



Determinación del calor específico del plomo mediante un procedimiento mecánico sencillo*

Rafael García Molina
Universidad de Murcia

La ley de conservación de la energía permite relacionar el aumento de temperatura de un cuerpo y la altura desde la que cae. A partir de esta conexión, en este trabajo se propone una experiencia cuyos objetivos son: comprobar la ley de conservación de la energía y calcular el calor específico del plomo. La utilización de materiales asequibles (perdigones de plomo, bote de plástico, termómetro y regla graduada), así como los conceptos físicos involucrados, sirven para que los estudiantes aprecien la relación entre dos importantes áreas de la física: mecánica y termodinámica. La realización de esta actividad resulta especialmente adecuada en el bachillerato y en los primeros cursos universitarios.

Palabras clave: física, conservación energía, energía potencial gravitatoria, calor específico, colisión inelástica, estadística.

Measuring the specific heat of lead using a simple mechanical procedure

By using the law of conservation of energy, we can link the height from which a body falls to its increase in temperature. This article takes this relationship to come up with an experiment designed to check the law of conservation of energy and calculate the specific heat of lead. Thanks to the use of affordable materials (lead shot, a plastic container, thermometer and ruler) and the physical concepts involved, students should easily be able to grasp the relationship between two major areas of physics: mechanics and thermodynamics. This activity is particularly suitable for baccalaureate and introductory undergraduate physics courses.

Keywords: physics, conservation of energy, gravitational potential energy, specific heat, inelastic collision, statistics.

La ley de conservación de la energía aparece en prácticamente todos los temas de física. Su aplicación facilita la resolución de numerosos problemas, tal como insistentemente los profesores recomiendan a los alumnos (especialmente como alternativa al uso de las leyes de Newton para resolver ciertos problemas de mecánica).

Por citar tan sólo algunos ejemplos, a partir de la ley de conservación de la energía se suele explicar la transformación de la energía potencial gravitatoria en energía cinética (durante la caída libre o en las oscilaciones de un péndulo),

en energía eléctrica (producida por los saltos de agua en las centrales hidroeléctricas) o en energía térmica (aumento de temperatura en agua agitada por palas conectadas a una masa que desciende).

Los dos primeros ejemplos de transformación de la energía potencial gravitatoria son fáciles de contextualizar con la experiencia diaria o con referentes cotidianos, tales como un columpio de un parque infantil o un pequeño generador eléctrico acoplado a una turbina accionada por la caída de un chorro de agua, por ejemplo.

Sin embargo, la transformación de la energía potencial gravitatoria en energía térmica no se puede visualizar de forma tan inmediata y, de hecho, en numerosas ocasiones se cita, como un mero referente histórico, la serie de experimentos que James Prescott Joule (1818-1889) realizó a mediados del siglo XIX, cuando mediante un sistema de pesas y poleas hizo girar una palas en el interior de un recipiente con agua, cuya energía (y, por tanto, su temperatura) aumentó en consonancia con la energía potencial que perdían las pesas al descender. Este conjunto de experiencias suele emplearse para una introducción histórica a la ley de conservación de la energía, pero raramente se llevan a cabo, por lo que difícilmente ayudan a que el alumnado establezca una relación directa entre el cambio de energía potencial gravitatoria y la variación de temperatura de un cuerpo.

En un texto clásico de demostraciones de física (Sutton, 1938) se propone un experimento, análogo al de Joule pero más fácil de implementar en el aula o el laboratorio. La experiencia descrita por Sutton (1938) consiste en dejar caer perdigones de plomo desde cierta altura y medir el aumento de su temperatura. Esta actividad se ha incorporado a varios repertorios de experiencias de física, donde se presenta una versión en la que predomina el tratamiento cualitativo de dicha actividad (Meiners, 1970).

Son escasos los libros de texto que recogen una actividad tan sencilla y formativa al mismo tiempo. Tras repasar los textos más usados en la actualidad, se comprueba que esta experiencia

La transformación de la energía potencial gravitatoria en energía térmica no se puede visualizar de forma tan inmediata y en numerosas ocasiones se cita, como un mero referente histórico, la serie de James Prescott Joule para una introducción histórica a la ley de conservación de la energía

sólo aparece reflejada como un ejercicio numérico en un libro para el bachillerato (Barradas y otros, 2010) y otro universitario (Tipler y Moscam 2005), aunque en este último emplean agua en lugar de plomo.

En este trabajo se presenta una adaptación de la experiencia descrita en Sutton (1938), tal como la realizó un nutrido grupo de estudiantes de bachillerato que visitó los laboratorios de física de la Universidad de Murcia. Los materiales que se emplearon son asequibles para cualquier centro docente y el tratamiento estadístico de la gran cantidad

de datos recogidos permite obtener el calor específico del plomo con una precisión suficiente para verificar la ley de conservación de la energía.

■ Fundamentación teórica

Cuando un objeto de masa m cae desde una altura H , su energía potencial gravitatoria, $E_p = mgH$, se transforma en energía cinética; en la expresión anterior, g es el valor de la aceleración debida al campo gravitatorio terrestre (Ballester y Barrio, 2008; Tipler y Mosca, 2005; Barradas y otros, 2010). Cuando el objeto choca contra el suelo, la colisión puede ser elástica o inelástica. En el primer caso, la energía cinética se conserva y el objeto rebota con la misma velocidad con la que llegó al suelo; en el segundo caso, la energía cinética no se conserva y el objeto emplea parte de (o toda) la energía cinética en modificar su estructura y/o en calentarse. Cuando la colisión es completamente inelástica, la energía cinética (referida al centro de masa del sistema que colisiona)

siona) se convierte íntegramente en energía térmica o energía de deformación del sistema y los dos cuerpos que chocan quedan unidos después de la colisión (Tipler y Mosca, 2005).

En el caso que nos ocupa, el objeto que cae es un conjunto de perdigones (de masa m), los cuales no rebotan tras llegar al suelo, de forma análoga a como sucedería con un saquito lleno de arena o de arroz. Como apenas se modifica su estructura interna, podemos suponer que toda la energía potencial inicial, $E_p = mgH$, se ha invertido en energía térmica, Q .

De esta forma, los perdigones se calentarán tras chocar contra el suelo, puesto que su temperatura aumentará en la cantidad ΔT , de acuerdo con la relación $Q = cm\Delta T$, donde c es el calor específico del plomo (Ballester y Barrio, 2008; Tipler y Mosca, 2005; Barradas y otros, 2010). Tras igualar la energía potencial gravitatoria y la energía térmica, se obtiene la siguiente relación: $gH = c\Delta T$. Por lo tanto, si se mide el incremento de tempe-

ratura ΔT de los perdigones y la altura H desde la que caen, podemos obtener el calor específico del plomo a partir de la siguiente expresión: $c = gH/\Delta T$. Como vemos, el resultado obtenido no depende de la masa m que cae.

Para obtener efectos apreciables conviene dejar caer los perdigones desde una altura H elevada. Pero como esto no suele ser posible en un aula, se reemplaza la caída desde una altura H por n caídas de los perdigones desde una altura h menor; de este modo, la altura neta desde la que caen los perdigones es $H = nh$.

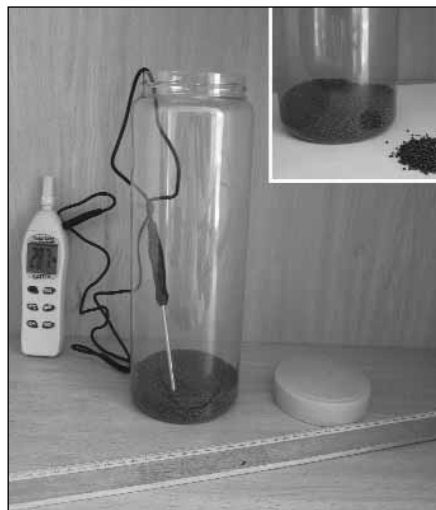
Si se supone que no hay pérdidas ni aporte de energía a través de las paredes del recipiente que contiene los perdigones y que tampoco se le suministra energía extra además de la correspondiente a la energía potencial gravitatoria de la caída libre, el calor específico del plomo se obtendrá mediante la expresión $c = gmh/\Delta T$, donde todas las magnitudes a la derecha de la igualdad son conocidas.

Procedimiento experimental

Para realizar la experiencia se emplearon los materiales que se detallan a continuación y que aparecen en la imagen 1:

- Bote de plástico cilíndrico (bastante más alto que ancho). En las tiendas multiprecio se puede conseguir un recipiente como el de la imagen 1 por un poco más de 1 euro.
- Regla o cinta métrica.
- Termómetro que aprecie la décima de grado y cuyo tiempo de respuesta no sea muy lento.
- Perdigones de plomo (aproximadamente 0,5 kg).

Imagen 1. Materiales empleados para realizar la experiencia: recipiente cilíndrico, regla graduada, termómetro y perdigones de plomo (los cuales se aprecian mejor en el recuadro superior derecho)



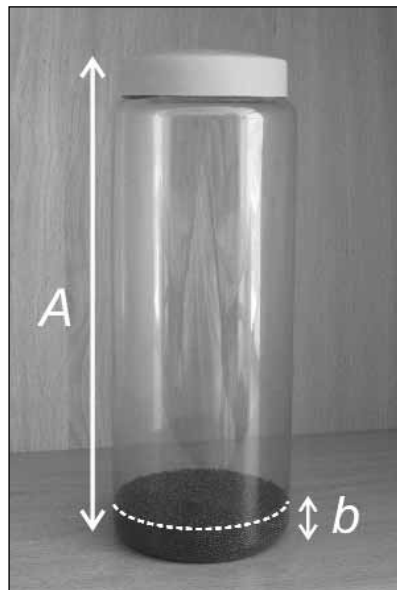
Antes de comenzar a realizar la experiencia se advierte a los alumnos que, dada la toxicidad del plomo, no deben tocar con las manos los perdigones (lo cual, por desgracia, les resulta muy tentador) y han de evitar que éstos se desparramen fuera del bote (para no contaminar el medioambiente). Por este motivo, es el profesor quien se habrá encargado de poner (usando guantes o un cacillo) una determinada cantidad de perdigones dentro de cada bote; la cantidad exacta no es relevante, ya que el resultado no depende de m , tal como se ha mencionado en el apartado donde se expone la fundamentación teórica de la experiencia.

En primer lugar, se procura que los perdigones formen una capa de altura homogénea y con la regla se determina su altura (b) y la del recipiente (A), las cuales aparecen ilustradas en la imagen 2. De este modo se obtiene la altura $h=A-b$ desde la que cae el centro de masa de los perdigones, que es aproximadamente la misma desde la que cae cada perdigón.

Seguidamente, se mide la temperatura inicial de los perdigones (T_i) situando el extremo de la sonda térmica del termómetro en el centro de la capa de perdigones, tal como se aprecia en la imagen 1.

Tras extraer el termómetro se cierra bien la tapadera del bote y se insiste a los alumnos que la sostengan con firmeza (para evitar que se destape y se escapen los perdigones). Con el bote bien cerrado y firmemente agarrado hay que dejar caer los perdigones n veces. Para ello, se voltea el bote $n = 100$ veces (se toma este valor para obtener efectos apreciables), de manera que en cada vuelta los perdigones caigan verticalmente sin rozar con las paredes y procurando no darle ninguna sacudida,¹ lo cual supondría una aportación extra de energía que no se puede cuantificar numéricamente.

Al finalizar la última vuelta del bote, se abre éste con cuidado y se mide la temperatura de los perdigones (T_f), tal como se hizo al principio.



RAFAEL GARCÍA MOLINA

Imagen 2. La altura del bote es A y la de la capa de perdigones es b . Se considera que la altura desde la que caen los perdigones es $h = A - b$

| Sustancia | Calor específico J kg ⁻¹ °C ⁻¹ | Sustancia | Calor específico J kg ⁻¹ °C ⁻¹ |
|-----------|---|---------------|---|
| Oro | 126 | Cobre | 385 |
| Plomo | 128 | Hierro | 449 |
| Platino | 133 | Arena | 835 |
| Mercurio | 140 | Sal (NaCl) | 879 |
| Estaño | 228 | Aluminio | 900 |
| Plata | 235 | Hielo (-10°C) | 2050 |
| Latón | 380 | Agua | 4186 |

Cuadro 1. Calores específicos de varias sustancias en condiciones normales, recopilados de diferentes textos (Sears y otros, 2004; Tipler y Mosca, 2005; Ballester y Barrio, 2008). Los datos se presentan ordenados por orden creciente de valores

■ Resultados

Los valores que se miden para h son algo menores de 25 cm, mientras que los incrementos de temperatura típicos ($\Delta T = T_f - T_i$) rondan los dos grados Celsius. Por lo tanto, los valores que los alumnos obtienen para el calor específico del plomo oscilan alrededor de algo más de $100 \text{ J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$, lo cual está en bastante buen acuerdo con el valor correspondiente al plomo que aparece en el cuadro 1, que es $c = 128 \text{ J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$; aunque el calor específico de una sustancia depende de la temperatura, en esta experiencia podemos considerar que c es constante (dado el pequeño rango de temperaturas involucradas). En el cuadro 1 también aparecen los calores específicos de otras sustancias, para justificar por qué se realiza esta experiencia con plomo, ya que entre los materiales que tienen menor c , el plomo es el más barato. Si hubiésemos elegido un material más barato que el plomo, como la arena, cuyo calor específico es más elevado ($835 \text{ J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$), habría que voltear el recipiente unas 400 o 500

veces para obtener un incremento de temperatura de alrededor de un grado. Si se realizara la experiencia con agua ($c = 4186 \text{ J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$), tal como se propone en un ejercicio del libro de Tipler y Mosca (2005), habría que voltear el bote de plástico casi 2000 veces para que la temperatura del agua aumentara un grado Celsius.

Aunque son numerosos los alumnos que obtienen un valor de c que se aproxima bastante al valor tabulado para el calor específico del plomo (por una fortuita coincidencia, algunos resultados coinciden muy bien con el valor tabulado), también hay otros alumnos cuyos resultados difieren (aunque no mucho) del valor que aparece en las tablas, lo cual les produce cierta frustración. En este punto es importante recordar que la dispersión que presentan los datos es consustancial a todo proceso de medida, ya que hay diversos factores que pueden influir en la calidad del resultado obtenido, especialmente en el tipo de experiencia que se acaba de realizar (por los materiales y el procedimiento empleado). Tras una breve discusión con los alumnos,

Es importante recordar que la dispersión que presentan los datos es consustancial a todo proceso de medida, ya que hay diversos factores que pueden influir en la calidad del resultado obtenido, especialmente en el tipo de experiencia que se acaba de realizar

éstos inmediatamente identifican las posibles causas que pueden contribuir a las fluctuaciones de los valores obtenidos para el calor específico del plomo.

Entre las posibles causas que afectan a las variaciones del resultado final destacan las que proceden de medidas incorrectas de las variables n , h , T_i y T_f que intervienen en la expresión de c y, también, las que están relacionadas (de una forma u otra) con la conservación de la energía, tales como:

- Pérdida de energía a través de las paredes del bote (que no es un recipiente perfectamente aislado).
- Aportación extra de energía mediante el calor de las manos o agitando los perdigones (en lugar de dejarlos caer libremente).
- Rozamiento de los perdigones con las paredes verticales del recipiente (si la caída no es vertical).
- Energía potencial menor de la prevista, si el bote no se dispone en posición completamente vertical.

Tras poner en común todas las medidas realizadas (que fueron 164), se procedió a realizar un análisis estadístico para caracterizar la muestra de valores obtenidos. Para ello se calculó el valor medio \bar{c} y la desviación típica s de la muestra

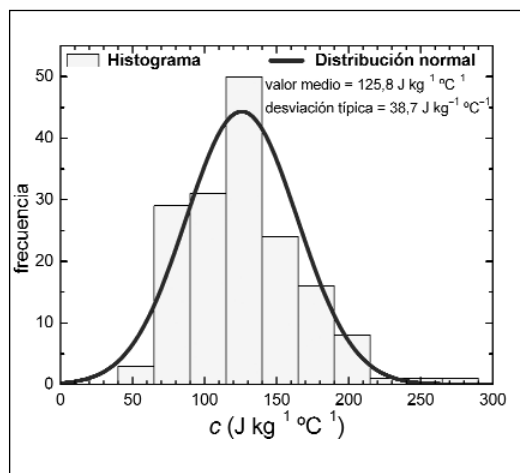
$$\bar{c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i = 125,8 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

y

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i - \bar{c})^2} = 38,7 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

donde c_i es el calor específico obtenido en cada una de las $N = 164$ medidas disponibles.

En el cuadro 2 se ha representado la distribución normal caracterizada por el valor medio \bar{c} y la variación s^2 que se ha obtenido en la experiencia. También se ha representado el histograma de resultados obtenidos. Para la anchura de las casillas del histograma se ha usado $25 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, que es aproximadamente el valor óptimo correspondiente a un conjunto de datos con una distribución normal (Heald, 1984). Puede comprobarse que el acuerdo es bastante satisfactorio, lo cual otorga un valor añadido a la puesta en común de los valores obtenidos por los alumnos.



Cuadro 2. Histograma de los resultados obtenidos, \bar{c} junto con la distribución normal cuyo valor medio y desviación típica s se indican en la figura

Entre las posibles causas que afectan a las variaciones del resultado final, destacan las que proceden de medidas incorrectas de las variables y, también, las que están relacionadas con la conservación de la energía

Puesto que el error e asociado a una medida sujeta a errores aleatorios es la desviación típica de la media (Somoza y otros, 2001), el error asociado al valor medio \bar{c} , calculado con N datos, será $\varepsilon = \sigma / \sqrt{N} = 3 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. De este modo, el resultado final se puede escribir como $c = 126 \pm 3 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, lo cual está en muy buen acuerdo con el valor $c = 128 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ correspondiente al plomo, que aparece en el cuadro 1 (p. 38).

Como puede comprobarse, el tratamiento estadístico de todos los datos proporciona un resultado sensiblemente mejor que el que pudiera obtener cada alumno de forma individual, además de poner claramente de manifiesto la naturaleza aleatoria de los errores de medida, lo cual conduce a la familiar distribución normal.

■ Conclusiones finales

Esta experiencia fue diseñada por su brevedad (aproximadamente 30 minutos) y bajo coste para que la realizaran los alumnos de bachillerato que visitaron la Universidad de Murcia para familiarizarse con los laboratorios científicos antes de elegir la titulación que estudiarán (García Molina, 2008).

Dadas las características de la experiencia, puede implementarse fácilmente como actividad práctica en el currículo de bachillerato y también en los primeros cursos universitarios. Dependiendo del nivel académico de los estu-

diantes, durante el desarrollo práctico se pueden abordar los siguientes temas:

- Comprobación de la ley de conservación de la energía.
- Discusión de las colisiones elásticas e inelásticas.
- Verificación de la equivalencia entre trabajo y energía térmica.
- Determinación del calor específico de un material (plomo, en este caso).
- Realización de un análisis estadístico de los resultados obtenidos por un grupo numeroso de estudiantes.

Notas

- * AGRADECIMIENTOS. Deseo dar las gracias a Nuria Piñol Ferrer por su valiosa colaboración durante las visitas de los estudiantes de bachillerato a la Universidad de Murcia y por la recopilación de sus resultados numéricos.
1. Conviene advertir a los alumnos que no se trata de tocar las maracas.

Referencias bibliográficas

- BALLESTERO JADRAQUE, M.; BARRIO GÓMEZ DE AGÜERO, J. (2008): *Física y Química. 1º Bachillerato. Proyecto Tesela*. Madrid. Oxford Educación.
- BARRADAS SOLAS, F. y otros (2010): *Física y Química. 1º Bachillerato. Proyecto La Casa del Saber*. Madrid. Santillana.
- GARCIA MOLINA, R. (2008): «Determinación del calor específico del plomo». *Experiencias de Física y de Química en la Universidad de Murcia para alumnos de Bachillerato*. Murcia. Universidad de Murcia.
- HEALD, M. A. (1984): «On choosing the bin width of a Gaussian histogram». *American Journal of Physics*, núm. 52, p. 254.
- MEINERS, H.F. (1970): *Physics Demonstration Experiments*. 2 vols. Nueva York. Ronald Press.

SEARS, F.W. y otros (2004): *Física Universitaria*. México. Pearson Educación.

SOMOZA, A.M. y otros (2001): *Laboratorio de Física*. Murcia. Diego Marín Librero Editor.

SUTTON, R.M. (ed.) (1938): «H-176 Mechanical equivalent of heat. Shot tube», en *Demonstration Experiments in Physics*. Nueva York. McGraw-Hill, p. 244. También disponible en línea en: <<http://physicslearning.colorado.edu/PiraHome/Sutton/Sutton.htm>>.

TIPLER, P.A.; MOSCA, G. (2005): *Física para la ciencia y la tecnología*. Barcelona. Reverté.

Dirección de contacto

Rafael García Molina

Universidad de Murcia

rgm@um.es

Este artículo fue solicitado por Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales en junio de 2011 y aceptado en diciembre de 2011 para su publicación.