

# Contrastación del modelo teórico con experimentos: estudio de dos osciladores mecánicos acoplados

## Contrasting the theoretical model with the experiment: the study of two coupled mechanical oscillators

LUIS MARCELO CANO, SILVIA MARÍA GIORGI

GIDEAF, Departamento de Física, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina  
luismcano84@argentina.com, sgiorgi@fiquis.unl.edu.ar

### Resumen

*En este trabajo se presenta un estudio sobre los procesos involucrados en la contrastación de un modelo teórico con datos experimentales. El tema abordado fue el comportamiento de dos osciladores mecánicos acoplados. Las actividades fueron realizadas por un estudiante de ingeniería química, que ya había aprobado un curso de mecánica básica, en el marco de un proyecto de investigación sobre las relaciones entre los modelos empleados en la enseñanza de la física universitaria, los modelos mentales de los estudiantes y los modelos conceptuales científicos. Las actividades consistieron por un lado, en obtener las ecuaciones teóricas para el modelado de experiencias factibles de ser reproducidas en un laboratorio de física introductoria universitaria, y por el otro, en diseñar un equipo que permita el desarrollo de experimentos para corroborar la validez del modelo por contrastación con los resultados experimentales. En los experimentos se usaron dos carritos de igual masa unidos entre sí por medio de un resorte y fijados a los extremos de un riel de aire a través de otros dos resortes de igual constante elástica. Se modeló al sistema físico considerando a los resortes como ideales y con comportamiento elástico en el rango lineal, a los osciladores como masas puntuales, y al rozamiento despreciable. Se llevaron a cabo tres experimentos en los que se calcularon las frecuencias de vibración a partir de las ecuaciones derivadas de la mecánica, y se contrastaron esos valores con los obtenidos a través de mediciones de los períodos de vibración. Se encontró que los errores experimentales resultaron lo suficientemente bajos como para aceptar que el modelo teórico adoptado describe el comportamiento real del sistema.*

**Palabras clave:** física, enseñanza, aprendizaje, modelos teóricos, experimento

### Abstract

*A study about the processes involved in contrasting a theoretical model with experimental data is presented. The chosen issue was the two-oscillators problem. The study was made by a student, who had approved a basic Mechanics course, in the frame of a research about the relations between models used in university physics teaching, students' mental models and scientific conceptual models. The activities were on one hand, to obtain the theoretical equations for the modeling of feasible experiences that can be reproduced in a physics laboratory of an introductory university course, and on the other hand, to design an equipment that allows the development of the experiments, in order to corroborate the validity of the model by comparing the results obtained from the theoretical model with the experimental ones.*

*In the experiments two carts of equal mass were used. They were joined through a spring, and fixed to the ends of an air rail through other two springs of equal elastic constant. The physical system was modeled considering ideal springs in the linear elastic range, the oscillators as point masses, and with no friction. Three experiments were done. The vibration frequencies were calculated from the theoretical relationships, and those values were contrasted with the obtained through measurements of the vibration periods. It was found that the experimental errors were low enough to accept that the theoretical model adopted describes the real behavior of the system.*

**Key words:** physics, teaching, learning, theoretical models, experimentation

### INTRODUCCIÓN

Se presentan los resultados de un trabajo de investigación realizado por un estudiante avanzado de la carrera de ingeniería química, primer autor de esta presentación, quien ya había aprobado un curso de mecánica básica que incluye el desarrollo del tema errores de las mediciones. Él mismo abordó el estudio del comportamiento de dos osciladores mecánicos acoplados. Las actividades se desarrollaron en el marco de un proyecto de investigación, que aborda el estudio de las relaciones entre los modelos empleados en la enseñanza de la física universitaria, los modelos mentales de los estudiantes y los modelos conceptuales científicos.

Dada la complejidad matemática que presenta el tema, el estudio de dos osciladores mecánicos acoplados no es abordado en los cursos de física introductoria que se dictan en las carreras que se cursan en esta facultad, por lo que parte de las actividades desarrolladas por el estudiante consistieron en la profundización del tema. Además, se propuso el diseño y construcción de un equipo que permitiera realizar experiencias, para corroborar el modelo teórico a partir del tratamiento de datos experimentales y de la evaluación de los errores en las mediciones.

El modelado es la actividad fundamental en ciencias, y es una herramienta básica en la explicación científica, especialmente en la física. La gran mayoría de los modelos empleados en la enseñanza de esta disciplina están basados en los modelos conceptuales científicos. Los mismos forman parte del cuerpo de una teoría y son representaciones consistentes con el conocimiento científicamente compartido. Sin embargo, en la enseñanza en el nivel universitario, las cuestiones referidas al modelado generalmente, sólo están presentes de modo explícito en las asignaturas de los últimos años de la carrera, en el ciclo inicial dichas cuestiones generalmente no son abordadas. Esto da lugar a dificultades en los estudiantes para reconocer la presencia permanente de los modelos en todo estudio físico, las cuales generan confusiones como la falta de discriminación entre el modelo y la realidad que representa (ISLAS & PESA, 2001).

VESENKA y BEACH (2002) mostraron que la enseñanza de la física universitaria basada en la construcción de modelos es más eficaz que la enseñanza tradicional. En otro trabajo más reciente, MALONE (2006) señala la importancia del modelado en los procesos de enseñanza y aprendizaje de la física en los distintos niveles de instrucción, mencionando que este tipo de actividad raramente se desarrolla en una clase tradicional de física. La propuesta de MALONE (*op. cit.*) consistió en propiciar en los estudiantes el desarrollo de un modelo a través de una actividad experimental. Los datos del experimento fueron usados para producir diversas representaciones del modelo: verbales, diagramas, gráficas y representaciones algebraicas. Los estudiantes probaron si estas representaciones eran coherentes analizando si cada una de ellas les permitía obtener la misma solución a un problema dado.

Por otro lado, GONZÁLEZ PEDRERO (2005) propuso a estudiantes de ciencias e ingeniería la construcción de modelos computacionales para el estudio de ondas usando el programa Mathematica. De los resultados surge que las actividades promovieron en los alumnos el análisis crítico y el aprendizaje de conceptos; sin embargo, los mismos experimentaron en un entorno virtual que no permite conocer el grado de acercamiento de la simulación al comportamiento real del sistema.

Varios tipos de tareas con el objeto de promover en estudiantes de un curso introductorio de física tradicional la construcción de modelos, fueron propuestos por ETKINA *et al.* (2006).

En general, un modelo representa la situación real de manera incompleta, aproximada e inexacta, pero es más simple que ella (CONCARI & GIORGI, 2001). En la descripción y/o explicación de una situación real siempre se halla involucrado algún modelo. La elección de un modelo para resolver un problema es una tarea ineludible, aunque la mayoría de las veces se la lleva a cabo de manera irreflexiva o no se la explicita.

La mayor dificultad en la resolución de un problema reside en establecer la relación entre las características de la situación y el cuerpo de conocimientos disponible. SCHÖN (1992) habla de un arte de definición del problema, de un arte de su puesta en práctica y de un arte de la improvisación. En la definición del problema se ponen de manifiesto las magnitudes relevantes y se selecciona o identifica el sistema de interés.

En el proceso de formulación de suposiciones y selección de leyes se lo modela. Es justamente esta descripción y modelado, lo que permite aplicar el conocimiento utilizando leyes y ecuaciones constitutivas a cada situación.

Dado que el modelado no tiene el propósito de copiar a la realidad, existe siempre una brecha entre modelo y realidad, que se salva mediante la contrastación experimental (CUDMANI *et al.*, 1991). En este proceso juegan un rol fundamental la convalidación de resultados y la contrastación experimental, que permiten delimitar los campos de validez del modelo y de las conclusiones obtenidas mediante su empleo. CUDMANI *et al.* (*op. cit.*) señalan que, para controlar si es adecuada la modelización que se hace de una situación concreta, de manera de poder predecir comportamientos fácticos, la evaluación de los errores experimentales constituye un criterio cuantitativo fundamental.

En este contexto se planteó como objetivo general del presente trabajo contrastar un modelo teórico con datos experimentales. A tal fin se eligió estudiar el comportamiento de dos osciladores mecánicos acoplados. Este objetivo general dio lugar a los siguientes objetivos particulares: obtener las ecuaciones del movimiento derivadas de la Segunda Ley de Newton para el modelado de experimentos factibles de ser reproducidos en el laboratorio de física, diseñar y construir un equipo que permita el desarrollo de los mismos y corroborar la validez del modelo teórico por comparación de los resultados experimentales con los obtenidos a través de cálculos usando expresiones teóricas.

Se sostiene que las actividades de laboratorio son las más adecuadas para hacer explícita la interrelación entre la teoría y la interpretación de los valores experimentales, generando situaciones en las que el aprendizaje del dominio metodológico se efectúe en el marco de las teorías asumidas como posibles referentes del mundo físico.

En este trabajo se presenta una propuesta de actividad experimental en un laboratorio de física básica universitaria que pone énfasis en los procesos involucrados en la puesta a prueba de un modelo teórico analizando datos experimentales. Dichos procesos promueven el aprendizaje de habilidades científicas si son llevadas a cabo por el estudiante participando en forma activa. La metodología de trabajo que se describe se propuso como una instancia apropiada para promover no sólo el desarrollo de dichas habilidades, sino también de brindar al estudiante una oportunidad de acercamiento a la práctica científica.

## DOS OSCILADORES MECÁNICOS ACOPLADOS: MODELO TEÓRICO

Se abordó el problema de dos osciladores mecánicos acoplados.

Se modeló al sistema físico considerando a los osciladores como masas puntuales, a los resortes como ideales y con comportamiento elástico en el rango lineal, y al rozamiento despreciable.

En la Figura 1, tomada del sitio [www.ehu.es/acustica/espanol/basico/osaces/osaces.html](http://www.ehu.es/acustica/espanol/basico/osaces/osaces.html),  $m_1$  y  $m_2$  son las masas de los cuerpos oscilantes;  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  son las constantes elásticas de los resortes, y  $X_1$  y  $X_2$  son las distancias que los resortes de constantes  $K_1$  y  $K_2$  se han estirado, o comprimido, a partir de sus posiciones de equilibrio respectivamente.

Si los resortes  $K_1$  y  $K_2$  están en su estado natural cuando  $X_1$  y  $X_2$  son nulas,  $K_3$  también lo está, por lo que la elongación resulta  $(X_1 + X_2)$ . Si además  $m_1 = m_2$  y  $K_1 = K_2$ , las ecuaciones del movimiento derivadas de las ecuaciones de Newton de la Mecánica, son:

$$X_1 = A_1 \cos(W_1 t + \theta_1) - A_2 \cos(W_2 t + \theta_2) \quad (1)$$

$$X_2 = A_1 \cos(W_1 t + \theta_1) + A_2 \cos(W_2 t + \theta_2) \quad (2)$$

Se estudió al sistema vibrando en los dos modos normales y con acoplamiento. Las ecuaciones que se derivan para cada caso se presentan en la descripción de cada uno de los tres experimentos propuestos.

## METODOLOGÍA APLICADA PARA EL DESARROLLO DE LOS EXPERIMENTOS

Se propuso el diseño y construcción de un equipo para realizar experimentos que permitan corroborar el modelo teórico a partir de datos experimentales y de la evaluación de los errores en las mediciones. El equipo se construyó con material disponible en un laboratorio corriente de física universitaria (resortes, balanza, cronómetro, pesas, soportes, nivel, regla) y con un riel de aire y accesorios (carritos, elementos de fijación y otros) marca PASCO, modelo SF-9214 (1998).

Se usaron dos carritos de igual masa (dichas masas se midieron con una balanza de 0,01 g de apreciación) y tres resortes que se seleccionaron de un conjunto de ocho resortes disponibles en el laboratorio que fueron calibrados.

Teniendo en cuenta la condición de igualdad de constante elástica en los dos resortes de los extremos, se analizaron los valores de las constantes de los resortes disponibles y sus intervalos de error. Se seleccionaron dos resortes de constante elástica:

$$K_1 = K_2 = K = (24860 \pm 323) \text{ dinas/cm}$$

Para la elección del resorte de acoplamiento, se utilizó como criterio el hecho que su constante debía ser de un valor tal que permita un acoplamiento en el sistema de relativa importancia. Por esta razón se seleccionó un resorte de constante:

$$K_3 = (15279 \pm 460) \text{ dinas/cm}$$

Para que en las experiencias se reproduzcan lo mejor posible las condiciones de análisis del modelo teórico, de manera de poder comparar los resultados derivados del mismo con los obtenidos experimentalmente, se tuvieron en cuenta los siguientes detalles en cada una de las experiencias: los extremos fijos del sistema se ajustaron de manera que los resortes y los carritos queden alineados horizontalmente, tratando de evitar el movimiento en dichos extremos; se montaron los resortes de manera que los mismos no se encuentren ni estirados ni comprimidos en el estado inicial de equilibrio; se reguló el caudal de aire en el soplador de manera que los carritos deslicen sobre el mismo con fricción despreciable.

Las experiencias se repitieron cinco veces, extrayéndose valores del período que se promediaron, y se calcularon los correspondientes errores relativos.

Se tomó como instante inicial el momento en el cual los cuerpos en reposo, sacados de sus posiciones de equilibrio, se liberaron iniciándose el movimiento.

Para medir el período de vibración se usó un cronómetro manual de apreciación 0,1 s. Debido a que este intervalo de tiempo es muy corto, en la experiencia se midió el tiempo en el cual el sistema completa 10 ciclos, siendo éste un lapso más largo que permite una medición más exacta. De esta manera el error en el período fue de 0,01 s.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### I) Estudio del Primer Modo Normal de vibración

Se hicieron vibrar a los dos carritos en fase, sin que el resorte central sufriera ninguna deformación de manera que los mismos se movieron como si estuvieran desacoplados. Las ecuaciones de movimiento, haciendo  $A_2 = 0$  en las ecuaciones (1) y (2), resultan:

$$X_1 = A_1 \cos(W_1 t) \quad \text{y} \quad X_2 = A_1 \cos(W_1 t)$$

En este caso la frecuencia es:  $W_1 = \sqrt{K_{1+2}/m_{1+2}}$

Realizando una simulación del comportamiento del sistema, sólo a los efectos de obtener un esquema gráfico que permita una visualización cualitativa, se capturó del sitio [www.ehu.es/acustica/espanol/basico/osaces/osaces.html](http://www.ehu.es/acustica/espanol/basico/osaces/osaces.html) una imagen de la pantalla que se muestra en la Figura 2.

**I.a) Experimento:** Ambos cuerpos se sacaron de la posición del equilibrio en igual sentido y a la misma distancia.

Se trabajó en las siguientes condiciones:

Masa de cada carrito:  $m = (289,6 \pm 0,1) \text{ g}$

Desviaciones respecto a las respectivas posiciones de equilibrio:

$$X_{10} = X_{20} = (2,0 \pm 0,1) \text{ cm}$$

Valor promedio del período:  $T_{1 \text{ exp.}} = (0,69 \pm 0,01) \text{ s}$

La frecuencia  $W = \frac{2\pi}{T}$  resultó:  $W_{1 \text{ exp.}} = (9,1 \pm 0,1) \text{ s}^{-1}$

**I.b) El modelo teórico:** Conociendo el valor de la masa de los carritos, y de las constantes elásticas de los resortes extremos, se calcularon teóricamente los valores correspondientes al período y a la frecuencia angular, encontrando que:

$$W_{1 \text{ teórico}} = (9,27 \pm 0,06) \text{ s}^{-1} \quad \text{y} \quad T_{1 \text{ teórico}} = (0,677 \pm 0,004) \text{ s}$$

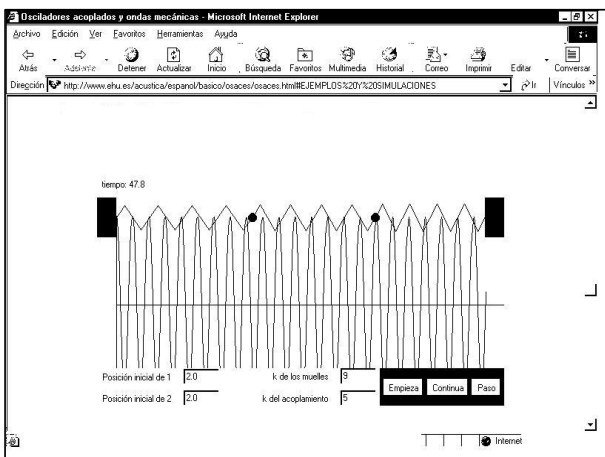


Figura 2: Imagen de la simulación de dos osciladores acoplados vibrando en el primer modo normal

A partir de los valores calculados a través del modelo teórico y los resultados obtenidos en el experimento se calculó el error relativo

porcentual del período  $E_T \% = \frac{|T_{\text{práctico}} - T_{\text{teórico}}|}{T_{\text{práctico}}} 100$ , resultando  $E_{T_1} \% = 1,5$

%. Este es un valor de error que permite inferir que el modelo teórico describe adecuadamente el comportamiento real del sistema físico.

## II) Estudio del segundo modo normal de vibración

Los dos carritos se hicieron vibrar en oposición de fase. Las ecuaciones de movimiento, haciendo  $A_1 = 0$  resultan:

$$X_1 = A_2 \cos(W_2 t) \text{ y } X_2 = -A_2 \cos(W_2 t)$$

En este caso la frecuencia angular es  $W_2 = \sqrt{(K + 2K_3)/m}$

La pantalla de la simulación que se capturó, en el sitio mencionado anteriormente, es la que se muestra en la Figura 3.

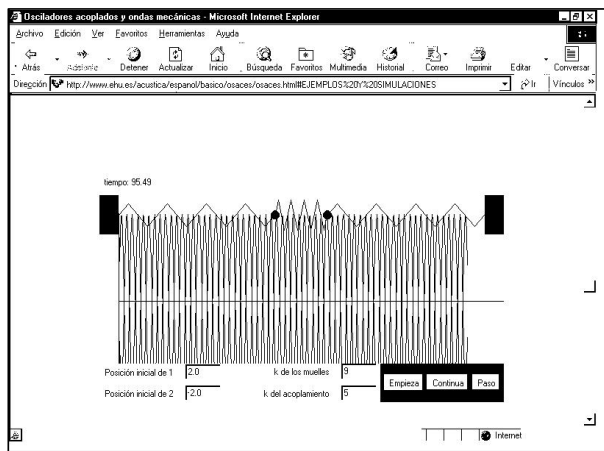


Figura 3: Imagen de la simulación de dos osciladores acoplados vibrando en el Segundo Modo Normal

**II.a) Experimento:** Ambos cuerpos se sacaron de la posición de equilibrio a la misma distancia en sentido opuesto. Se trabajó con los siguientes valores:

Masa de cada carro:  $m = (289,6 \pm 0,1) \text{ g}$

Desviaciones respecto a las respectivas posiciones de equilibrio:  $X_{10} = -X_{20}$

$$|X_{10}| = (2,0 \pm 0,1) \text{ cm.}$$

Valor promedio del período:  $T_{2 \text{ exp.}} = (0,46 \pm 0,01) \text{ s}$ , resultando  $W_{2 \text{ exp.}} = (13,7 \pm 0,3) \text{ s}^{-1}$

**II.b) El modelo teórico:** A partir del modelo teórico se calcularon los siguientes valores de período y frecuencia angular:  $W_{2 \text{ teórico}} = (13,83 \pm 0,06) \text{ s}^{-1}$  y  $T_{2 \text{ teórico}} = (0,453 \pm 0,002) \text{ s}$ .

El error relativo porcentual obtenido a partir de los valores calculados a través del modelo teórico y el resultado experimental resultó  $E_{T_2} \% = 2\%$ . Nuevamente, este valor de error permite inferir que el modelo teórico describe el comportamiento real del sistema físico.

## III) Estudio del efecto de acoplamiento

El efecto de acoplamiento resulta de hacer que ambos cuerpos participen de la oscilación en cada frecuencia, aumentando la frecuencia superior y disminuyendo la inferior.

Si  $m_2$  está inicialmente en reposo en su posición de equilibrio, y  $m_1$  es desplazada a una distancia  $A$  de la suya, y abandonada a sí misma en el instante  $t = 0$ , las constantes correspondientes a estas condiciones iniciales

$$\text{son: } \theta_1 = \theta_2 = 0 \text{ y } A_1 = A_2 = \frac{1}{2} A.$$

Las ecuaciones de movimiento de los cuerpos resultan:

$$X_1 = \frac{1}{2} A (\cos W_1 t + \cos W_2 t) \text{ y } X_2 = \frac{1}{2} A (\cos W_1 t - \cos W_2 t)$$

Operando, se las puede escribir de la siguiente forma:

$$X_1 = A \cos\left(\frac{W_1 - W_2}{2} t\right) \cos\left(\frac{W_1 + W_2}{2} t\right)$$

$$X_2 = -A \sin\left(\frac{W_1 - W_2}{2} t\right) \sin\left(\frac{W_1 + W_2}{2} t\right)$$

Donde la frecuencia media de oscilación es  $W = \frac{W_1 + W_2}{2}$ , y la

frecuencia angular que modula la amplitud es  $W_m = \frac{|W_1 - W_2|}{2}$ . En la simulación se capturó, del sitio mencionado, la imagen de la pantalla que se muestra en la Figura 4.

### III.a) Frecuencia de oscilación

**III.a.1) Experimento:** Las condiciones iniciales consistieron en una desviación del equilibrio en un sentido para una de las masas estando la otra en la posición de equilibrio, ambas en reposo.

Se trabajó en las siguientes condiciones:

Masa de los carros:  $m = (289,6 \pm 0,1) \text{ g}$

Desviaciones respecto a las respectivas posiciones de equilibrio:  $X_{10} = (2,0 \pm 0,1) \text{ cm}$

Valor promedio del período de oscilación:  $T_{3 \text{ exp.}} = (0,54 \pm 0,01) \text{ s}$

La frecuencia resultó:  $W_{3 \text{ exp.}} = (11,6 \pm 0,2) \text{ s}^{-1}$

**III.a.2) El modelo teórico:** Dadas las condiciones de trabajo del sistema se calcularon teóricamente los valores correspondientes al período y la frecuencia  $W_3$ , sabiendo que:

$$W_{3 \text{ teórica}} = \frac{W_1 + W_2}{2}, \text{ resultando en este caso } W_{3 \text{ teórica}} = (11,5 \pm 0,1) \text{ s}^{-1}$$

El período teórico resultó:  $T_{3 \text{ teórico}} = (0,546 \pm 0,005) \text{ s}$

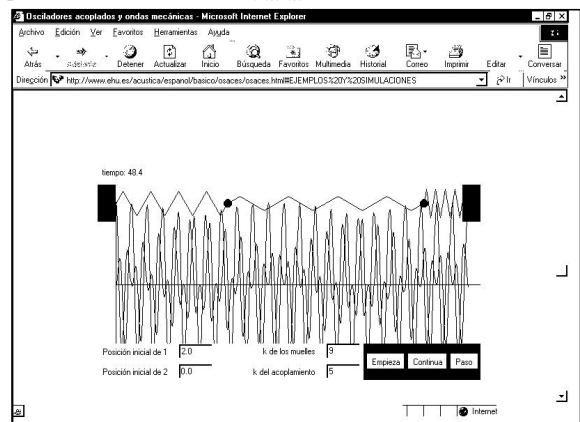


Figura 4. Imagen de la simulación de dos oscilares acoplados.

El error relativo porcentual resultó  $E_{T_3} \% = 1\%$ , por lo que se puede afirmar que el modelo teórico describe adecuadamente el comportamiento real del sistema.



### III.b) Frecuencia de modulación de la amplitud

**III.b.1) Experimento:** Se procedió igual que en los casos anteriores, pero midiéndose el periodo sólo una vez. El experimento se repitió cinco veces, calculándose el valor del periodo promedio y su correspondiente error relativo.

Valor promedio del periodo de modulación de la amplitud:

$$T_{\text{amplitud exp.}} = (2,9 \pm 0,1) \text{ s}$$

Frecuencia angular:  $W_{\text{amplitud exp.}} = (2,166 \pm 0,07) \text{ s}^{-1}$

**III.b.2) El modelo teórico:** Dadas las condiciones de trabajo del sistema se calcularon teóricamente los valores correspondientes al periodo y la frecuencia de modulación de la amplitud, sabiendo que la frecuencia que modula la amplitud es:

$$W_{\text{amplitud}} = \frac{W_1 - W_2}{2}, \text{ resultando en este caso } W_{\text{amplitud teórica}} = (2,3 \pm 0,1) \text{ s}^{-1}$$

El periodo teórico de modulación de la amplitud es:  $T_{\text{amplitud teórica}} = (2,7 \pm 0,1) \text{ s}$

El error relativo porcentual resultó:  $E_{T_{\text{amplitud}}} \% = 7 \%$ . Si bien este valor de error es mayor que en los otros experimentos, dadas las dificultades que se presentaron en la misma para realizar las mediciones, no se lo considera demasiado elevado, por lo que se sigue aceptando que el modelo teórico describe el comportamiento real del sistema físico.

### CONCLUSIONES

Se presentaron las actividades desarrolladas por un estudiante avanzado de la carrera de ingeniería química. Las mismas se llevaron a cabo con el objetivo de contrastar un modelo teórico con datos experimentales, de manera de evaluar si dicho modelo es adecuado para describir el comportamiento real de un sistema físico. Se estudió el sistema compuesto por dos osciladores mecánicos acoplados.

Se diseñaron experimentos en los que se tuvieron que tomar precauciones en cuanto a las condiciones de experimentación, no obstante, las mismas son de relativamente fácil reproducción en el laboratorio de física.

Se encontró que las discrepancias entre los resultados experimentales y los obtenidos a partir de cálculos teóricos fueron aceptables en los tres experimentos realizados. Esto permite concluir que el modelo teórico describe adecuadamente el comportamiento real del sistema físico.

Las tareas involucradas en este trabajo, y los criterios adoptados en dicho proceso de validación pueden reproducirse al abordar el estudio de otros sistemas físicos.

Se concluye que el tipo de actividades que se describen en este trabajo, llevadas al aula de física, brindan la oportunidad a los estudiantes no sólo de comprender el papel que juegan los modelos en la construcción del

conocimiento científico, sino también su carácter de subordinación al experimento en el marco interpretativo del cuerpo teórico.

La experimentación en física es una actividad de gran valor didáctico, se sostiene que el diseño de actividades en las que aparezca en forma explícita el objetivo de contrastar modelos teóricos con resultados experimentales debería presentarse con mayor frecuencia en los cursos de física universitaria.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos: CAID2005/PI 06-32 UNL; PICT 04-13646-BID 1728/OC-AR-UNL; CAID2005/PI 06-31 UNL. Argentina.

Se agradece a la Dra. Sonia Concari por la lectura crítica de esta presentación.

### BIBLIOGRAFÍA

- CONCARI, S. & GIORGI, S. La potencialidad significativa de los modelos de enseñanza, *Revista Irice*, (15), 151-163, 2001.
- CRAWFORD, F. *Berkeley Physics Course*, vol. III: *Ondas*, Editorial Reverté S. A., España, 1991.
- CUDMANI, L.C. DE, SALINAS, J. & PESA, M., *Modelo y realidad*, Material de trabajo para el taller desarrollado durante la VII Reunión Nacional de Educación en Física, Mendoza, Argentina, 1991.
- ETKINA, E.; WARREN, A. & GENTILE, M. *The Role of Models in Physics Instruction*, *The Physics Teacher*, vol. 44, Issue 1, 34-39, 2006.
- GONZÁLEZ PEDRERO, G. *Enseñanza de ondas mecánicas con cuerdas usando Mathematica. Universitas Scientiarum*, vol. 10 Edición Especial: Investigaciones en enseñanza de las ciencias y las matemáticas, 17-24, 2005.
- ISLAS, S. M. & PESA, M. A. ¿Qué rol asignan los profesores de física de nivel medio a los modelos científicos y a las actividades de modelado? *Enseñanza de las Ciencias*, Número Extra, 57-66, 2003.
- MALONE, K. The convergence of knowledge organization, problem-solving behavior, and metacognition research with the Modeling Method of physics instruction - Part I, *Journal of Physics Teacher Education Online*, 4 (1), 14-26, 2006.
- VESENKA, J. & BEACH, P. A comparison between traditional and "modeling" approaches to undergraduate physics instruction at two universities with implications for improving physics teacher preparation, *Journal of Physics Teacher Education Online* 1 (1), 3-7, 2002.
- Osciladores acoplados y ondas mecánicas*, material teórico y programa de simulación obtenido de [www.ehu.es/acustica/espanol/basico/osaces/osaces.html](http://www.ehu.es/acustica/espanol/basico/osaces/osaces.html)
- Pasco Scientific, <http://www.pasco.com/>
- SYMON, K. *Mecánica*, Aguilar, España, 1968.
- SHÖN, D. A. *La formación de profesionales reflexivos*, Paidós, MEC, Barcelona, 1992.

Received: 5.01.2007 / Approved: 20.04.2008

## Solvent free essential oil extraction. A simple and rapid approach to microwave hydrodistillation

### Rápida extracción de aceites sin solvente. Un simple acercamiento a la hidrodestilación por microondas

KAREN BOWN<sup>1</sup>, EMMA COWHAM<sup>1</sup>, MARIA MARTÍ VILLALBA<sup>1</sup>, ROBERT B. SMITH<sup>1</sup>,  
NIGEL MOULD<sup>1</sup>, SUSAN BILLINGTON<sup>2</sup> AND JAMES DAVIS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Chemistry, Nottingham Trent University, Nottingham, NG11 8NS, UK; <sup>2</sup> Dukeries College, New Ollerton, Newark, NG22 9TD, UK  
[james.davis@ntu.ac.uk](mailto:james.davis@ntu.ac.uk)

#### Abstract

Alternative methods of microwave assisted distillation for use in the extraction of essential oil from citrus fruits have been investigated. Two routes that offer the possibility of significantly enhancing the extraction process are described and their applicability for use within secondary and tertiary level courses has been appraised. The systems take advantage of domestic microwave oven configurations and can be readily adopted using conventional laboratory equipment. No modification of the microwave cavity is required and the processes have been shown to provide a rapid, efficient and, importantly, a solvent free method of extraction.

**Key words:** microwave, essential oil, limonene, extraction, green chemistry

#### Resumen

Métodos alternativos de destilación asistida por microondas para el uso en la extracción de aceites esenciales de cítricos han sido investigados. Dos rutas, que ofrecen la posibilidad de realizar considerablemente el proceso de extracción son descritas y su aplicabilidad para el empleo dentro de cursos de segundo y tercer nivel ha sido valorada. El sistema aprovecha las configuraciones de microondas domésticos y fácilmente puede ser adaptado usando el equipo convencional de laboratorio. Ninguna modificación de la cavidad del microondas es requerida y el proceso ha resultado ser rápido, eficiente y lo más importante, un método de extracción sin solvente.

**Palabras clave:** microondas, aceite, extracción, química verde.