

# Prototipo didáctico para la enseñanza de vibraciones mecánicas mediante el diseño de un banco de pruebas de desequilibrio y velocidad crítica

*Didactic prototype for the teaching of mechanical vibrations through the design of a test bench for the imbalance and critical velocity*

Piero Espino-Román<sup>1</sup>, Yasser-Alberto Davizón-Castillo<sup>2</sup>, Juana-Eugenia Olaguez-Torres<sup>3</sup>, Alejandro Lizárraga-Lizárraga<sup>1</sup>, Israel Benítez-García<sup>1</sup>, José-Víctor Núñez-Nalda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Sinaloa (México)

<sup>2</sup> Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (México)

<sup>3</sup> Universidad Politécnica del Valle del Évora (México)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8101>

Una vibración mecánica está definida como la oscilación de un sistema alrededor de un punto de equilibrio. Desde la perspectiva de vibraciones mecánicas, en una máquina éstas pueden causar las siguientes fallas: desgastes, fisuras por fatiga, pérdida de efectividad en sellos mecánicos, rotura de aislantes, ruido, etc. Esto debido a que las máquinas contienen elementos rotatorios que desempeñan tareas (como la transmisión de potencia) y funcionan a distintas velocidades, como los motores y los ejes de transmisión [1]. En su mayoría los problemas de vibración no se pueden evitar, por esta razón es necesario implementar sistemas de detección y localización de fallas orientados a vibraciones mecánicas en elementos rotatorios. En el área de ingeniería se debe determinar el estado físico de la maquinaria, por tanto en la formación de ingenieros en mecatrónica se requiere contar con herramientas cuantitativas tales como el análisis de vibraciones mecánicas. En términos populares, se ha dicho que las máquinas "hablan" y que a través de sus sonidos y vibraciones, se puede escuchar a sus componentes y diagnosticar sus fallas [2]. Cada falla se puede distinguir por un patrón de vibración. Para determinar estos patrones es necesario el contar con un proceso de monitoreo de la condición basada en vibraciones, es decir, los componentes de la máquina son periódicamente analizados con el objetivo de determinar si se encuentran en un estado de falla o de

salud [3]. Además, las vibraciones mecánicas provocan una baja en la productividad y la eficiencia de las máquinas [4].

La prevención de posibles fallas en maquinaria es necesaria para alcanzar niveles de operación confiables y con seguridad en su instalación. Para determinar, el riesgo de fallas y el tiempo en que una máquina queda fuera de servicio es necesario contar con un proceso de monitoreo de la condición mecánica basado en vibraciones, es decir, los componentes de la máquina son periódicamente analizados con el objetivo de determinar si se encuentran en un estado de falla o de salud [5]. Por otra parte, cerca del 90% de las fallas en maquinarias están precedidas por un cambio en las vibraciones de las mismas. El objetivo de este artículo es presentar una propuesta didáctica con la premisa de promover y reforzar la habilidad de los estudiantes en la solución de problemas a través de actividades expe-

rimentales. El desarrollo de actividades experimentales por medio de prototipos didácticos le permite a cada estudiante poner en práctica los contenidos teóricos vistos en clase además de propiciar el aprendizaje en forma significativa [6]. En el estudio [7], se expone la premisa de que los estudiantes, al combinar la parte experimental con la teórica, durante sus estudios, logran a mejorar la visualización y la comprensión de conceptos teóricos. La elaboración de un prototipo tiene la finalidad de fomentar el aprendizaje significativo en la formación integral de los estudiantes al combinar la práctica en las diversas actividades [8]. Es importante el empleo de prácticas pedagógicas que aprovechen la creatividad de los estudiantes, la utilización de material didáctico permite la interacción del estudiante con los principios involucrados y sus respectivas aplicaciones [9]. Así mismo, el trabajo de laboratorio se puede considerar una actividad cognitiva compleja ya que la solución de una situación problemática experimental implica la utilización de una variedad de conceptos y modelos [10]. En base a lo anterior, el presente trabajo consiste en diseñar un eje rotor para prácticas experimentales en el campo de vibraciones mecánicas. El estudio toma en cuenta las variables de diseño y el montaje del banco de pruebas para realizar ensayos de velocidad crítica y desequilibrio además del procedimiento para realizar prácticas de laboratorio.

## 2. ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO

### 2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES

El banco de prueba para ensayos de velocidad crítica y desequilibrio se mues-

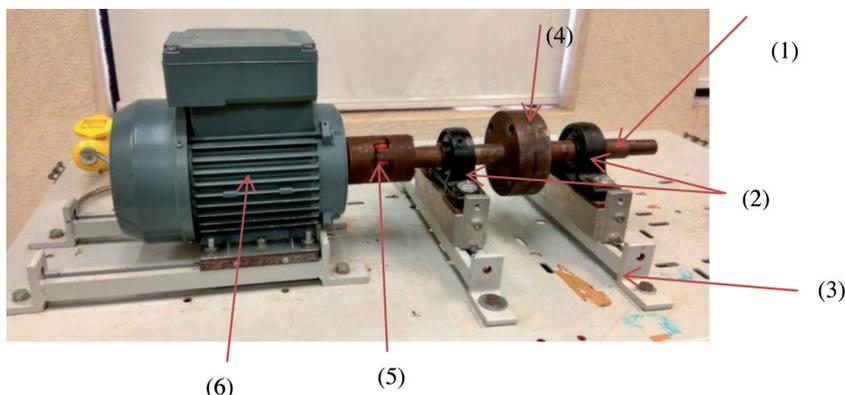


Fig. 1: Componentes del banco de prueba

tra en la Fig. 1. Está integrado por: un (1) eje de acero ASTM 1045 estirado en frío de un diámetro de 15.8 mm, una longitud de 320 mm y una masa de 0.84 kg, soportado en sus extremos de dos chumaceras (2), los cuales se encuentran montados sobre la base de la estructura (3). Fijado al eje se encuentra el (4) volante, el cual tiene una masa de 2.24 kg. El eje es impulsado mediante un (5) acoplamiento directo por un (6) motor de 1/4 hp (186 watts) marca SIEMENS con una velocidad de giro máxima de 1750 rpm montado sobre la base de la estructura. Próximo a las chumaceras, se instrumentará el sistema de medición el cual consiste en la utilización de acelerómetros, el que se usará para medir la aceleración registrada sobre la estructura, este dispositivo estará conectado al sistema de adquisición de datos: el cual consiste en una tarjeta electrónica marca Arduino, dicho dispositivo procesa los datos registrados por el acelerómetro, además de permitir visualidad por medio de una computadora el comportamiento del eje.

## 2.2. MEDICIÓN DE LAS VIBRACIONES

Las vibraciones más importantes desde el punto de vista de las aplicaciones en ingeniería son las vibraciones forzadas. Estas vibraciones ocurren cuando en un sistema mecánico o estructura experimenta una fuerza externa inicial o una fuerza centrífuga producida por la rotación de alguna parte no equilibrada del sistema mecánico. La respuesta de un sistema no amortiguado sometido a una fuerza armónica, se muestra en la Ecuación 1 [11].

$$M\ddot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (1)$$

La solución homogénea de esta ecuación está dada por

$$x_h(t) = C_1 \cos \omega_n t + C_2 \text{sen } \omega_n t \quad (2)$$

Donde  $\omega_n = (k/m)^{1/2}$  es la frecuencia natural del sistema. Como la fuerza de excitación  $F(t)$  es armónica, la solución particular  $x_p(t)$  también es armónica, y tiene la misma frecuencia  $\omega$ . Por lo tanto se supone una solución en la forma.

$$x_p(t) = A \cos \omega t \quad (3)$$

Donde  $A$  es una constante que indica la amplitud máxima de  $x_p(t)$ . Sustituyendo la ecuación (3) en la Ecuación (1) y resolviendo  $A$ , se obtiene.

$$A = \frac{F_0}{K - M\omega^2} \quad (4)$$

Cuando el eje es sometido a cargas radiales, es deformado, es decir los centros de sus secciones transversales dejan de estar alineados, por lo que el eje sobre el cual está montado el volante desplaza el centro de gravedad  $G$ , a una distancia  $e$  (excentricidad) respecto del centro geométrico de la sección transversal. Si el eje gira a una ve-

manera sencilla, las formas de oscilación y velocidad crítica de ejes rotativos. Con ello se permitirá consolidar y perfeccionar los conocimientos sobre la materia de vibraciones mecánicas que se han adquirido en clase. Además, el estudiante desarrollará las siguientes competencias específicas: aplicar métodos para la determina-

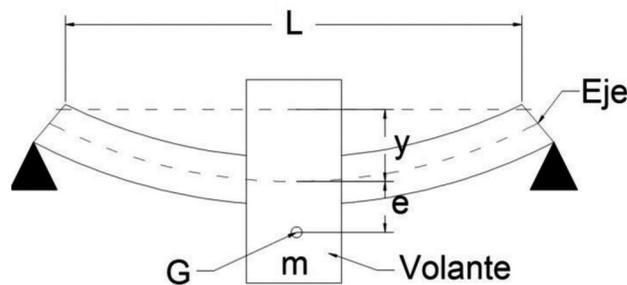


Fig. 2: Deformación del eje a causa el volante (elaboración propia)

locidad angular constante  $\omega$ , se producida una fuerza centrífuga que será igual a la fuerza  $F_o = m\omega^2(y+e)$ , ver Fig. 2.

Se calcula la velocidad crítica del eje rotatorio, para obtener la frecuencia. La velocidad crítica de un elemento rotante, es aquella velocidad de rotación que produce una frecuencia de excitación igual a la frecuencia natural de vibración del componente o de su sistema asociado [12]. La velocidad crítica es igual al concepto de resonancia en máquinas rotativas cuando la frecuencia de giro es igual a la frecuencia natural del sistema. Para obtener la velocidad crítica, se utiliza la ecuación (6). Se considera el caso de una viga simplemente apoyada en los extremos y la masa concentrada en el centro como se muestra en la Fig. 2, donde la constante de rigidez del sistema está dada por  $k=48EI/L^3$ , por lo tanto la velocidad crítica es:

$$Nc = \frac{\sqrt{(48EI)/ML^3}}{2\pi} \quad (6)$$

De donde (Nc) es la velocidad crítica en rpm, (E) módulo de elasticidad, (I) momento de inercia, (L) longitud del eje, (M) masa del volante.

## 2.3. PROPUESTA METODOLÓGICA

Una vez disponible el prototipo se procede a diseñar la metodología necesaria para su utilización en el laboratorio, teniendo en cuenta la metodología propuesta y las didácticas aplicadas para optimizar la comprensión del concepto científico por parte del estudiante. El prototipo desarrollado permite a los estudiantes llevar a cabo investigaciones prácticas, con el objeto de poder determinar y analizar de

la frecuencia natural, determinar el desequilibrio rotatorio, identificar los diferentes parámetros que generan vibraciones en sistemas mecánicos, así como también desarrollará las competencias genéricas: capacidad de llevar los conocimientos a la práctica y conocimientos básicos de la profesión.

El resultado de aprendizaje al utilizar el banco de pruebas por parte del estudiante será el monitorear los diferentes parámetros que generan vibraciones en sistemas mecánicos, analizar y controlar vibraciones mediante la integración de tecnología computacional, electrónica, mecánica y de control, así como la utilización de instrumentos para la medición de las vibraciones.

Las actividades a desarrollar en la práctica consisten en que los estudiantes investiguen sobre balanceo de rotores y elementos rotativos. Por su parte el docente planea una situación problemática a resolver en el banco de pruebas. Acto seguido los estudiantes resuelven problemas designados por la unidad de aprendizaje y llevan a cabo la práctica de laboratorio correspondiente al tema. Al final, el docente conduce una discusión sobre las opiniones de los estudiantes. Por último, los estudiantes organizan equipos de trabajo y llevan a cabo la práctica de "Determinar la velocidad crítica" El objetivo de esta práctica es determinar teórica y experimentalmente las velocidades crítica o de resonancia de un sistema rotatorio formado por un eje y un volante. Debido a que el movimiento rotativo en maquinarias es muy común, y todo sistema en rotación contiene masa y elasticidad tendrá una o varias frecuencias naturales, por lo tanto existe la posibilidad que en un

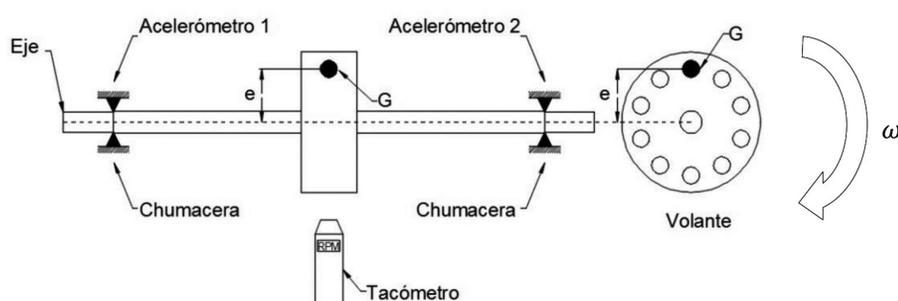


Fig. 3: Banco de pruebas (elaboración propia)

momento dado la velocidad de operación coincida con alguna de estas frecuencias y se presente la velocidad crítica.

El procedimiento de prueba consiste en colocar un disco de masa sobre un rotor que gira sobre dos apoyos, con velocidad constante como se muestra en la Fig. 3, considere que el centro de gravedad del disco, se encuentra a una distancia (excentricidad) del centro del eje. (1) Realizar el montaje, colocando los acelerómetros en los soportes de las chumaceras y colocar la cinta refractiva en el rotor para obtener la velocidad de rotación por medio de un tacómetro laser. (2) Para conocer el efecto de la resonancia, hacer girar el motor despacio para toda la gama de revoluciones, esto se logra colocando el control de velocidad a través de un variador de frecuencias conectado al motor. Para ello ajustar el variador de frecuencia y acelerar lentamente el rotor hasta llegar a la resonancia, anotar el número de revoluciones, volver a reducir la velocidad de giro ajustar la velocidad de giro con el variador de frecuencias. Llevar a cabo las anotaciones de velocidad de giro y aceleraciones. (3) Repetir el procedimiento cambiando la distancia entre chumaceras.

Se recomienda anotar los datos obtenidos en la siguiente Tabla 1.

Una de las causas más comunes de vibración en maquinaria es el desequilibrio de sistemas rotatorios, esta condición se

da cuando el centro de gravedad del sistema no coincide con el eje de rotación. Para esta segunda práctica se efectuará el balanceo dinámico de un rotor plano. El montaje experimental será el mismo que se muestra en la Fig. 3, el procedimiento experimental es el siguiente: (1) Medir la amplitud de aceleración del rotor, junto con su retaso de la referencia de fase. (2) Colocar un contrapeso de prueba en el volante y medir la amplitud de aceleración y fase. (3) Calcular la posición y magnitud del contrapeso de corrección. (4) Por último colocar el contrapeso de corrección y medir la aceleración residual. A continuación se recomienda a anotar los datos en la siguiente Tabla 2.

Finalmente, debe realizarse una evaluación de las evidencias, por lo tanto el estudiante elabora un reporte escrito de las actividades realizadas en las prácticas donde se indican las velocidades críticas y desequilibrio encontradas tanto analítica como experimentalmente.

### 3. RESULTADOS

Al considerar los diferentes criterios de las partes interesadas, en el caso de los estudiantes mediante una encuesta se logra validar los distintos requisitos que debe cumplir el prototipo, así como los alcances del mismo. Las afirmaciones planteadas en la encuesta se agrupan en dos categorías.

La primera consiste en evaluar las características y tipos de prácticas a realizar en el prototipo que corresponde de la pregunta 1 a la 4. La segunda categoría consiste en la evaluación diagnóstica en los conocimientos adquiridos en los estudiantes al realizar la práctica de la pregunta 5 a la 8. En el estudio participaron 72 estudiantes distribuidos en 3 grupos, de la asignatura de Vibraciones Mecánicas de la carrera de Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Politécnica de Sinaloa, México. En este estudio se describen los datos obtenidos en el análisis descriptivo consistente en el empleo de medidas de tendencia central y de frecuencias para clasificar los datos acerca del tema de trabajo y determinar el alcance de los objetivos planteados al inicio de este proceso. A continuación se presentan los resultados para las ocho preguntas propuestas:

En la pregunta 1 se menciona: De los siguientes problemas que generan las vibraciones, ¿cuáles ha escuchado?, se encontró que los estudiantes relacionan el término "Desequilibrio" con un (81.7%) como principal problema, este tipo de problema es muy común en máquinas y dispositivos. Esto debido a que muchos de sus componentes son rotativos. Las respuestas con menor frecuencia, los estudiantes consideraron a los términos, "Desalineación" (8.5%), "Falta de lubricación" (4.2%), "Excentricidad" (2.8%), "Daño por rodamiento" (2.8%) como las causas principales, las cuales también son consideradas causas de vibraciones en las máquinas y dispositivos. Considerando todas las respuestas esto indica que 100% de los estudiantes tienen conocimiento de las principales causas de vibraciones.

Con respecto a la pregunta 2: ¿En cuales asignaturas cree necesaria la utilización del banco de pruebas para vibraciones mecánicas? Al realizar el análisis se encontró lo siguiente. La respuesta "Vibraciones mecánicas" presentó la mayor frecuencia con el (80.3%), lo que indica la necesidad del banco de vibraciones. El resto de las respuestas "Ingeniería de mantenimiento" (9.9%), "Análisis de mecanismos" (4.2%), "Diseño mecánico" (5.6%), abre la posibilidad de también ser utilizado en otras materias impartidas en la carrera de ingeniería mecatrónica. La pregunta 3, señala las características que deberá tener el banco de pruebas de vibraciones. El (55.6%) de los estudiantes consideran como principal característica "Pruebas industriales", ya que los estudiantes esperan encontrar este tipo de problemas en la industria, y el (44.4%) consideran que sea utilizado para "Pruebas didácticas" con características tales que sea

Distancia en entre chumaceras (mm)	Velocidad de giro (1) (rpm)	Velocidad de giro (2) (rpm)	Velocidad crítica medida (rpm)	Velocidad crítica teórica (rpm)

Tabla 1: Registro de datos experimentales de velocidad crítica

Vibración del sistema	Aceleración (m/s <sup>2</sup> )	Fase (°)	Masa de contrapeso (gramos)	Posición angular del contrapeso	Velocidad del giro (rpm)
Sin contrapeso					
Con contrapeso					
Con peso de corrección					

Tabla 2: Registro de datos experimentales de desequilibrio

útil para complementar la parte académica.

A los encuestados se les solicitó que indicaran qué tipo de prueba debe cumplir el banco de vibraciones mecánicas. La respuesta principal fue "Pruebas de desequilibrio" con el (54.2%), seguida por "Pruebas de velocidad crítica", con el (19.4%), lo que refuerza la necesidad de contar con este tipo de prototipo didáctico, el (16.7%) de los estudiantes consideraron "pruebas de alineación", "Pruebas de excentricidad" con el (2.8%) y "Pruebas en rodamientos y ejes" el (6.9%). Cabe señalar que el objetivo de este estudio es para pruebas de desequilibrio y velocidades críticas, las cuales fueron las respuestas con mayor frecuencia, por lo que el prototipo se hubiera podido haber adaptado para realizar todas las pruebas que se señalan.

La segunda categoría de pregunta consiste en la evaluación diagnóstica, por lo que se les solicitó, que indicaran cuáles son las fuentes más comunes de excitación armónica en el desequilibrio de una máquina rotatoria. Los estudiantes manifestaron que consideran a la "Fuerzas producidas por maquinas reciprocante" con el (44.4%) como la principal fuente de excitación armónica en el desequilibrio, seguida por "Movimiento de la máquina misma" (29.2%) y "Falta de simetría en las partes rotativas de las máquinas" (13.9%). Las respuestas con menor frecuencia fueron "Variaciones en el tamaño de tornillos, tuercas, y otros sujetadores" (8.3%) y por último "Variaciones en la estructura química y cristalina del material, causadas por el vaciado o tratamiento térmico" con el (4.2%). Cada una de las respuestas dadas puede ser indeseable para equipos cuya operación puede ser perturbada o, para la seguridad de la máquina.

El desequilibrio en las máquinas es una de las causas más comunes de la vibración, por lo que se les cuestionó a los estudiantes que señalaran dichas causas. Cada una de las respuestas dadas son problemas causados por el desequilibrio, los encuestados consideraron de mayor a menor: "Excesivo desgaste en los puntos de apoyo o chumaceras" (41.7%), "Fallas por fatiga en elementos de la estructura en vibración" (30.6%), "Desajuste de tornillos, tuercas" (20.8%), y por último "Ruidos adicionales en la operación de equipos" (6.9%).

Es posible que el desequilibrio de un rotor se encuentre en varios planos, por lo que se les preguntó a los estudiantes que señalaran los tipos de desbalance que ocurren en un rotor. Los estudiantes lograron identificar que el desbalance de un rotor ocurre cuando las masas no balanceadas aparecen en más de un plano:

"Balanceo dinámico" (58.3%) y cuando solo yacen en un plano singular "Balanceo estático" (22.2%). Finalmente el (19.4%) no logró identificar los tipos de desbalance de un rotor.

Se les cuestionó a los estudiantes acerca de la velocidad de rotación que produce una frecuencia de excitación igual a la frecuencia natural de vibración del componente o de su sistema asociado. La respuesta con mayor frecuencia fue "Resonancia" (61.1%), seguida por "Velocidad crítica" (30.6%) y "Frecuencia natural" (8.3%). Términos que suelen confundir ya que la velocidad crítica produce una resonancia y para propósitos prácticos los términos de frecuencia natural, resonancia y velocidad crítica son sinónimos.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación, se diseñó un banco para pruebas de vibraciones, realizando el análisis de fatiga. El banco de prueba tiene el propósito de realizar prácticas de desbalance y velocidades críticas además de proporcionar el procedimiento de prueba para la realización de prácticas de laboratorio.

De los resultados mostrados en su análisis, se obtienen las siguientes conclusiones: (1) el prototipo didáctico permite al estudiante adquirir conocimientos y habilidades para monitorear, analizar y controlar vibraciones en máquinas, a modo de mejorar su desempeño y vida útil, así como proporcionar las bases para el diseño de elementos mecatrónicos implementados en la automatización de servicios y procesos industriales, (2) las actividades prácticas permiten al estudiante desarrollar habilidades para el análisis, resolución de problemas, trabajo colaborativo y redacción de reportes, (3) le permite al estudiante el manejo de datos y su interpretación en la forma en que operan la máquinas cuando se encuentran sometidas a desbalance y velocidad críticas, (4) el desarrollo de actividades experimentales por medio de prototipos permite que cada estudiante realice actividades de planteamiento y acotación del problema, emisión de hipótesis, diseño experimental y realización del experimento con el prototipo, análisis de los resultados y conclusiones, (5) el conocimiento adquirido por el estudiante en el área de vibraciones mecánicas genera una base sólida que le permitirá desarrollarse en el mercado laboral, (6) además este estudio proporciona una guía al docente para temas de vibraciones mecánicas aplicadas.

#### PARA SABER MÁS

- [1] Tapia JC, Silva-Lomeli JJ, Fonseca-Ruiz L, et al. "Design of a mechatronic system for fault detection in a rotor under misalignment and unbalance". IEEE Latin America Transactions. Vol. 13-6, p. 1889-1906. (Doi: 10.1109/tla.2015.7164215).
- [2] Kumaraswamy S, Rakesh J. Standardization of absolute vibration level and damage factors for machinery health monitoring. [en línea]. Proceedings of vetomac-2. December 2002 [ref. de 10 de junio de 2016]. Disponible en Web: <[http://reliabilityweb.com/articles/entry/standardization\\_of\\_absolute\\_vibration\\_level\\_and\\_damage\\_factors](http://reliabilityweb.com/articles/entry/standardization_of_absolute_vibration_level_and_damage_factors)>.
- [3] Hagopian JD, Lévecque N, Steffen V, et al. Inverse model for the control and the monitoring of rotating machines. 12th Iftomm World Congress, Besencon, France, 2007, p. 18-21.
- [4] Kulichevsky R, Sacchi M, Ghiselli MA. Medición y análisis de vibraciones: una herramienta para la predicción y evaluación de fallas en maquinaria [en línea]. Informe de la comisión nacional de energía atómica. [ref. de 10 enero de 2016]. Disponible en Web: <<http://www.aaende.org.ar/sitio/material/corende2000raul.pdf>>.
- [5] Carmignani P, Forte P, Rustighi. Active control of vibrations by means of piezoelectric actuators. Desing Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference the Asme. Pittsburgh, Pennsylvania, 2001.
- [6] Durán-García ME, Durán-Aponte E. "La termodinámica en los estudiantes de tecnología: una experiencia de aprendizaje cooperativo". Enseñanza de las ciencias. 2013. Vol. 31-1, p. 45-59. (DOI: <http://dx.doi.org/10.5565/rev/iec/v31n1.614>).
- [7] Ganatos P, Liaw P. Computer-animated teaching software for engineering dynamics and mechanical vibration. IEEE Frontiers in Education Conference. Atlanta, GA, 1995, Doi: 10.1109/fie.1995.483152.
- [8] Rojas-Eslava B, Moreno-Ibarra A, Calixto-González E. "Elaboración de un prototipo didáctico para el desarrollo de competencias en jóvenes de bachillerato". Septiembre 2012. Innovación educativa. Vol. 12-60, p. 63-75.
- [9] Duarte JE, Gutiérrez GJ, Fernández-Morales FH. "Desarrollo de un prototipo didáctico como alternativa pedagógica para la enseñanza del concepto de inducción electromagnética". Ted: Tecné, Episteme y Didaxis. Mayo 2007. Vol. 21-5, p. 77-83.
- [10] Jaime EA, Escudero C. "El trabajo experimental como posible generador de conocimiento en enseñanza de la física". Enseñanza de las ciencias. 2011. Vol. 29-3, p. 371-380.
- [11] Rao S. Vibraciones Mecánica. 5th Edition. Pearson education, Inc. 2012. p. 243-244. ISBN: 978-607-32-0952-6.
- [12] Mili J, Hota, Vakharia DP. "A review of rotating machinery critical speeds and modes of vibrations". International Review of Applied Engineering Research. 2014. Vol. 4-3, p. 241-250

#### MATERIAL SUPLEMENTARIO

[http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/\\_adic/8101-1.pdf](http://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8101-1.pdf)

