

Implementación de un laboratorio interactivo de simulación para la visualización y validación numérica de oscilaciones no lineales

Implementation of an interactive simulation laboratory for visualising and numerical validation of non linear oscillations

■■■■■
Alberto Jesús Perea-Moreno, Marta María Varo-Martínez, José Miguel Martínez-Valle, Pilar Aparicio-Martínez, Pilar Martínez-Jiménez
Universidad de Córdoba (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8087>

En el campo de la ingeniería, las pruebas de campo y simulaciones en laboratorio son importantes para soportar o rechazar resultados teóricos (analíticos o numéricos) [1,2]. Más aún, las pruebas de laboratorio ayudan a los científicos a entender el comportamiento de sistemas estructurales y mecánicos, particularmente bajo comportamiento no lineal donde las soluciones analíticas pueden ser limitadas [3-7]. Por ello, para entender el comportamiento no lineal de las estructuras durante sismos fuertes, los ingenieros usualmente confían en los resultados de pruebas dinámicas de modelos estructurales [8,9].

En cuanto al equipo de laboratorio utilizado en este tipo de pruebas, existen distintos dispositivos [10]. Actualmente, el dispositivo más empleado para probar estructuras sujetas a acciones sísmicas es la mesa vibradora [11]. La mayoría de estos dispositivos sólo permiten llevar a cabo pruebas con modelos a escala, sin embargo, existen algunas que debido a su tamaño y capacidad permiten probar estructuras de pequeñas dimensiones a escala real [12]. Este tipo de aparatos son caros, tanto en su costo de adquisición como en su operación y mantenimiento: de ahí la necesidad de construir dispositivos más sencillos que permitan llevar a cabo la simulación experimental de pruebas dinámicas.

Desde hace algunos años, la tecnología permite el uso de Escenarios Virtuales Interactivos (EVI), cuyo núcleo es la Simulación Numérica (SN), para estudiar Sistemas Físicos que presentan modelos de comportamiento de gran complejidad [13]. La SN implica la generación de una historia artificial de un sistema, y la obser-

vación de ésta, para obtener deducciones sobre las características del sistema real [14]. Es decir, se puede utilizar: para estudiar sistemas experimentales antes de que se construyan, o como herramientas de análisis para predecir los efectos de cambios en sistemas existentes bajo condiciones extremas, es decir, sirve para contestar a la pregunta ¿qué ocurriría si...? [15]. De ahí la importancia de que los alumnos de ingeniería conozcan los métodos de simulación numérica, siguiendo los esquemas de construcción de modelos [16], implementación, verificación de software y validación tanto de los modelos, como de los métodos numéricos utilizados, llevando a cabo posteriormente, el diseño de experimentos y su determinación de errores.

El ordenador dentro de la enseñanza de la Ingeniería está siendo usado con dos fines específicos: como sistema auxiliar para el profesor, mejorando así los sistemas de evaluación y recuperación, y como herramienta pedagógica que complementa los medios didácticos tradicionales [17]; es decir, como sistemas de procesamiento y almacenamiento de datos, como dispositivos que muestran información, como controladores de procesos experimentales, y también como asistentes matemáticos en la resolución de problemas numéricos y en la simulación de fenómenos [18, 19].

En la actualidad la calidad del software para la enseñanza en Ingeniería es muy elevada, en particular en aquellos dedicados a la simulación de procesos físicos y cálculo de estructuras [20-22], sin embargo, la mayoría del software tiene un núcleo cerrado y no manipulable, por lo que el alumno aprende el manejo para la obtención de resultados pero no lo posibilita para estudiar el modelo de comportamiento, ni decidir el tipo de método numérico válido para la simulación, es decir no le forma en unas de las competencias fundamentales como es enfrentarse a un problema y decidir el método de resolución.

En este artículo se presenta un *Laboratorio Interactivo de Simulación* (LIS) para la visualización y validación numérica de oscilaciones no lineales y su implementación como herramienta docente dentro de la enseñanza de Fundamentos Físicos en el grado de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba, donde está siendo usado como herramienta pedagógica que complementa los medios didácticos tradicionales. El desarrollo de esta herramienta tiene como objetivo el que el alumno de primeros cursos se introduzca en los métodos de simulación numérica y en su utilización, verificación y validación mediante un ejemplo sencillo pero muy complejo de oscilaciones no lineales como es el péndulo simple y les ayude a diseñar entornos y condiciones de contorno no predecibles bajo circunstancias poco favorables. Para ello el LIS permite utilizar simultáneamente diferentes métodos numéricos para la resolución de los experimentos estudiados y comparar los resultados, iniciando al alumnado en las técnicas de resolución de problemas de ingeniería mediante métodos numéricos y comprender la influencia del método escogido en el resultado final. Esto permite al alumno comprender que la elección de un método poco preciso, puede dar lugar a interpretaciones físicas erróneas de gran importancia en la toma de decisiones en Ingeniería.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO DEL PÉNDULO SIMPLE MEDIANTE DIFERENTES MÉTODOS NUMÉRICOS

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se ha desarrollado una herramienta informática, Laboratorio Interactivo de Simulación (LIS) para la resolución del comportamiento del péndulo simple, tanto en régimen de oscilaciones lineales como no lineales, es decir bajo condiciones de contorno de cualquier valor.

El péndulo simple es un sistema físico que consiste en un objeto puntual de masa m , suspendido de una cuerda (o barra) ligera e inextensible de longitud l y masa despreciable, cuyo extremo superior está fijo a un punto. La Fig. (1) muestra el diagrama de fuerzas del péndulo en condiciones ideales, se muestra la fuerza tensión que se ejerce a lo largo de la cuerda $\vec{T}$, y la fuerza debida a la aceleración de la gravedad $m\vec{g}$.

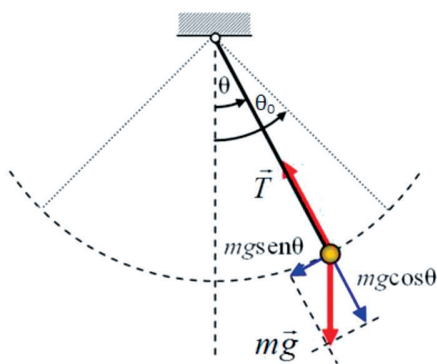


Fig. 1: Esquema del péndulo simple

En estas condiciones, si se desplaza la masa m respecto a su posición de equilibrio un pequeño ángulo θ , se producirá un movimiento en un plano vertical impulsado por la fuerza de la gravedad. Concretamente, si se considera un sistema de referencia intrínseco como el mostrado en la Figura 1, la componente tangencial de la fuerza peso, $mg \sin \theta$, se comportará como una fuerza recuperadora puesto que actuará siempre hacia la posición de equilibrio, dada por $\theta = 0$, y en sentido opuesto al desplazamiento.

Aplicando las leyes de Newton al sistema descrito tenemos la Ecuación 1 que rige el comportamiento del péndulo:

$$\sum_i \vec{F}_i = m\vec{a} \Rightarrow T(\vec{e}_r) - mg \cdot \cos \theta (\vec{e}_r) - mg \cdot \sin \theta (\vec{e}_t) = m a_t (\vec{e}_t) + m a_n (\vec{e}_n) \quad (1)$$

A partir de dicha ecuación y teniendo en cuenta la relación entre la aceleración tangencial y angular, $m a_t = m \ddot{\theta} l$, se obtiene la ecuación del movimiento oscilatorio del péndulo dada por la Ecuación 2.

$$-mg \cdot \sin \theta = m a_t = m \ddot{\theta} l \Rightarrow \ddot{\theta} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0 \quad (2)$$

La ecuación obtenida, es una ecuación diferencial de segundo orden no lineal. Sin embargo si la desviación de la masa m respecto a la posición de equilibrio, θ , es pequeña, podemos recurrir a la *aproximación para ángulos pequeños*, donde $\sin \theta \approx \theta$, obteniendo la Ecuación 3:

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \theta = 0 \quad (3)$$

De acuerdo con esto, para pequeñas amplitudes, se comprueba que el péndulo simple realiza un movimiento armónico simple (m.a.s) dado por la Ecuación 4:

$$\theta = \theta_{\max} \sin(\omega_a t + \phi) \quad (4)$$

donde $\omega_a = \sqrt{g/l}$ es la frecuencia angular del movimiento y $\theta_{\max}$ es la desviación angular máxima.

Es importante destacar que este resultado corresponde a un estudio ideal donde la amplitud es pequeña y se desprecia la interacción del sistema con cualquier fuerza externa. Sin embargo, el comportamiento del sistema en las condiciones iniciales de ángulo inicial superior a $\theta_{\max} = 0,1$ rad. e interacciones externas nulas, no es lineal, por tanto no existe solución analítica y debe resolverse mediante resolución numérica.

A continuación vamos a estudiar el movimiento general del péndulo en el caso de que actúen diferentes fuerzas externas.

Fuerza de rozamiento tangente a la trayectoria:

$$\vec{F}_f = -b v^n = -b \left(L \frac{d\theta}{dt} \right)^n (\vec{e}_t) \quad (5)$$

donde b es el coeficiente de rozamiento.

$$\alpha(t, \theta(t), \omega(t)) = -m \omega_a^2 \cdot \sin(\theta(t)) - \frac{b}{m} l^{n-1} \cdot (\omega(t))^n + \frac{F_{01}}{ml} \sin(\omega_1 t + \phi_1) + \frac{F_{02}}{ml} \cos(\omega_2 t + \phi_2) \sin(\theta(t)) \quad (13)$$

Dos fuerzas externas: la primera de ellas (Ecuación 6) actuará tangencialmente a la trayectoria mientras que la segunda lo hará en la dirección vertical, por lo que su componente en la dirección tangente a la trayectoria vendrá dada por la Ecuación 7.

$$\vec{F}_1 = F_{01} \sin(\omega_1 t + \phi_1) (\vec{e}_t) \quad (6)$$

$$\vec{F}_2 = F_{02} \cos(\omega_2 t + \phi_2) \sin(\theta) (\vec{e}_t) \quad (7)$$

En las ecuaciones 6 y 7, $\vec{F}_{01}$ y $\vec{F}_{02}$ representan los módulos de las fuerzas externas, ω_1 y ω_2 sus frecuencias y ϕ_1 y ϕ_2 sus respectivas fases iniciales.

De esta forma, al tener en cuenta estas posibles fuerzas, la ecuación del movimiento oscilatorio del péndulo simple vendrá dada por la Ecuación 8:

$$m \ddot{\theta} l = -mg \sin \theta - b \left(L \frac{d\theta}{dt} \right)^n + F_{01} \sin(\omega_1 t + \phi_1) + F_{02} \cos(\omega_2 t + \phi_2) \sin(\theta) \quad (8)$$

Por tanto, el problema a resolver tiene como objetivo hallar el valor del ángulo, θ , y la velocidad del péndulo en un instante de tiempo t , sabiendo que el ángulo satisface la ecuación 8 y que las condiciones iniciales, para $t=t_0$, del movimiento vienen dadas por las ecuaciones 9 y 10:

$$\theta(t_0) = \theta_0 \quad (9)$$

$$\omega(t_0) = \frac{d\theta}{dt}(t_0) = \omega_0 \quad (10)$$

La ecuación del movimiento obtenida no es una ecuación matemática de resolución inmediata, siendo necesario recurrir a los métodos numéricos para encontrar su solución.

Al aplicar el método de Euler la Ecuación 8 se escribe como un sistema de dos ecuaciones diferenciales (Ecuaciones 11 y 12):

$$\frac{d\theta}{dt}(t) = \omega(t) \quad (11)$$

$$\frac{d\omega}{dt}(t) = \alpha(t, \theta(t), \omega(t)) \quad (12)$$

donde $\alpha(t, \theta(t), \omega(t))$ representa la aceleración angular y su dependencia respecto del ángulo y la velocidad angular viene dada por la Ecuación 13:

A partir de la Ecuación 13, consideramos un instante de tiempo $t_1 = t_0 + \Delta t$ suficientemente próximo a t_0 de manera que sea posible considerar que durante el pequeño intervalo de tiempo transcurrido, Δt , la variación de $\omega(t)$ y $\alpha(t)$ se mantienen aproximadamente constantes. Bajo esta premisa y en base a la definición matemática de derivada, es posible aceptar las aproximaciones dadas por las ecuaciones 14 y 15:

$$\theta_1 = \theta(t_1) \approx \theta_0 + \Delta t \cdot \omega_0 \quad (14)$$

$$\omega_1 = \omega(t_1) \approx \omega_0 + \alpha(t_0, \theta_0, \omega_0) \Delta t \quad (15)$$

De esta forma, repitiendo este procedimiento de manera iterativa, es posible determinar los valores del ángulo, $\theta_n = \theta(t_n)$, y la velocidad angular, $\omega_n = \omega(t_n)$, del movimiento oscilatorio del péndulo, para cualquier instante de tiempo $t_n = t_0 + n \Delta t$, siendo n un número entero positivo.

Siguiendo un procedimiento análogo, los métodos de Euler modificado, de Heun y de Runge-Kutta de 4º Orden, incorporan mejoras en la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales dado por las ecuaciones 8, 9 y 10.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

Galileo es un Laboratorio Interactivo de Simulación (LIS) para la visualización y validación numérica de oscilaciones lineales y no lineales. El desarrollo de esta herramienta tiene como objetivo el que el alumno de primeros cursos se introduzca en los métodos de simulación numérica y en su utilización, verificación y validación mediante un ejemplo sencillo pero muy complejo de oscilaciones no lineales como es el péndulo simple y les ayude a diseñar entornos y condiciones de contorno no predecibles bajo circunstancias poco favorables. Para ello, el LIS permite utilizar simultáneamente diferentes métodos numéricos para la resolución de los experimentos estudiados y comparar los resultados, iniciando al alumnado en las técnicas de resolución de problemas de ingeniería mediante métodos numéricos, y comprender la influencia del método escogido en el resultado final. Esto ayuda al alumno a comprender que la elección de un método poco preciso, puede dar lugar a interpretaciones físicas erróneas, de gran importancia en la toma de decisiones en Ingeniería.

El alumno podrá acceder, desde un menú principal, a las cuatro partes de las que consta el programa: Preconceptos, Tutorial, Simulación y Evaluación (Fig. 2). Además, el software incluye una utilidad de acceso restringido al profesorado responsable de la actividad para la gestión de los diferentes cuestionarios que incluye la aplicación.



Fig. 2: Menú Principal de Galileo

Mediante la opción de preconceptos se pretende detectar conocimientos previos erróneos del alumnado y evaluar si posee los conocimientos necesarios para abordar la simulación del problema. La evaluación

se realiza online mediante un cuestionario previo tipo test con preguntas básicas sobre el fenómeno físico a estudiar y las técnicas de resolución de problemas de ingeniería mediante métodos numéricos. Al finalizar el cuestionario, Galileo mostrará al alumno el porcentaje de respuestas acertadas con una recomendación en función del resultado obtenido.

En el Tutorial se introduce una detallada información sobre los temas fundamentales en torno al fenómeno físico estudiado y su resolución, esto es: Oscilaciones, Métodos numéricos e Implementación de la simulación del péndulo simple. Dicho tutorial estará siempre accesible al usuario.

El entorno de simulación es el bloque principal del software Galileo ya que permite estudiar el comportamiento físico de un péndulo simple bajo diferentes condiciones iniciales, siendo el propio alumno el encargado de diseñar el sistema físico a estudiar, no imponiendo restricción alguna a dicho sistema. Además, permite escoger el método numérico para la resolución e incluso aplicar simultáneamente varios métodos, obteniendo el grado de exactitud y precisión de cada uno de ellos, por lo que el alumno puede analizar la influencia del método numérico escogido en el resultado final. Finalmente, es posible representar gráficamente tanto el movimiento real del sistema físico como la representación gráfica de cualquier par de variables, escogidas entre el conjunto de magnitudes significativas en el sistema.

Desde la pantalla principal, el alumno puede acceder a las opciones de simulación desde la cual elegir entre cuatro posibles metodologías que determinarán la ejecución del simulador. Puede estudiar el

problema mediante un Método Numérico (Fig. 3a) (Runge-Kutta, Euler, Euler modificado o Heun), comparar dos de ellos (Fig. 3b) o los cuatro simultáneamente. Para los dos últimos casos, el método de Runge-Kutta de 4º orden que se usará como base en la comparación de resultados y cálculo de errores. El simulador presentará una gráfica para cada uno de los métodos numéricos escogidos y mostrará, tras la simulación, una pantalla con los errores de cada método respecto a los resultados obtenidos por Runge-Kutta (Fig. 4).

El programa también permite estudiar Familia de curvas (Fig. 3c) y el Caos (Fig. 3d).

El alumno siempre puede definir su propio sistema físico introduciendo en la herramienta tanto las variables que determinan el péndulo (masa, longitud y frecuencia natural) como las condiciones iniciales del movimiento (velocidad angular y ángulo inicial) y el incremento de tiempo que emplearán los métodos numéricos para calcular los valores sucesivos (Fig. 5). Este parámetro constituye un factor decisivo para la ejecución de la simulación. Mientras menor sea el valor de este parámetro, mayor exactitud tendrán los cálculos pero mayor será también el tiempo de ejecución de la simulación. Asimismo, el alumno podrá definir la gravedad a la que está sometida el péndulo, así como posibles fuerzas de rozamiento que actúen sobre el sistema, introduciendo los parámetros b y n que la determinan, de acuerdo con la ecuación 5. Finalmente, es posible incluir la influencia que ejercen dos fuerzas externas diferentes: una primera fuerza que actúe sobre la masa del péndulo tangencialmente a su trayectoria (Ecuación 6) y una segunda que actúe en

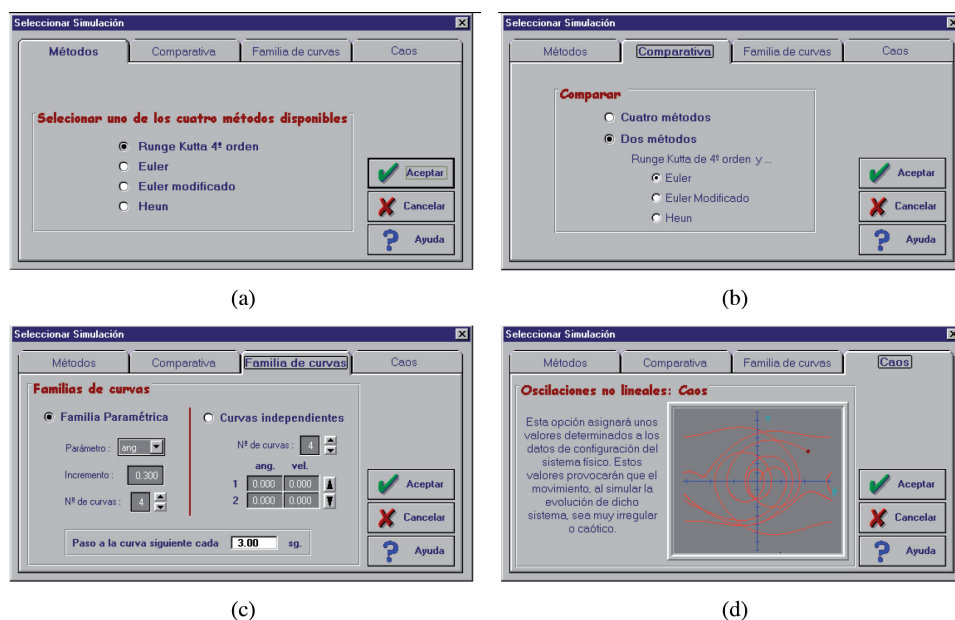


Fig. 3: Posibles modos de ejecución del Simulador

la dirección vertical (Ecuación 7). Para ello, el alumno deberá introducir el módulo, frecuencia y desfase de cada una de las fuerzas.

parar los resultados con los obtenidos directamente mediante la solución analítica del movimiento armónico simple (m.a.s.). Se les pide que calculen el periodo y la

con los cuatro métodos numéricos que el alumno podrá ejecutar simultáneamente.

La metodología de trabajo de ambos grupos (de Control y Experimental) es

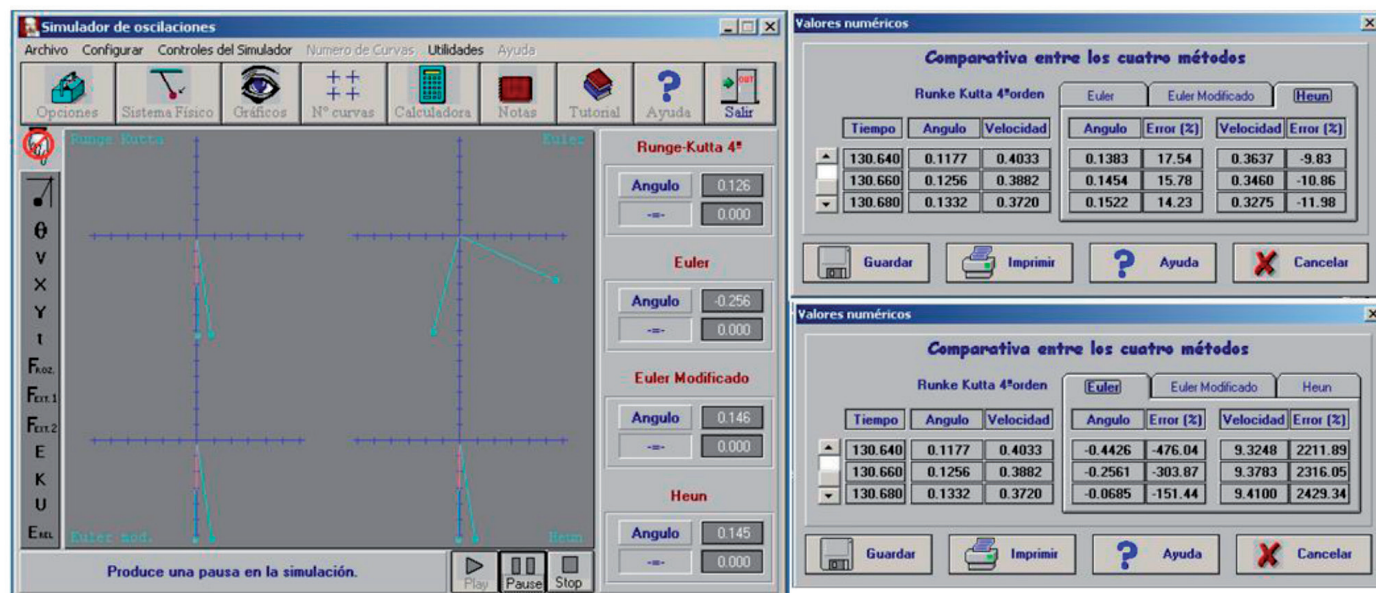


Fig. 4: Comparación de los cuatro métodos numéricos: Euler, Euler Modificado, Heun y Runge-Kutta

Datos iniciales

Incremento de t.: 0.010
Velocidad ang.: 0.000
Angulo: 0.100

Datos del péndulo

Masa: 0.500
gravedad: 9.800
Longitud: 1.568
Frecuencia natural: 2.500

Fuerza de rozamiento

b: 0.00
n: 1

Datos de fuerzas externas

	Fuerza1	Fuerza2
Módulo:	0.000	0.000
Frecuencia:	1.000	1.000
Desfase:	0.000	0.000

Configurar datos iniciales, datos del péndulo, rozamiento y fuerzas externas.

Fig. 5: Opción "Configuración del Sistema" de la ventana principal del Simulador

3. RESULTADOS

Este software ha sido trabajado con los alumnos de la asignatura Fundamentos Físicos en la Ingeniería del Grado de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba, utilizándose con grupos diferentes definidos como usuario de nivel 1 (Grupo de Control) y nivel 2 (Grupo Experimental):

Nivel 1: Estos alumnos estudian únicamente el fenómeno físico que implementa el simulador, es decir, el estudio de oscilaciones lineales y no lineales mediante el método de Runge-Kutta, pero sin comparar los diferentes métodos numéricos.

Experimentalmente se les da unas variables iniciales de condiciones de oscilación armónica simple y se les hace com-

frecuencia natural y los valores teóricos obtenidos se comparan con los resultantes de la simulación. En el segundo apartado de la práctica, se dan valores a los diversos parámetros de las diferentes fuerzas y se analizan los resultados obtenidos. Los alumnos presentan una memoria donde estudian los resultados obtenidos directamente y mediante Simulación. Esta experiencia de simultanear laboratorios experimentales con Laboratorios Interactivos de Simulación (LIS) se realizó durante los 4 años que se impartió la asignatura de primero de carácter anual.

Nivel 2: El proceso en la práctica de simulación que se ha seguido es idéntico al del nivel 1, sólo que en el estudio del oscilador mediante simulación se trabaja

idéntico. Es importante destacar que previamente a la realización de la práctica a ambos grupos se les realiza una introducción teórica sobre el problema Físico y su resolución matemática. La diferencia estriba en que mientras el grupo correspondiente al nivel 1 únicamente realiza la simulación con el método de Runge-Kutta que presenta nulos errores de truncamiento, el grupo de nivel 2, compara los cuatro métodos numéricos,

Es imprescindible resaltar, que los alumnos que estudian Ingeniería provienen de estudios de Bachiller Tecnológico o Grado Superior en estudios Tecnológicos, además todos ellos han tenido que superar la prueba de Selectividad, por lo que tienen que tener unos conocimientos previos similares. Además, se les realiza un examen previo de evaluación de conocimientos en Matemáticas y Física antes de comenzar el desarrollo del curso académico y como medida de apoyo a los alumnos que muestran un peor grado de conocimientos, se les imparten docencia de refuerzo, por lo que al iniciar las prácticas específicas del estudio de modelos no lineales ya tienen conocimientos similares.

El proceso de evaluación consiste en: entrega de una memoria de prácticas donde explican cada uno de los casos propuestos y un examen de cuestiones teórico-prácticas, 20 cuestiones, sobre fundamentos físicos, modelos matemáticos, comparación de métodos numéricos, validación, estudio de errores y diseño de pruebas de validez, se evalúa sobre 10

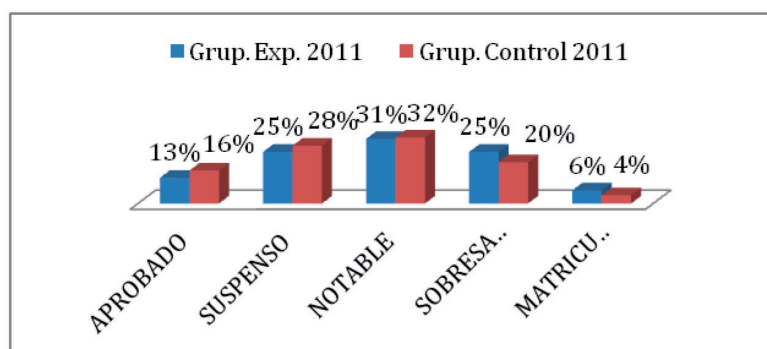
cada una de las pruebas y se determina la media.

Para la evaluación de la memoria, se tiene en cuenta el estudio de la fiabilidad de la simulación. En primer lugar se les recomienda unos datos iniciales de entrada que corresponde al estudio de un movimiento armónico simple y se les pide

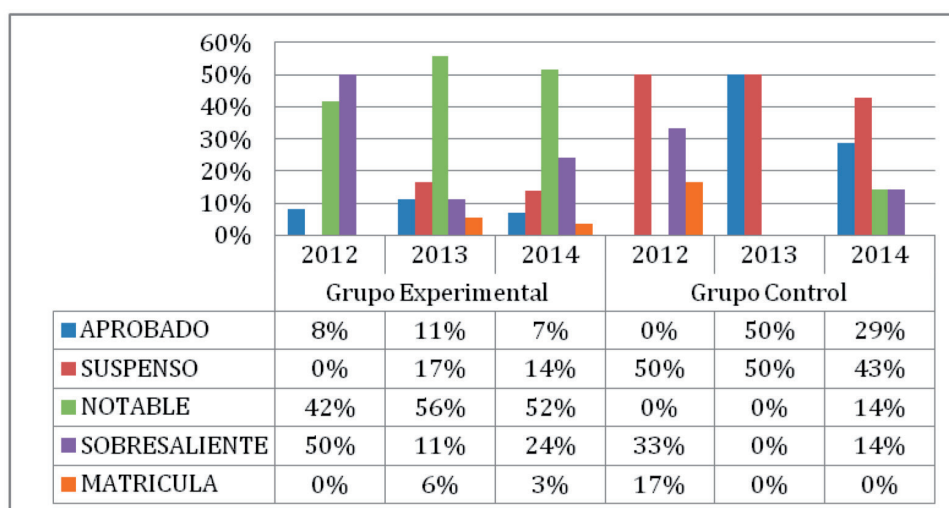
de los métodos numéricos y el estudio de errores de truncamiento y desbordamiento que se producen en una simulación.

Se ha realizado un estudio comparativo de los resultados obtenidos por los alumnos durante cuatro cursos consecutivos, 2011-2012; 2012-2013; 2013-2014; 2014-2015, en el bloque de oscilaciones

y ondas de la asignatura. Todos los cursos están divididos en dos grupos diferentes, denominados grupos de control y grupos experimentales. Los grupos de control no han realizado el estudio de oscilaciones mediante los cuatro métodos numéricos, sólo han trabajado con el método de Rungen Kutta y las explicaciones teóricas, los



(a)



(b)

Fig. 6: Estadística porcentual en base a los resultados de la evaluación de la asignatura Fundamentos Físicos en la Ingeniería del Grado de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba. (a) Resultados del curso 2011-2012 con las mismas técnicas docentes, (b) Resultados cursos restantes, grupos experimentales estudian cuatro métodos numéricos.

que realicen los cálculos manualmente, y que los comparen con los resultados obtenidos mediante simulación para cada método numérico. En este estudio se les insta a que repitan la experiencia para valores crecientes de intervalos de tiempo y observen que a medida que el tiempo de discretización aumenta el método de Euler deja de ser válido, con errores de truncamiento altos. Posteriormente repiten el estudio para valores crecientes de ángulo inicial, sin aplicar fuerzas externas con el fin de que comprendan la no linealidad del péndulo incluso cuando no existen fuerzas externas, se vuelven a comparar los métodos. En tercer lugar se vuelve a repetir el estudio aplicando fuerzas externas.

Se evalúa el grado de comprensión del modelo matemático, la diferencia entre sistemas lineales y no lineales, la validez

Ranks			
Laboratorio		N	Mean Rank
NOTAS	experim	57	54,21
	casos	40	41,58
	Total	97	
AÑO	experim	57	54,68
	casos	40	40,90
	Total	97	

Test Statistics^{a,b}

	NOTAS	AÑO
Chi-Square	5,114	6,369
df	1	1
Asymp. Sig.	,024	,012

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: Grupos

Tabla 1: Kruskal Wallis y validación de grupos

grupos experimentales han trabajado con todos los métodos numéricos y explicaciones teóricas previas; excepto el primer curso 2011-2012 en el que ninguno de los grupos recibió información sobre diferentes métodos numéricos y su verificación y validación. En la Fig. (6a) se presentan los valores de la frecuencia de resultados en las notas correspondientes al bloque de Oscilaciones y Ondas en el curso académico 2011-2012 y se observa que los valores tanto en el grupo de control y en experimental son similares, (aprobado 13/16%; Suspenso 25/28%; Notable 31/32%; Sobresaliente 25/20% y Matricula 6/4%), lo que indica que los grupos son equivalentes, con similares conocimientos y el mismo sistema de introducción de la información. En la Fig. (6b) se muestran estas frecuencias en los tres cursos siguientes

en donde los grupos experimentales trabajan los cuatro métodos numéricos para el estudio de oscilaciones y relación con la simulación numérica. Se observa en todos los cursos, que los grupos de control tienen un porcentaje de suspensos entre el 43 y 50 % mientras que los experimentales varían entre 0 y 17%, habiendo superado esta parte de la asignatura entre 83 y 100% de los alumnos. Un caso muy interesante es el curso 2012-2013, en el que el grupo de control tuvo una distribución muy asimétrica, 50% de suspensos y 50% entre sobresalientes y matrículas, lo que indica que los alumnos de percentil bajo suspendieron y los muy buenos superaron la asignatura con el grado de excelencia.

En la Tabla 1 se muestra los resultados de la prueba de Kruskal Wallis obtenidos mediante el paquete estadístico SPSS vs. 15. Se ha realizado el estudio respecto a las calificaciones y respecto al año según la hipótesis nula de que la utilización de Galileo para la verificación de la validez de la simulación numérica en el estudio respecto a las calificaciones y al año es igual en ambos grupos, experimentales y control.

4. DISCUSIÓN. CONCLUSIONES

Del análisis estadístico de resultados de los alumnos en sus calificaciones en el estudio de Oscilaciones y Ondas, se deduce que en situaciones de iguales condiciones de docencia, profesorado, herramientas y diseño de materiales idénticos, los grupos obtienen resultados equivalentes (curso 2011-2012). Cuando se modifica y diseña nuevos experimentos de simulación comparando los diferentes métodos numéricos para determinar validez de resultados y fenómenos, se comprueba que los resultados de las calificaciones mejoran con la utilización del software y con la experiencia del profesorado, es decir, mejora también con los cursos, tal y como se deduce del estudio del test de Kruskal Wallis. Así, de los valores de Chi-cuadrado obtenidos con respecto a las variables notas y años, 5.114 y 6.369, respectivamente, se produce el rechazo de la hipótesis nula, es decir hay diferencias entre las calificaciones de los grupos de control y experimentales y estas van mejorando también con los años, debido posiblemente a los nuevos experimentos diseñados con el software descrito.

Por lo tanto, de la investigación realizada, se deduce que cuando se diseñan nuevos experimentos de simulación comparando los diferentes métodos numéricos para determinar validez de resultados

y fenómenos, los resultados de las calificaciones mejoran con la utilización del software.

PARA SABER MÁS

- [1] Turker HT, Coskun H, Mertayak C. "Innovative experimental model and simulation method for structural dynamic concepts". *Computer Applications in Engineering Education* 2016. Vol. 24(3). p.421-427. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/cae.21720>
- [2] Zamorano-Rey G, Garro B, Fernandez-Gamiz U, Zulueta-Guerrero E. "A computational study of the variation of the incidence angle in a vortex generator". *DYNA New Technologies* 2015. Vol. 2(1). [13 p.]. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/NT7357>
- [3] Janapati V, Kopsaftopoulos F, Li F, Lee SJ, Chang F. "Damage detection sensitivity characterization of acousto-ultrasound-based structural health monitoring techniques". *Structural Health Monitoring*. 2016. Vol. 15(2). p.143-161. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1475921715627490>
- [4] Betti R, Sloane MJD, Khazem D, Gatti C. (2016). "Monitoring the structural health of main cables of suspension bridges". *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2016. Vol. 6(3). p. 355-363. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-016-0165-8>
- [5] Li Y, Conte JP, Barbato M. "Influence of time-varying frequency content in earthquake ground motions on seismic response of linear elastic systems". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2016. Vol. 45(8). p.1271-1291. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.2707>
- [6] Zhou C, Chase JG, Rodgers GW, Tomlinson H, Xu C. "Physical parameter identification of structural systems with hysteretic pinching". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2015. Vol. 30(4), p. 247-262. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/mice.12108>
- [7] Tapia N, Almazán J, Baquero J. "Development of a novel combined system of deformation amplification and added stiffness and damping: Analytical result and full scale pseudo-dynamic tests". *Engineering Structures*. 2016. Vol. 119, p. 61-80. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.004>
- [8] Papavasileiou GS, Charnpis DC. "Seismic design optimization of multi-storey steel-concrete composite buildings". *Computers and Structures*. 2016. Vol. 170. p. 49-61. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.03.010>
- [9] Tao M, Nie, J. "Multi-scale modeling for deformation mechanism analysis of composite joint substructures". *Engineering Structures* 2016. Vol. 118, p.55-73. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.047>
- [10] Aykan M, Çelik M. "Vibration fatigue analysis and multi-axial effect in testing of aerospace structures". *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. Vol. 23(3). p.897-907. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2008.08.006>
- [11] Tabatabaiefar HR, Mansoury B. "Detail design, building and commissioning of tall building structural models for experimental shaking table tests". *Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2016. Vol. 25(8). p. 357-374. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/tal.1262>
- [12] Liu S, Li L, Zhang Y, Xu X, Xue X. "Small-scale shaking table tests on retaining wall constructed with soilbags". *Journal of Hohai University*. 2015. Vol. 43(3). p. 236-243. DOI: <http://dx.doi.org/10.3876/j.issn.1000-1980.2015.03.008>
- [13] López-tarruella-Maldonado J, Linares-Millan C, Guixeres-Provinciale J, Higuera-Trujillo J. (0). "Online virtual environments for user-centered design: a case study". *DYNA*, Noviembre 2016, vol. 91, no. 6, p.634-638. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7905>
- [14] Uribe MDR, Magana AJ, Bahk J, Shakouri A. "Computational simulations as virtual laboratories for online engineering education: A case study in the field of thermoelectricity". *Computer Applications in Engineering Education*. 2016. Vol. 24(3). p. 428-442. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/cae.21721>
- [15] Druesne F, Hamdaoui M, Lardeur P, Daya EM. "Variability of dynamic responses of frequency dependent visco-elastic sandwich beams with material and physical properties modeled by spatial random fields". *Composite Structures*. 2016. Vol. 152. p.316-323. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.026>
- [16] Kelton WD, Law AM. (2000). *Simulation modeling and analysis*. Boston: McGraw Hill.
- [17] Potkonjak V, Gardner M, Callaghan V, Mattila P, Guetl C, Petrovi VM, Jovanovi K. "Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review". *Computers and Education*. 2016. Vol. 95, p.309-327. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>
- [18] García J, Entrialgo J. "Using computer virtualization and software tools to implement a low cost laboratory for the teaching of storage area networks". *Computer Applications in Engineering Education*. 2015. Vol. 23(5). p.715-723. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/cae.21644>
- [19] Uribe MDR, Magana AJ, Bahk J, Shakouri A. "Computational simulations as virtual laboratories for online engineering education: A case study in the field of thermoelectricity". *Computer Applications in Engineering Education*. 2016. Vol. 24(3). p.428-442. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/cae.21721>
- [20] Maksimov MA, Monakhov VV, Kozhedub AV. "Virtual laboratories in physics with autogenerated parameters". *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Vol. 633(1) DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/633/1/012009>
- [21] Uribe MDR, Magana AJ, Bahk J, Shakouri A. "Computational simulations as virtual laboratories for online engineering education: A case study in the field of thermoelectricity". *Computer Applications in Engineering Education*. 2016. Vol. 24(3). p.428-442. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/cae.21721>
- [22] Blostotsky B, Efraim E, Ribakov Y. "Virtual laboratory for studying seismic response of base isolated bridges." *International Journal of Engineering Education*. 2013. Vol. 29(4). p.998-1012.