácilmente accesible desde la interfaz gráfica como muestra la figura 2. En este documento aparecen además los parámetros necesarios en cada caso con la explicación del significado de cada uno de ellos, valores típicos de los mismos, restricciones de aplicación, etc.

2.2 Codificación de la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)

La herramienta se codificó en MatLab© y se compiló en dos versiones, una para sistemas con un compilador de MatLab© y otra para aquellos sin compilador instalado. El usuario final se descarga un fichero comprimido sencillo (.zip) que le permite instalar un ejecutable de windows (.exe) el cual se presenta como la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) mostrada en la Figura 2. De esta manera, los estudiantes no necesitan tener experiencia en programación para utilizar la herramienta.

2.3 Casos de estudio

A medida que progresó la codificación de la herramienta, los profesores plantearon diferentes casos de estudio para ser posteriormente resueltos por parte de los alumnos con apoyo de la herramienta generada. Los diferentes casos planteados van creciendo en complejidad y eliminando hipótesis de partida de cara a caracterizar los procesos de la forma más realista posible. Así, los alumnos pueden observar el grado de error que se comete al suponer diferentes hipótesis de partida (ej. despreciar el amortiguamiento, reducir número de grados de libertad, etc.).

2.4 Competencias desarrolladas

Con el desarrollo de esta herramienta para la solución de los distintos casos de estudio se pretende que el alumnado desarrolle las siguientes competencias necesarias en el estudio de sistemas mecánicos:

- Adquisición de conocimientos adecuados de aspectos científicos y tecnológicos sobre métodos matemáticos, analíticos y numéricos utilizados en la ingeniería mecánica.
- Que los estudiantes sepan aplicar sus conocimientos a su trabajo o vocación de una forma profesional y posean las competencias necesarias que suelen demostrarse por medio de la elaboración y defensa de argumentos y la resolución de problemas en el campo de la ingeniería mecánica.
- Que los estudiantes desarrollen las habilidades de aprendizaje necesarias para emprender estudios posteriores con un alto grado de autonomía.
- Conocer y perfeccionar el nivel de usuario en el ámbito de las TIC.
- Que los estudiantes sepan comunicar sus conclusiones y conocimientos de forma razonada, tanto al público especializado como no especializado, de un modo claro y sin ambigüedades.

2.5 Actuaciones del alumnado

El uso de la interfaz gráfica permite a los alumnos disponer de un laboratorio virtual para una mejor comprensión de la teoría de vibraciones aplicada a mecanismos. Además, el planteamiento de diferentes situaciones con la herramienta posibilita su uso con un sistema real en laboratorio. De este modo, la herramienta acerca al alumnado al ámbito científico y permite recrear experimentos reales. Y en concreto, con el uso de esta herramienta se espera que el alumnado:

- Aplique los conocimientos teóricos a la práctica.
- Analice y sintetice los resultados mediante la gestión de la información obtenida.
- Resuelva problemas mediante distintos casos de estudio de creciente complejidad.

▪ Tome decisiones mediante el manejo de información a través de la herramienta informática en cuanto a las variables implicadas en cada caso (ej. excitaciones), parámetros con influencia en los procesos dominantes (rigidez, amortiguamiento, masa, etc.).

3. RESULTADOS

Los resultados de este trabajo se han plasmado en una GUI interactiva que permite la simulación de sistemas de vibraciones de varios grados de libertad (N-DOF systems), y completa a una versión previa desarrollada exclusivamente para sistemas de un grado de libertad (Blanco-Rodríguez, Ruz-Ruiz, & Aguilar, 2017).

La GUI permite la generación de gráficas que muestran la evolución temporal de las coordenadas generalizadas consideradas en el modelado del sistema. Además, se muestra información relacionada con las frecuencias naturales y las matrices modales. A modo de ejemplo, la Figura 3 muestra la evolución temporal de un sistema de 3 grados de libertad. Las gráficas y tablas generadas con la herramienta pueden exportarse para su estudio con programas de tratamiento y análisis de datos. El archivo ejecutable de la GUI es gratuito para cualquier profesor o alumno interesado y estará disponible a través de web o mediante petición expresa a los autores (actualmente los alumnos disponen de acceso al mismo mediante la plataforma Moodle).

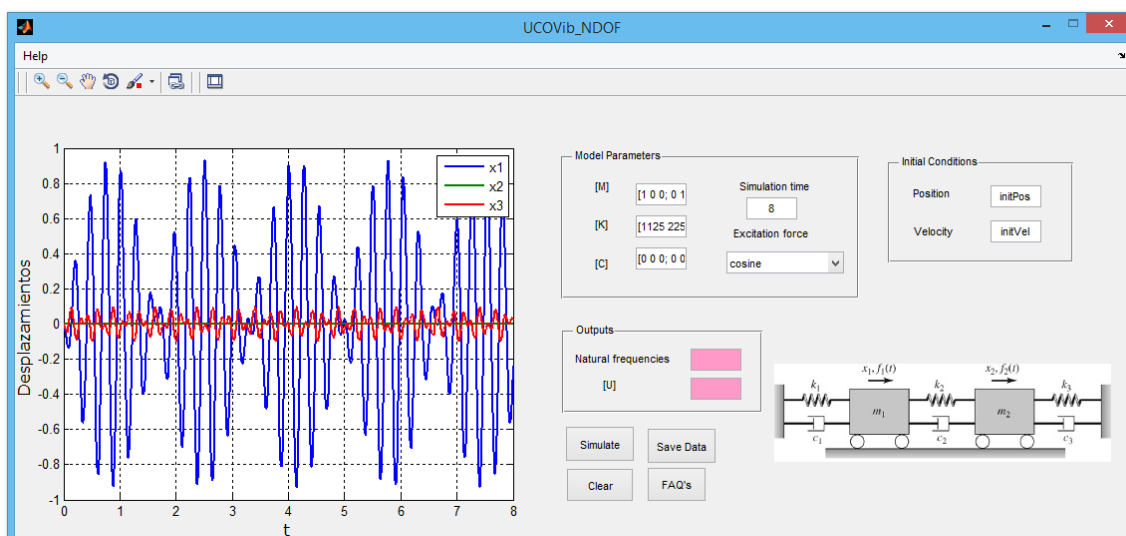


Figura 3. Ejemplo de simulación de un sistema de 3 grados de libertad sometido a una excitación armónica.

Fuente: elaboración propia

3.1. Evaluación de la aplicación

La aplicación desarrollada se utilizó por primera vez en el año académico 2017-2018 en aquellos problemas donde era necesario plantear un análisis de vibraciones. En concreto, se utilizó en las asignaturas de Máquinas y Mecanismos (común a los Grados de electricidad, electrónica y mecánica) y Mecánica Aplicada (en el Grado de Mecánica). Con el propósito de evaluar el grado de satisfacción de los estudiantes se diseñó un pequeño cuestionario consistente en las cinco preguntas mostradas en la Tabla 1, mediante las cuales los estudiantes evaluaron la herramienta asignando como respuesta un número dentro de una escala del 1 (no estoy de acuerdo) al 5 (estoy totalmente de acuerdo). Los primeros cuestionarios se realizaron a través de la plataforma Moodle en el curso 2018-2019, obteniéndose un total de 18.

Aunque los resultados de los cuestionarios tendrán que evaluarse a lo largo de diferentes años académicos para obtener conclusiones significativas y consistentes, los primeros análisis mostraron que en la mayoría de los casos la respuesta por parte del alumnado ha sido bastante positiva ya que se obtuvo un 89% de respuestas en las categorías 4 y 5 para todas las preguntas (Figura 4). Los estudiantes pudieron manejar la aplicación de forma independiente y sencilla. Los aspectos más destacados por los alumnos han sido por un lado la utilidad de la aplicación para comprobar los efectos en la respuesta del modelo ante la modificación de los diferentes parámetros de los que consta (modificación de las constantes de viscosas de amortiguación, masas, constantes elásticas, condiciones iniciales, etc.), y por otro el nivel de interactividad de la herramienta en sí.

Tabla 1.
Cuestionarios para evaluar el grado de satisfacción del alumnado.

Pregunta	Respuesta: de 1 (no estoy de acuerdo) a 5 (estoy muy de acuerdo)
1. ¿Te ha ayudado la herramienta a comprender mejor los conceptos básicos de las vibraciones mecánicas?	
2. ¿Las ideas y conceptos explicados con la herramienta se presentaron de forma clara y fácil de comprender?	
3. ¿Consideras el nivel de interactividad de la aplicación adecuado?	
4. ¿Crees que en general el uso de la aplicación es fácil e intuitivo?	
5. ¿Opinas que la aplicación es un buen complemento para las clases teóricas?	

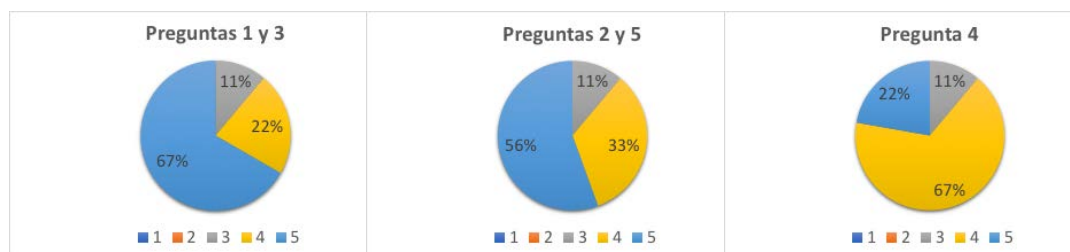


Figura 4. Resultados de los cuestionarios relativos al grado de satisfacción del alumnado.
Fuente: elaboración propia

3.2. Difusión de la aplicación

Parte de la aplicación desarrollada ya se ha presentado en un congreso internacional de docencia (Blanco-Rodríguez, Ruz-Ruiz, & Aguilar, 2017). No obstante, se prevén diferentes actividades de difusión una vez que la aplicación haya sido completamente evaluada con el alumnado. Entre ellas, se publicará un ejecutable de la aplicación accesible mediante web y se pretende también su presentación a través de nuevos

congresos, resaltando su uso en el ámbito docente y las nuevas características que se han ido incorporando.

4. CONCLUSIONES

El resultado de este trabajo es una interfaz gráfica interactiva que permite la simulación de sistemas de vibraciones de varios grados de libertad. En concreto, la herramienta genera la evolución temporal de las coordenadas generalizadas consideradas en el modelado del sistema, así como las frecuencias naturales y las matrices modales, todo ello en formato exportable para su estudio con otros programas de tratamiento y análisis de datos.

El desarrollo de esta herramienta interactiva y visual persigue el desarrollo y perfeccionamiento de habilidades para el estudio de casos prácticos relacionados con la teoría de vibraciones, en asignaturas en las que se analizan sistemas mecánicos de modo que los alumnos clarifiquen los conceptos teóricos y visualicen procesos que en la práctica la única forma de visualizarlo sería en laboratorio siempre bajo condiciones controladas.

Tras realizar una serie de encuestas relativas al nivel de satisfacción del alumnado se obtuvo en la mayoría de los casos, en concreto en el 89% de las respuestas) una respuesta bastante positiva (categorías 4 y 5 sobre 5) puesto que destacaron el fácil manejo de la aplicación de forma independiente y sencilla, así como la utilidad de la aplicación para comprobar los efectos en la respuesta del modelo ante la modificación de los diferentes parámetros de los que consta (amortiguación, masa, rigidez, etc.). No obstante, es necesario completar con los resultados de los cuestionarios en los años sucesivos para que se puedan obtener conclusiones significativas estadísticamente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Córdoba el soporte proporcionado para el desarrollo de la aplicación, en concreto mediante la concesión del proyecto de innovación docente con referencia 2017-1-5007.

REFERENCIAS

- Blanco-Rodríguez, F.J., Ruz-Ruiz, M.L. & Aguilar, C. (2017). UCOVib_1DOF: Laboratorio de Análisis Computacional de sistemas mecánicos discretos vibratorios. *5th International Conference on Educational Innovation in Technical Careers INDOTEC 2017*.
- Declaración de Bolonia. (1999). *The Bologna Declaration on the European space for higher education: an explanation*. Recuperado de: https://cplol.eu/images/Bologna_declaration_en.pdf.
- De Jong, T., Linn, Marcia C. & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and virtual laboratories in Science and Engineering Education. *Science*, 350 (6130), 305-308. Doi:10.1126/science.1230579
- Guerrero, L.F., Gómez Pizano, D. & Thomson, P. C. (2018). Development of a virtual earthquake engineering lab and its impact on education. *DYNA*, 85 (204), 9-17. Doi:10.15446/dyna.v85n204.66957
- Ginsberg, J.H. (2001). *Mechanical and structural vibrations: theory and applications*. Wiley.
- Hatch, M.R. (2000). *Vibration simulation using MATLAB and ANSYS*. Chapman and Hall/CRC.
- Meirovitch, L. (1986). *Elements of vibration analysis*. McGraw Hill.

- Meirovitch, L. (1997). *Principles and techniques of vibration*. Prentice Hall.
- Minda, Andrea Amalia, Gillich, Nicoleta, Chioncel, Cristian Paul y IosifPraisach, Zeno (2015). Enhancing Mathematical Skills By The Use Of Virtual Instruments, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 191, 996-1001. Doi:10.1016/j.sbspro.2015.04.451.
- Sastry, V.L.N., Rao, K. Srinivasa, Rao, Nekkanti Venkata, Clee, Paul y Kumari, G. Reena. (2016). Effective and active learning in classroom teaching through various methods. IEEE 4th International Conference on MOOCs, Innovation and Technology in Education, 105-110. DOI:10.1109/MITE.2016.29
- Sharpe, L., Hu, C., Crawford, L., Gopinathan, S., Khine, M.S., Moo, S.N. y Wong, A. (2003). Enhancing multipoint desktop video conferencing (MDVC) with lesson video clips: recent developments in pre-service teaching practice in Singapore. *Teaching and Teacher Education*, 19, 529-541. Doi: 10.1016/S0742-051X(03)00050-7.
- Stefanovic, M., Matijevic, M. & Cvijetkovic, V. (2009). Web-Based Laboratories for Distance Learning. *International Journal of Engineering Education*, 25, 1005-1012. Doi: 0949-149X/91.