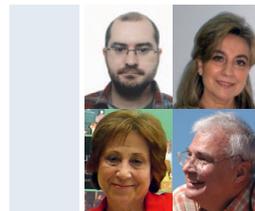


Construcción y estudio de una máquina de vapor sin partes móviles



Esteban Moreno Gómez *, M.ª José Gómez Díaz

VACC-CSIC. El CSIC en la Escuela

**M.ª Carmen Refolio Refolio y
José M.ª López Sancho**

IFF-CSIC. El CSIC en la Escuela

Palabras clave

Máquina de vapor, barco, aplicación para el aula, caldera, calor, evaporación, cantidad de movimiento, termodinámica, leyes de conservación, Papin, Newton.

Resumen

En este trabajo presentamos una propuesta de aplicación al aula, basada en el estudio de un caso concreto, el conocido motor de vapor sin piezas móviles originario del siglo XIX, patentado por Tomas Píot en el Reino Unido en 1891 y subsiguientemente patentada en otros países por diferentes inventores.

El estudio de la máquina, realmente ingeniosa, se presenta inicialmente de manera que se comprenda de una forma intuitiva y se trata con detalle el proceso de construcción.

Una vez que el alumno se ha familiarizado con la máquina y su funcionamiento, el conocimiento que ha adquirido se puede utilizar para introducirle en los principios físicos de su funcionamiento claves en el desarrollo industrial de la máquina de vapor, protagonista de la revolución industrial. Se proponen otras experiencias para el aula para asimilar el principio de acción-reacción y la conservación de la cantidad de movimiento.

Esta aplicación para el aula se contempla como complemento a los cursos de formación del profesorado sobre mecánica que imparten los autores.

Presentación del barco objeto de la investigación

La primera operación que realizaremos será la de presentarles el barco de vapor terminado y en marcha, de manera que realice también la función de experimento provocador (**Imagen 1**).

.....
* E-mail del autor: esteban@orgc.csic.es.



Imagen 1. Distintas perspectivas del barco.

El barco está construido de manera que permita ver la máquina que lo impulsa (**Imagen 2**). Los materiales son fáciles de encontrar y el barco es sencillo de construir. Como podemos observar, el barco se desplaza con una velocidad suficiente para que podamos, si lo deseamos, dotarlo de un timón clásico que lo dirija, permitiéndonos estudiar el momento de las fuerzas que produce la máquina, aplicando los contenidos del curso de formación científica del profesorado *Mecánica: las leyes de Newton*.

Como en toda operación de ingeniería inversa debemos plantearnos, conjuntamente con nuestros alumnos, una estrategia apropiada. En primer lugar identificaremos los elementos esenciales de la máquina y sus funciones.

El casco, constituido por la placa de poliestireno, corcho o de cualquier tipo de material de poca densidad, aun-

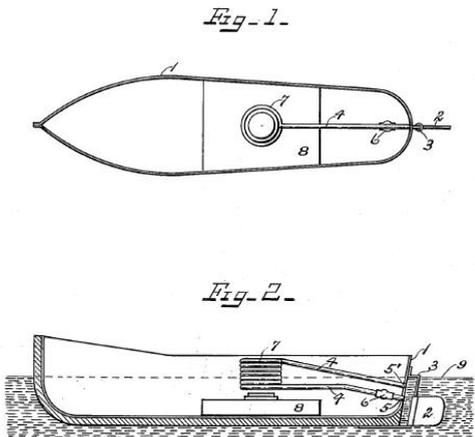


Imagen 2. Barco de vapor «pop pop boat» según el diseño patentado de William Purcell (1920).

que también se puede utilizar algún material transparente que permita ver el interior. El casco es el encargado de proporcionar flotación al barco y, como tal, puede ser objeto de estudio, como aplicación del principio de Arquímedes y de las leyes del equilibrio que hemos estudiado en los cursos de formación del profesorado (*Mecánica: estática y principio de Arquímedes*).

La **máquina**, formada por:

- La **caldera** que está constituida por la parte del tubo de cobre lleno de agua y por la llama de la vela que proporciona energía calorífica.
- La **tobera**, formada por la parte del tubo que sobresale por la popa y juega el papel de la hélice en los barcos convencionales. Es la parte encargada de proporcionar propulsión al barco (**Imagen 3**).

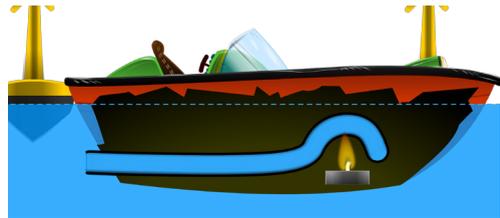


Imagen 3. Adaptación a un casco de barco comercial de la máquina de nuestro barco.

Construcción práctica del barco

En primer lugar realizaremos un modelo de la máquina, utilizando un cable de cobre de los utilizados en las instalaciones eléctricas de las viviendas. Enrollamos el cable sobre un cilindro de unos dos centímetros y medio y fabricamos una espiral de unas pocas vueltas (**Imagen 4**). Nosotros hemos utilizado un modelo de 5 espiras, pero sin duda se puede modificar y mejorar mediante ensayos, por ejemplo también hemos desarrollado un modelo de 2 espiras (**Imagen 1**).



Imagen 4. Realización del modelo de máquina de cinco espiras con cable de cobre.

Una vez terminado el modelo lo extraemos del cilindro y completamos el diseño. Es conveniente realizar tres o cuatro modelos iguales, de manera que podamos deshacer alguno si fuese necesario, para realizar medidas o compararlo con variaciones introducidas más tarde.

A continuación, utilizando el modelo como patrón, comenzamos la construcción de la máquina de vapor real. Para ello medimos la longitud del cable utilizado y cortamos la longitud correspondiente de tubo de cobre o latón y separamos la longitud necesaria utilizando una herramienta de corte para tubos de fontanería (**Imagen 5**).

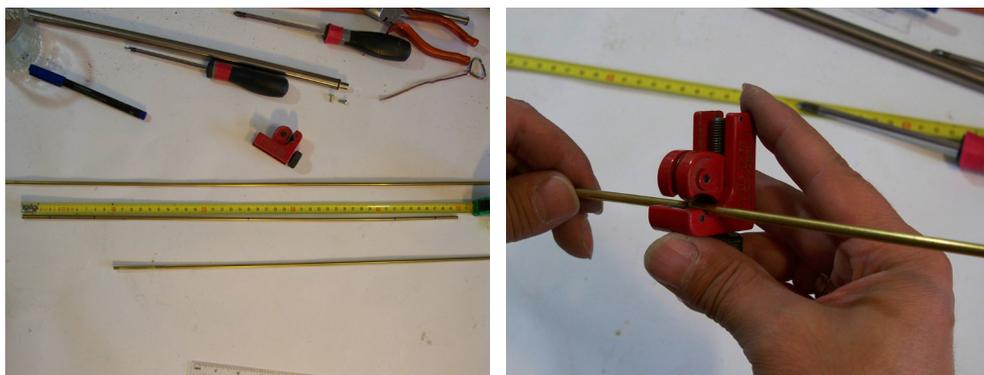


Imagen 5. Medida del tubo necesario y corte del mismo.

Como vamos a tener que curvar el tubo, es imprescindible llenarlo de arena previamente, de manera que evitemos que se colapse en la operación de fabricación de la espiral. Y para llenarlo de arena debemos cerrar uno de los extremos. Nosotros hemos utilizado un tornillo de rosca de chapa. Seguidamente procedemos a llenar el tubo de latón con arena suficientemente fina (**Imagen 6**).

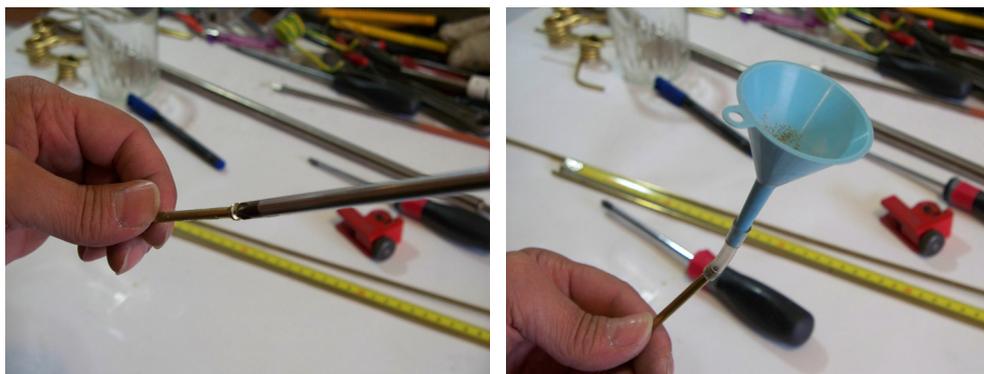


Imagen 6. Relleno del tubo con arena fina.

Una vez que el tubo este relleno de arena cerramos el extremo que habíamos dejado abierto. Nos encontramos así con un tubo preparado para fabricar la espiral. En ese tubo señalamos los puntos en los que debe comenzar a curvarse y las partes rectas finales de las toberas, y comenzamos la operación de curvado. Volvemos a utilizar el molde que usamos en la fabricación del modelo, ahora para realizar la máquina final (**Imagen 7**).

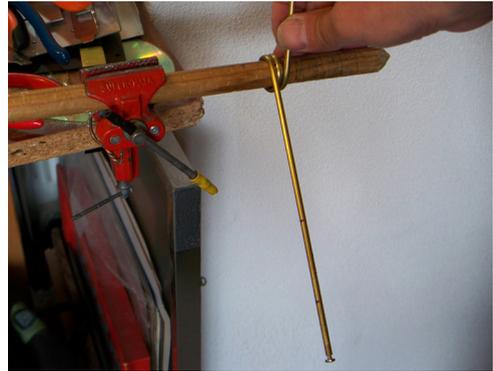
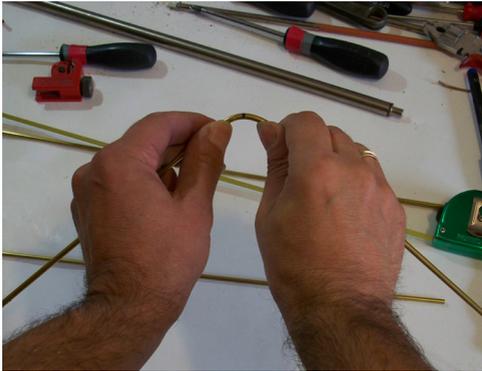


Imagen 7. *Fabricación del tubo en espiral.*

Una vez terminada la espiral nuestro trabajo debe presentar el siguiente aspecto, todavía con la arena en el interior del tubo (**Imagen 8**).

Extraemos la espiral y doblamos los extremos por los puntos señalados previamente, de manera que queden rectos y paralelos. A continuación doblamos de nuevo los extremos del tubo que se convertirán en toberas y habremos terminado el moldeado de la máquina de vapor y liberamos los extremos del tubo para extraer la arena (**Imagen 9**).



Imagen 8. *Espiral terminada.*

De esta forma habremos terminado la construcción de la máquina de vapor (**Imagen 10**). A este tubo, que forma la caldera y tobera de la máquina de vapor, tendremos que añadirle la caldera, es decir, una llama, para lo cual podemos usar una vela o una lamparilla de aceite; nunca de alcohol, por lo peligroso que puede resultar su uso en el aula.

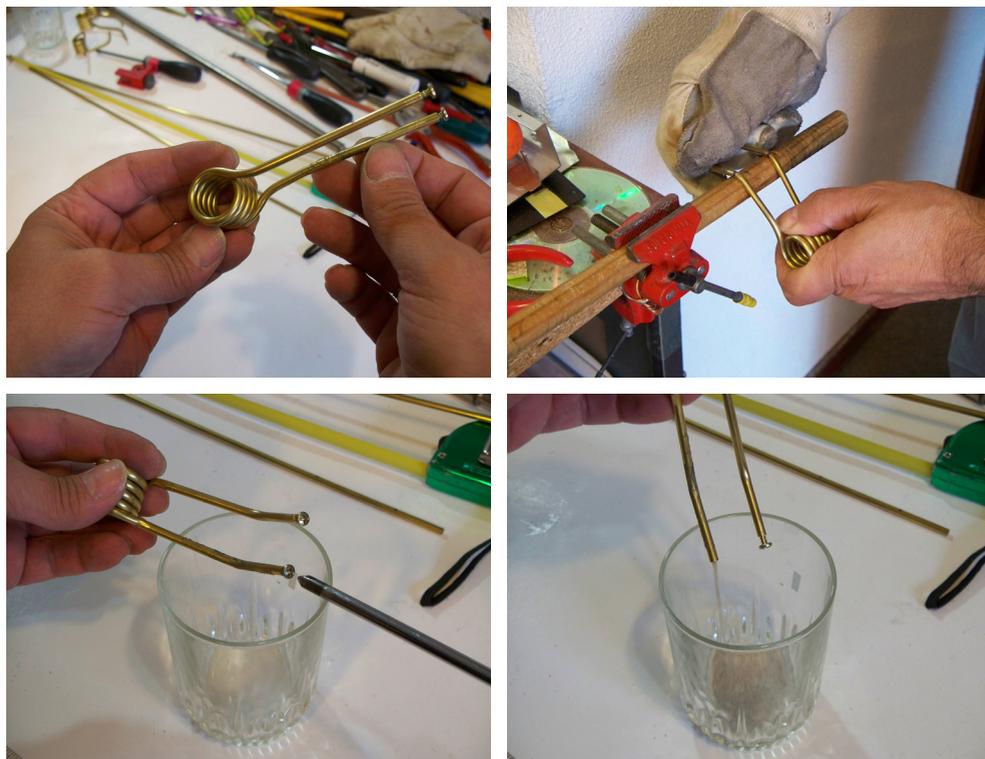


Imagen 9. Extracción de la espiral, preparación de los extremos y vaciado de arena.

La operación siguiente será la de construir un casco capaz de flotar con el peso de la máquina. Esta operación puede servir para repasar el principio de Arquímedes, sobre todo si hemos utilizado un tubo de diámetro grueso.

Debemos tener en cuenta que el casco deberá soportar el peso del tubo lleno de agua más el de la vela o lamparilla de aceite que utilizemos como combustible. Nosotros hemos utilizado una plancha de poliestireno expandido para ese fin. Sobre el trozo de plancha se ha fijado la espiral y se ha añadido la fuente de calor. Dándose así por terminado el barco (**Imagen 11**).

Si queremos conseguir más realismo podemos emplear un casco más sofisticado, incluso tomando como modelo los que surcaban el Misisipi en el siglo XIX.



Imagen 10. Nuestra máquina terminada.



Imagen 11. Fase final de la construcción del barco.

Funcionamiento de la máquina de vapor y producción de los impulsos de agua

Partimos de la situación inicial en la que el tubo de cobre que forma la caldera está lleno de agua. Este punto es esencial para el funcionamiento de la máquina y se consigue inyectando agua a presión por uno de los tubos con una jeringuilla, hasta que salga por el otro.

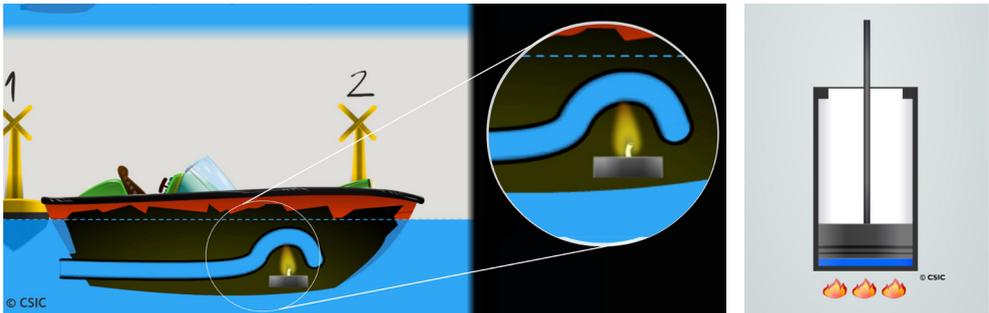


Imagen 12. Funcionamiento del barco y comparativa con la fase inicial de una máquina de Papin.

A partir de esta situación inicial (tubo lleno de agua), que corresponde al punto inicial del primer tiempo del ciclo, aplicamos la llama de la lamparilla al extremo cerrado o curvado del tubo (**Imagen 12**).

El calor de la combustión de la cera se transmite al tubo de cobre y calienta el agua que se encuentra en su interior. Este aporte de calor hace aumentar la temperatura del agua hasta llegar a la temperatura de ebullición (**Imagen 13**).

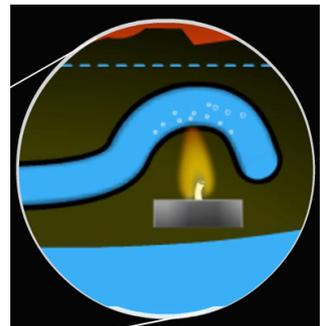


Imagen 13. Inicio de la ebullición.

La ebullición del agua del extremo produce vapor a la presión suficiente como para desplazar al agua líquida, que se ve obligada a salir por la tobera de popa del barco con una cierta velocidad de salida (**Imagen 14**).

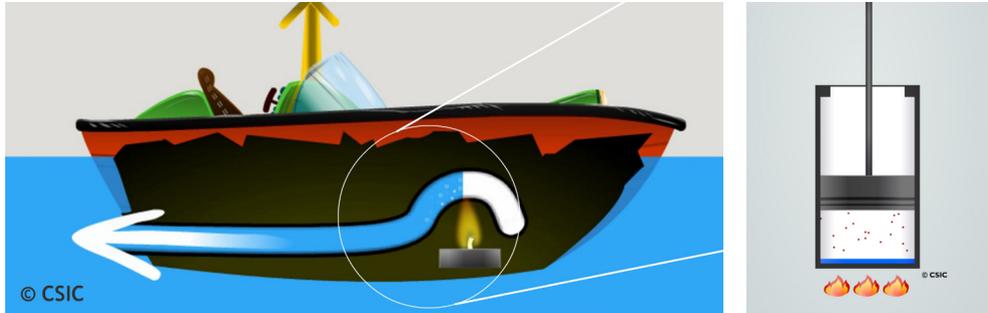


Imagen 14. Inicio del escape del agua por la tobera y comparativa con la fase equivalente de una máquina de Papin.

Esta situación corresponde al final del primer tiempo del ciclo (**Imagen 15**).

Pero al aumentar el volumen ocupado por el vapor a lo largo del tubo, alcanza una región que está a una temperatura inferior a los 100 grados centígrados y que antes estaba ocupada por el agua líquida. Al llegar a esa región fría del tubo el vapor de agua se condensa, volviendo a su estado líquido. El agua del exterior, empujada por la presión atmosférica, llena de nuevo el tubo de cobre (**Imagen 16**).

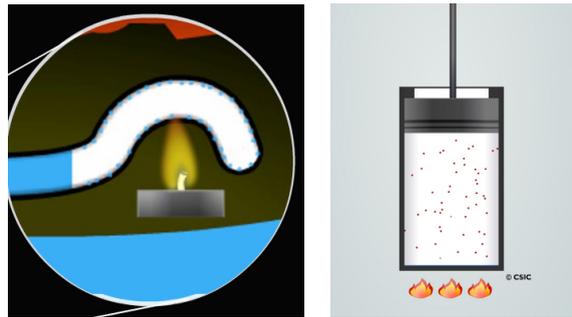


Imagen 15. Comparativa de nuestra máquina y la Papin.

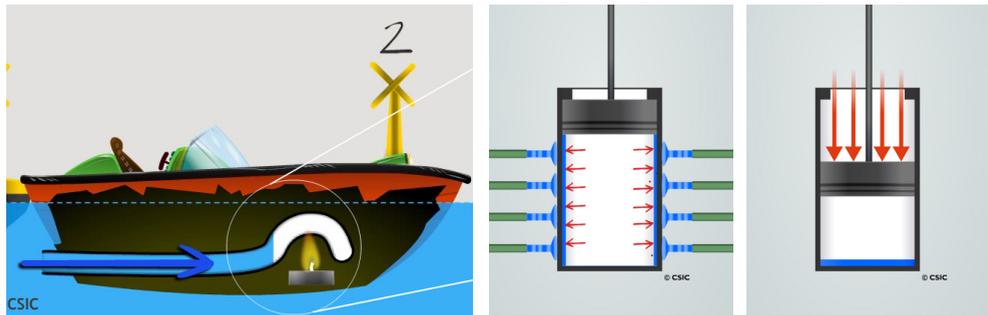


Imagen 16. Tras la condensación el agua llena de nuevo el tubo. Comparativa con la máquina de Papin.

Al condensarse, el volumen del gas se contrae unas mil veces y la superficie del agua dentro del tubo vuelve de nuevo a la situación inicial (**Imagen 12**). En esencia este es el funcionamiento de nuestra máquina.

Estudio de nuestra máquina de vapor

Llegados a este punto podemos volver a observar el funcionamiento de nuestro barco. Podemos preguntar a nuestros alumnos la razón por la que el barco avanza y someter las respuestas a la opinión de la asamblea. Finalmente, para salir de dudas optaremos por poner la mano en la salida de los tubos de cobre con objeto de observar lo que ocurre.

El resultado de la observación pone de manifiesto lo elemental del proceso: los tubos expelen agua de manera pulsante (con una frecuencia de un impulso cada dos o tres segundos aproximadamente) que hace avanzar al barco por *el principio de acción y reacción*. Este es un mecanismo utilizado por muchos animales marinos, entre los que se encuentran los calamares y las medusas (**Imagen 17**).

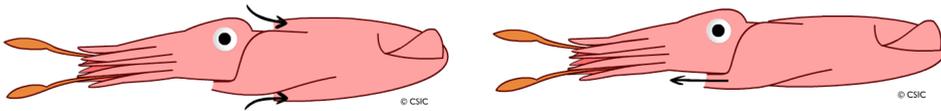


Imagen 17. Ilustración esquemática del mecanismo impulsor de un calamar.

Las leyes de Newton

Esto nos lleva a preguntarnos por las leyes de Newton, que justifican el avance de nuestro barco. Podemos aprovechar la ocasión y recordar las tres leyes, explicando la importancia de las mismas.

Primera ley

La formulación original, tal como aparece en su libro, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, es:

Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare.

Cuya traducción libre es: «Todo cuerpo abandonado a sí mismo (sobre el que no actúan fuerzas) permanece en el estado de reposo o movimiento en que se encuentra».

Segunda ley

Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressæ, & fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.

Cuya traducción libre es: «El resultado de aplicar una fuerza a un cuerpo es el producir una variación de su cantidad de movimiento» (producto de la masa por la velocidad) en la dirección y sentido de la fuerza, es decir,

$$F = m \cdot a$$

Tercera ley

Actioni contrariam semper & æqualem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse æquales & in partes contrarias dirigi.

Cuya traducción puede ser: «A toda acción (fuerza) se opone siempre una reacción igual y en sentido contrario, es decir, las acciones mutuas entre dos cuerpos siempre son iguales, en la misma dirección y en sentido opuesto».

La primera tarea que debemos realizar es la de conseguir que nuestros alumnos se familiaricen con la segunda y tercera ley de Newton, de manera que el camino didáctico cumpla con el requisito de Ausubel (aprendizaje significativo).

Para ello realizaremos el experimento del globo unido a una pajita que se desliza a lo largo de un hilo por un proceso *de acción y reacción* o de *conservación de la cantidad de movimiento*. El proceso es el mismo que el que ocurre en los cohetes que ponen en órbita los satélites o que viajen por el sistema solar (**Imagen 18**).

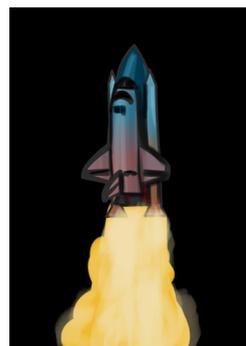
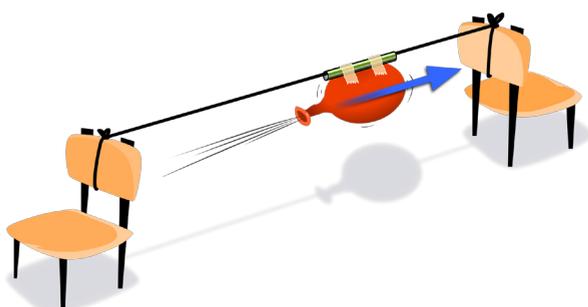


Imagen 18. Ilustraciones: experiencia para el aula con un globo-cohete dirigido y cohete con transbordador.

Podemos realizar diferentes experimentos con artilugios fáciles de construir (**Imagen 19**).

La explicación de lo que ocurre es muy sencilla, pero de enorme importancia, y nos servirá para introducir algunos conceptos que sirven como definición de magnitudes físicas.

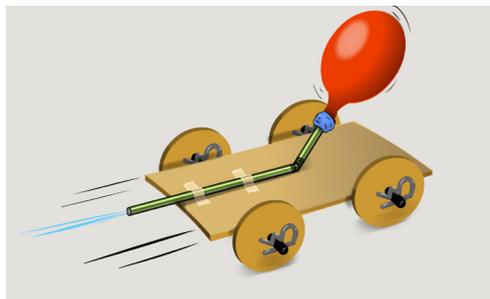


Imagen 19. Experiencia para el aula montaje con ruedas de un cohete-globo.

Definimos *la cantidad de movimiento de un cuerpo como el producto de su*

masa por la velocidad que lleva respecto a nosotros. Así, la cantidad de movimiento de un coche cuya masa es de mil kilogramos y su velocidad 60 kilómetros por hora (16,666 metros por segundo) es de 16.666 kilogramos·metro/segundo. Como es lógico *la cantidad de movimiento es un vector* cuya dirección y sentido coinciden con los del vector velocidad.

Leyes de conservación

El concepto de cantidad de movimiento es muy importante en ciencia, ya que pertenece a un tipo especial de leyes que se llaman *leyes de conservación*. Al nivel de precisión en que nos movemos podemos hablar de la ley de conservación de la masa, intuitiva por los griegos y enunciada por Lavoisier a finales del siglo XIX.

También podemos citar la ley de conservación de la energía, enunciada por Hermann von Helmholtz en 1847, apoyándose en los trabajos de Benjamín Thomson (casado durante poco tiempo con la viuda de Lavoisier), Sadi Carnot y Émile Clapeyron. Como es lógico la ley solo pudo enunciarse tras elaborar el concepto de energía, que en enseñanza se suele mostrar algo escurridizo.

Podemos enunciar con nuestros alumnos multitud de leyes de conservación, basadas en la conservación de los objetos rígidos; así se conservan el número de canicas, de monedas, etc. En cambio, si hacemos bolas de plastilina podemos unir dos bolas pequeñas para formar otra mayor, *no* conservándose en este caso el número de bolas. Un estudio experimental muy simple nos llevará a comprobar que lo que se conserva en este caso es el valor de la masa.

Volviendo a nuestra historia, una de las leyes de conservación más importantes es la de la conservación de la cantidad de movimiento. Todos tenemos un conocimiento intuitivo de esta ley, cuyos resultados hemos visto mil veces en las películas cuando se dispara un cañón (**Imagen 20**) o cuando jugamos con una manguera de agua por la que salga el líquido con una cierta presión.

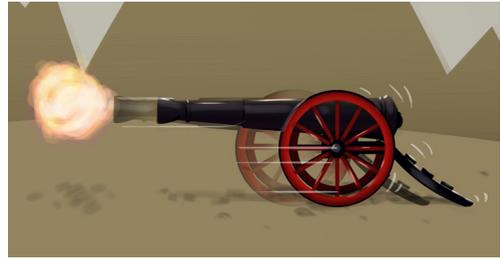


Imagen 20. Ilustración del retroceso al disparar un cañón.

También sabemos todos que el disparo de una escopeta produce un fuerte retroceso del arma, lo que corresponde también al principio de conservación (**Imagen 21**).



Imagen 21. Ilustración del principio de conservación de la cantidad de movimiento en una escopeta.

Podemos realizar un experimento muy sencillo, subidos a un monopatín con un objeto de masa (m), apreciable, por ejemplo una bola de bolera. Cuando estamos en reposo tanto la velocidad (v) del objeto como la del monopatín y la nuestra (que llamaremos M) es nula.

$$(m + M) \cdot v = 0$$

A continuación lanzamos el objeto con la máxima velocidad (v) que podamos comunicarle en dirección paralela al eje del monopatín (**Imagen 22**).



Imagen 22. Experimento para estudiar la conservación de la cantidad de movimiento.

Ya que su cantidad de movimiento antes y después debe ser la misma, es decir, nula respecto al sistema de referencia (en este caso el aula).

$$\text{cantidad de movimiento del objeto} = m_1 \cdot v_1 + M_2 \cdot V_2 = 0$$

Para que la cantidad de movimiento del objeto más la del carrito con nosotros encima siga siendo nula, nosotros y el carrito tendremos que movernos en sentido contrario con una cantidad de movimiento que tenga el mismo módulo:

$$M_2 \cdot V_2 = -m_1 \cdot v_1$$

Es fácil calcular nuestra velocidad de retroceso:

$$V = \frac{m \cdot v}{M}$$

Para fijar ideas sobre el principio de conservación de la cantidad de movimiento podemos construir un cohete de agua (**Imagen 23**). En internet podemos encontrar instrucciones para ello.

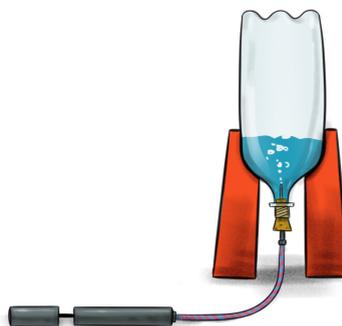


Imagen 23. Ilustración de un cohete de agua.

Conclusiones

Con este trabajo hemos completado las diferentes propuestas para introducir a los docentes en el estudio de la máquina de vapor, que iniciamos en el número seis de esta misma serie. Las experiencias, aportaciones y sugerencias que año tras año nos hacen llegar los maestros adscritos al programa *El CSIC y la FBBVA en la Escuela*, impulsaron esta serie de artículos.

Siempre dependerá del criterio del maestro y de la edad de sus alumnos, la profundidad con la que tratar este tema en su aula, pero creemos que como mínimo deben abordarse, con especial cuidado, los conceptos (a menudo confundidos entre sí) de *calor* y *temperatura* sin los cuales no podemos llegar a los de *trabajo* y *energía*. También debe hacerse especial énfasis en el funcionamiento de la máquina de Papin, y sus variaciones para el aula, por resultar un recurso didáctico de primer orden.

Para finalizar nunca insistiremos lo suficiente en la conveniencia de tratar cualquier tema de ciencia en el aula desde una perspectiva histórica.

Agradecimientos

Esta publicación forma parte de las actividades de comunicación social de la ciencia previstas en el *Proyecto El CSIC y la FBBVA en la Escuela 2013-2015* que cuenta con la financiación de la Fundación BBVA.

Recursos complementarios

Barco de vapor sin partes móviles para el aula. Museo Virtual de la Ciencia (CSIC). Recursos Complementarios. [En línea]: <http://museovirtual.csic.es/recursos/recursos_csic_escuela4.htm>.

Aplicaciones. Ciencia en el Aula. Mecánica: <<http://www.csicenlaescuela.csic.es/proyectos/mecanica/experiencias/eI.htm>>.

Aplicaciones. Ciencia en el Aula. Flotación: <<http://www.csicenlaescuela.csic.es/proyectos/flotacion/experiencias/eI.htm>>.

Impulsión de las medusas. Youtube: <<http://www.youtube.com/watch?v=4o2aEpwUT7s>>.

Cohete de agua. Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Cohete_de_agua>.

Cohete de agua. Liceo Web Blog: <<http://liceoweblog.wordpress.com/2011/05/19/>>.

Referencias bibliográficas

MORENO GÓMEZ, E.; GÓMEZ DÍAZ, M. J.; REFOLIO REFOLIO, M.^a C.; LÓPEZ SANCHO, J.M. *Análisis termodinámico de un diseño conceptual de máquina de vapor debida a Papin*. Serie El CSIC en la Escuela. Investigación sobre la enseñanza de la ciencia en el aula. N.º 10. Editorial CSIC. 2014.

NEWTON, I. *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. Cambridge Digital Library. Londres 1687. [En línea]: <<http://cudl.lib.cam.ac.uk/view/PR-ADV-B-00039-00001/9>> [consulta octubre 2013].

Pop pop boat. Wikipedia. [En línea]: <http://en.wikipedia.org/wiki/Pop_pop_boat> [consulta octubre 2013].