

# Petardos, cohetes y mucha química

Petards, coets i molta química

Firecrackers, rockets and a lot of chemistry

Fernando Ignacio de Prada Pérez de Azpeitia / IES Las Lagunas. Rivas (Madrid)



## resumen

Los espectaculares efectos que producen petardos y cohetes están relacionados con la ciencia, por lo que pueden ser aprovechados como un inusual y atractivo recurso didáctico para la química. Con esto se pretende conseguir aumentar el interés de los estudiantes hacia la ciencia, a la vez que ampliar el conocimiento sobre las reacciones químicas relacionadas con su vida cotidiana. Las experiencias propuestas han sido realizadas por estudiantes ante un público muy variado en ferias de ciencia divulgativas.

## palabras clave

Petardos y química, cohetes y química, pirotecnia química.

## resum

Els espectaculars efectes que produeixen els petards i coets estan relacionats amb la ciència, per la qual cosa poden ser aprofitats com un inusual i atractiu recurs didàctic per a la química. Amb això es pretén aconseguir augmentar l'interès dels estudiants cap a la ciència, alhora que ampliar el coneixement sobre les reaccions químiques relacionades amb la vida quotidiana. Les experiències proposades han estat realitzades per estudiants davant un públic molt variat en fires de ciència divulgatives.

## paraules clau

Petards i química, coets i química, pirotècnia química.

## abstract

The spectacular effects produced by firecrackers and rockets are based on the science. They can therefore be used as an unusual and attractive didactic resource for chemistry learning. What we intend is to extend scientific knowledge and to increase the interest of students towards chemical reactions related to daily life situations. The suggested experiments have been carried out by students and presented to varied audiences in science fairs.

## keywords

Firecrackers and chemistry, rockets and chemistry, pyrotechnics chemistry.

## Introducción

Sin ninguna duda, la aplicación de la química más lúdica y que durante siglos ha provocado (y sigue provocando) más asombro y diversión en todas partes del mundo es la relacionada con los fuegos artificiales. En estos espectáculos arden todo tipo de

artículos pirotécnicos responsables de originar chispas brillantes, cascadas de colores y sonidos estruendosos.

Desde el punto de vista de la química, todos los artículos pirotécnicos están formados básicamente por la mezcla íntima de una sustancia que aporta oxígeno

y actúa como agente oxidante (nitrate de potasio, clorato de potasio, etc.) y varios combustibles que actúan como agentes reductores (carbón vegetal, azufre, hierro, magnesio, etc.). Cuando se aplica calor y se supera la energía de activación, se produce una reacción de transferencia de

electrones (óxido-reducción). Los átomos de los combustibles ceden electrones a los átomos del oxidante. Como consecuencia, se forman nuevos enlaces entre los átomos del reductor y los átomos de oxígeno liberados por el oxidante, originando un producto más estable y liberando energía en diferentes formas (calorífica, luminosa, mecánica).

Aunque los artificios pirotécnicos se utilizan habitualmente con fines recreativos y de entretenimiento, explotando el atractivo que tienen para los estudiantes de cualquier nivel, pueden ser utilizados como un sorprendente recurso didáctico para la química con el fin de aumentar el interés hacia esta ciencia y generar futuras vocaciones.

Los artefactos pirotécnicos más conocidos y utilizados son el tradicional petardo y el clásico cohete. Por su sencillez, pero con sus siempre sorprendentes efectos trueno y propulsor, es posible sacarles provecho en el aula como aplicación y demostración de principios fundamentales de la química, a la vez que para realizar un estudio estequiométrico de las reacciones químicas implicadas.

En química, como en toda actividad que implique cierto riesgo, es necesario seguir siempre unas normas básicas de seguridad y tener presente el proverbio «Seguridad es felicidad». Por esta razón, en las experiencias se han utilizado los petardos y cohetes más pequeños dentro de la categoría 2, de baja peligrosidad, que ni son muy potentes ni muy ruidosos. Aunque la carga de pólvora negra que contienen es muy pequeña (en general, no excede de varias décimas de gramo), es conveniente utilizar guantes y gafas de seguridad y, cuando sea necesario, una cápsula de seguridad de plástico resistente como pantalla protectora. En algunas experiencias se ha utilizado una

claraboya de metacrilato de alta densidad, empleadas en la construcción para aprovechar la luz natural; en otras, una cúpula de policarbonato, que recubren y protegen las bombillas de las farolas. Las experiencias que se explican han sido mostradas en diversos eventos científicos (fig. 1). El último de ellos fue el IV Finde Científico, organizado en el Museo Nacional de Ciencia y Tecnología (Madrid, 2013).

no) como consecuencia de reacciones químicas exotérmicas. Cuando se unen varios petardos entre sí mediante un estopín pirotécnico (mecha), se forma una traca.

El componente principal de todos los petardos es la pólvora, producto responsable de originar el efecto trueno causado por la ignición de la mezcla pirotécnica comprimida. Para analizar su contenido, rompemos el cilindro



Figura 1. Demostraciones de química y pirotecnia en el IV Finde Científico.

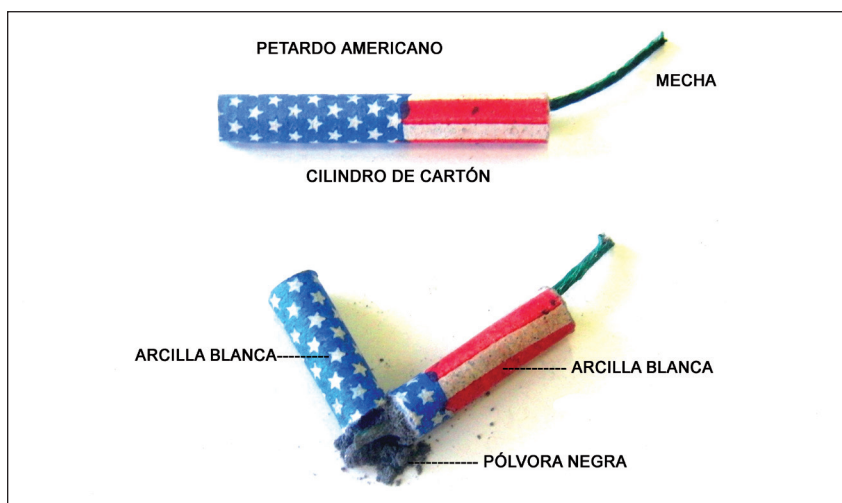


Figura 2. Componentes de un petardo.

### Petardos, pólvora y energía

Según el Reglamento de artículos pirotécnicos (BOE n.º 113, de 8 de mayo de 2010), un petardo es un artefacto que contiene materia detonante destinada a producir un efecto sonoro (efecto true-

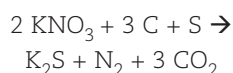
de cartón que forma el petardo. Se puede observar que contiene dos tipos de sustancias: una es un polvo de color negro, la pólvora negra, que se encuentra entre otra sustancia, arcilla blanca (bentonita) o yeso, que no inter-

viene químicamente, pero sí físicamente. La mecha tiene como finalidad llevar el fuego desde el exterior del petardo hasta la pólvora del interior, con el propósito de proporcionar la energía de activación necesaria para la combustión.

Según se cree, la pólvora fue inventada por los chinos y reinventada en Europa durante la Edad Media por el alquimista inglés Roger Bacon. Las proporciones de sus componentes han permanecido prácticamente inalteradas hasta nuestros días: 75 % de nitrato de potasio, 15 % de carbón vegetal y 10 % de azufre (fig. 2). Esta mezcla se caracteriza porque, a partir de 300 °C, arde muy rápidamente mediante una aportación moderada de energía. Al quemarse, libera aproximadamente 1300 J en forma de calor por cada gramo de pólvora.

La rápida combustión y la temperatura de los gases liberados (2500 °C-3500 °C) sitúan la combustión de la pólvora en la categoría de las deflagraciones: combustiones con una velocidad de propagación de la llama comprendida entre 1 m/s y la velocidad del sonido, que en el aire y a 20 °C es de 340 m/s. Cuando se supera este límite, se denomina *combustión supersónica* y se clasifica la sustancia como detonante.

La pólvora solo explota si se la comprime fuertemente en un recipiente herméticamente cerrado debido a la violenta formación de gases calientes en expansión, según la reacción global:



Además de las sustancias que aparecen en la reacción, se pueden formar otros subproductos, como, por ejemplo, monóxido de carbono y carbonato de potasio.

Según la reacción anterior, si la combustión del carbono y del

azufre fuese total, 202 g de nitrato (2 moles) se combinarían con 36 g de carbono (3 moles) y con 32 g de azufre (1 mol) para obtener 110 g de sulfuro de potasio (1 mol), 28 g de nitrógeno (1 mol) y 132 g de dióxido de carbono (3 moles). Como consecuencia, la relación estequiométrica de los reactivos, expresada en porcentajes, es la siguiente:

$$\begin{aligned} (202 \text{ g KNO}_3 / 270 \text{ g pólvora}) \cdot 100 &= 75 \% \text{ KNO}_3 \\ (36 \text{ g C} / 270 \text{ g pólvora}) \cdot 100 &= 13 \% \text{ C} \\ (32 \text{ g S} / 270 \text{ g pólvora}) \cdot 100 &= 12 \% \text{ S} \end{aligned}$$

Químicamente, la proporción exacta para la pólvora negra es: 75 % de nitrato de potasio, 13 % de carbono y 12 % de azufre. Una pólvora con menor porcentaje en nitrato originaría una combustión más lenta e incompleta, generándose monóxido de carbono.

Los petardos americanos utilizados en estas demostraciones contienen 0,1 g de pólvora. Si consideramos que la pólvora del petardo ha sido elaborada en la proporción clásica (75/15/10), podemos suponer que está compuesta por 0,075 g de nitrato de potasio, 0,013 g de carbono y 0,012 g de azufre. A partir del dato de la energía liberada por gramo de pólvora (1300 J), resulta que en cada petardo se desprende una energía de 130 J (fig. 3).

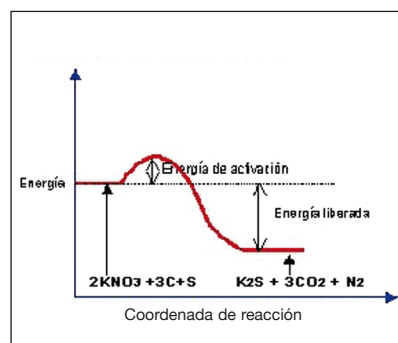


Figura 3. Diagrama energético de la combustión de la pólvora negra.

Los fabricantes pirotécnicos modifican la velocidad de combustión de la pólvora cambiando parámetros químicos, como las proporciones entre los reactivos, y parámetros físicos, como el tamaño y la uniformidad del grano. Cuanto más finos sean los granos, mayor superficie de contacto habrá y más rápida será la combustión. Se puede decir que preparar una buena pólvora es tanto un arte como una ciencia.

### Estequiometría de la combustión de la pólvora

El combustible fundamental que forma parte de la pólvora clásica es el carbón vegetal. La mayor parte de los residuos que deja la combustión de la pólvora negra en forma de humo son cenizas de carbón, que puede llegar hasta el 50 % de la masa inicial de la pólvora. Esto causaba que, durante las batallas en que se empleaba pólvora negra para disparar armas de fuego, se creara en el ambiente una gran humareda que dificultaba la visión de las posiciones del enemigo. Además, dejaba residuos en el cañón del arma, lo que hacía necesaria una limpieza frecuente para evitar su corrosión. Por estas razones, se creó otro tipo de pólvoras, denominadas *sin humo*, basadas en la nitrocelulosa, que no dejaban prácticamente residuos sólidos, por lo que no tenían los inconvenientes anteriores.

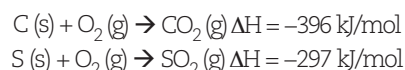
El segundo combustible de la pólvora, el azufre, es un elemento sólido de color amarillo que tiene como función mejorar la estabilidad de la mezcla y aumentar la velocidad de propagación de la combustión. El azufre funde a 115 °C y tiene una temperatura de ignición más baja que el carbón vegetal, sobre 250 °C, lo que favorece que la pólvora empiece a arder.

En el siguiente experimento es posible comprobar el comportamiento químico de los dos combustibles en presencia del oxígeno del aire:

— Añadir 1 g de carbón vegetal en una cápsula de porcelana y hacer lo mismo en otra cápsula con 1 g de azufre. Al acercar la llama de una cerilla, no se observa que se inicie la combustión en ninguno de los casos.

— A continuación, aumentar la temperatura calentando las cápsulas con un mechero Bunsen. En la cápsula del carbón vegetal, se observan unas pequeñas chispas y humo. En el caso del azufre, primero se funde y posteriormente aparece una pequeña llama azulada, desprendiéndose dióxido de azufre. Este es un gas irritante para el sistema respiratorio, por lo que es recomendable hacerlo en un lugar bien ventilado o bajo una campana de seguridad. En ambos casos, la combustión se produce, pero con una velocidad de reacción muy baja.

Las reacciones de la combustión del carbono y del azufre son las siguientes:



Un aumento en la concentración del oxígeno ocasionará un aumento en la velocidad de reacción, favoreciéndose la combustión y haciéndola más rápida y vigorosa, si bien la cantidad total de energía desprendida seguirá siendo la misma. Para conseguir este efecto, se añade un comburente, el nitrato de potasio (salitre), un fuerte oxidante que aporta el oxígeno necesario para una rápida y total combustión, según la reacción endotérmica:



Si en lugar del nitrato de potasio se utiliza un oxidante más fuerte, como el clorato de potasio, los combustibles arden más rápidamente y con mayor poder explosivo. Este efecto se explica porque el clorato, que funde a 368 °C, cede todo el oxígeno que contiene (el nitrato solo cede una tercera parte) durante su descomposición a temperaturas superiores a 400 °C.



— En presencia de un comburente que proporcione más oxígeno, en vez de arder lentamente, se produce una rápida combustión acompañada de chispas doradas y de un humo gris, causado por el carbono que no ha reaccionado (fig. 4).

La reacción que tiene lugar en la mezcla de carbón y clorato de potasio fundido es la siguiente:

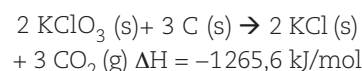


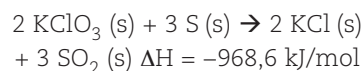
Figura 4. Combustión del carbón vegetal combinado con clorato de potasio.

De las ecuaciones de descomposición de ambos reactivos se deduce que, por cada 2 moles de nitrato, se desprende 1 mol de oxígeno, y en la descomposición de 2 moles de clorato, se originan 3 moles de oxígeno.

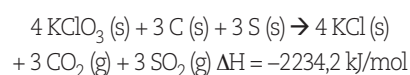
Para comprobar el efecto del comburente sobre el carbón y el azufre, se repite el experimento anterior, pero en esta ocasión añadiendo el oxígeno que proporciona el clorato de potasio descompuesto:

— Añadir a una cápsula de porcelana que contenga aproximadamente 1 g de carbón vegetal una cucharada pequeña con una pizca (unos 0,5 g) de clorato de potasio, previamente calentado y fundido con la llama de un mechero Bunsen.

— Ahora, en el interior de una campana de seguridad, añadir otro poco de clorato de potasio fundido a la cápsula que contiene una pizca de azufre (unos 0,5 g). En este caso, se produce una fulgurante y luminosa combustión.



La reacción global de la combustión total de la pólvora formada por los tres componentes anteriores y la entalpía de la reacción se obtiene de la suma de las combustiones parciales del carbono y del azufre, de acuerdo con la ley de Hess.



De la estequiometría de la reacción se pueden establecer las cantidades exactas de combinación entre los reactivos: 490 g de clorato (4 moles) reaccionan con 36 g de carbono (3 moles) y con 96 g de azufre (3 moles). Con estas cantidades se elaboraría una mezcla de 622 g, de la que se deducen los porcentajes estequiométricos teóricos para la pólvora elaborada con clorato de potasio:

$$\begin{aligned} (490 \text{ g KClO}_3 / 622 \text{ g pólvora}) \cdot 100 &= 78,8 \% \text{ KNO}_3 \\ (36 \text{ g C} / 622 \text{ g pólvora}) \cdot 100 &= 5,8 \% \text{ C} \\ (96 \text{ g S} / 622 \text{ g pólvora}) \cdot 100 &= 15,4 \% \text{ S} \end{aligned}$$

Si repetimos los cálculos realizados para el petardo que contenía 0,1 g de pólvora negra, pero sustituyendo el nitrato por clorato de potasio y utilizando la nueva relación (78,8/5,8/15,4), se puede concluir que estaría compuesta por 0,0788 g de clorato de potasio, 0,0058 g de carbono y 0,015 g de azufre. Con el dato de la entalpía de la reacción, se obtiene que la energía liberada es casi el triple que la energía desprendida por la pólvora negra, demostrándose que la pólvora gris libera mucha más energía que la negra.

$$0,0058 \text{ g C} \cdot (1 \text{ mol C} / 12 \text{ g C}) \cdot (2234,2 \cdot 10^3 \text{ J} / 3 \text{ mol C}) = 360 \text{ J}$$

### ¿Por qué explota un petardo?

Para comprender por qué explota un petardo, doblamos uno de ellos por la mitad y lo abrimos sin que se lleguen a separar las dos partes, de forma que la pólvora quede a ambos lados del cilindro abierto. Colocamos el petardo sobre una cápsula de porcelana y encendemos la mecha. Un par de metros de distancia de seguridad son suficientes en esta demostración.

Después de arder la mecha durante unos 4 s, observamos

que no se produce la explosión de la pólvora: simplemente se produce una pequeña llamarada (fig. 5).

Es importante comprobar que, al doblar y abrir el petardo, la pólvora se encuentre justo en esa zona. De esta forma, los gases generados durante la combustión no se encuentran comprimidos y son liberados a presión atmosférica.



Figura 5. Combustión de un petardo abierto.

Como conclusión, la pólvora sin comprimir arde rápidamente, pero si se comprime fuertemente, como en los petardos, donde se encuentra aprisionada por un cilindro de cartón y un sólido inerte (arcilla), explota a consecuencia de la formación de gases a elevada presión y temperatura. Este efecto es similar a la explosión de un globo que no soporta la excesiva presión que ejerce el aire cuando se ha inflado demasiado.



Figuras 6 y 7. Combustión y explosión de azufre con clorato de potasio.

El efecto explosivo de la pólvora se puede comprobar con solo dos de sus componentes, el azufre y el clorato de potasio (fig. 6 y 7):

— Mezclar bien una pizca de azufre (unos 0,5 g) con otra pizca de clorato de potasio sobre una superficie resistente (piedra de granito). Dividir la mezcla en dos partes aproximadamente iguales, separadas por una distancia suficiente para que no reaccionen simultáneamente. Es importante no utilizar cantidades mayores a las indicadas para que la experiencia sea segura.

— Con guantes y gafas de seguridad, aproximar la llama de una cerilla o mechero a una de las porciones preparadas. Se observa que la mezcla arde rápidamente, liberando calor, luz y humo.

— Repetir el procedimiento con la otra porción de la mezcla, pero, en esta ocasión, golpeándola con un martillo.

— En este caso, se produce una estruendosa reacción. Curiosamente, la energía liberada es la misma que en la porción que ha ardido, pero, al hacerlo de forma instantánea, se origina una onda expansiva a causa de la explosión. Al golpear la mezcla, hay que ponerse cascos para proteger los oídos del ruido y el resto debe dejar una distancia de seguridad para atenuar el sonido de la deflagración.

El azufre, al mezclarse con el clorato, forma una mezcla sensible a los golpes y a la fricción, pudiendo originar una reacción explosiva.

## Pólvora y extinción de fuego

Parece contradictorio que una sustancia como la pólvora pueda sofocar un incendio. Sin embargo, al igual que para apagar pozos petrolíferos en llamas se emplean explosivos, se pueden apagar algunos tipos de fuego con pólvora. De hecho, existen en el mercado extintores que basan su efecto en una pequeña carga de pólvora que, al arrojarse a un fuego incipiente y explotar, asfixian el fuego. Simultáneamente, extienden un producto extintor que impide que este se reanude.

Es fácil demostrar el efecto de extinción de la pólvora sobre el fuego mediante una sencilla experiencia (fig. 8):

— Colocar verticalmente (con ayuda de un soporte o nuez de laboratorio) unas pequeñas velas dispuestas en círculo sobre una bandeja metálica.



Figura 8. Extinción de llamas por la pólvora de un petardo.

— Situar verticalmente, en el centro de las velas, un petardo sujetado con otro soporte.

— Encender primero las velas y, seguidamente, la mecha del petardo. Rápidamente, taponarlo todo con una cúpula de seguridad.

— Después de la explosión del petardo, se comprueba que las velas se han apagado.

Si tenemos en cuenta que la combustión de la pólvora no necesita oxígeno del aire para arder, no podemos deducir que el petardo consume todo el oxígeno del interior de la cápsula y que por esta razón el fuego de las velas se apaga. La explicación radica en la rápida liberación de productos gaseosos incombustibles (dióxido de carbono, nitrógeno, etc.) que ocupan un volumen unas cuatrocientas veces mayor al inicial, apartando el oxígeno de las velas, que no pueden continuar ardiendo y se apagan.

La pólvora puede utilizarse en la extinción de fuego debido a la rápida formación de gases no combustibles, que retiran el oxígeno de la zona del fuego y de esta forma lo asfixian y sofocan.

## Combustión bajo el agua

El agua se ha utilizado tradicionalmente como agente extintor de fuego, principalmente debido a su alto calor específico y a su elevado calor latente de vaporización. *A priori*, parece que no es posible que un petardo situado dentro del agua pueda explotar. Sin embargo, es posible comprobar de forma segura que esto sucede y, además, observar un curioso fenómeno relacionado con transformaciones de energía química en energía física:

— Sujetar un petardo por la parte superior con unas pinzas metálicas y situarlo medio metido en el cuello de una botella de plástico. Se ha utilizado una botella de agua mineral de plástico de 330 mL, llena de agua hasta la mitad, aproximadamente.

— Encender la mecha del petardo y dejarlo caer en el interior de la botella de plástico.

— Rápidamente, cubrir la botella con un cilindro de plásti-

co, que puede ser un tubo utilizado en el deporte del tenis para recoger las pelotas o una lámina de plástico resistente y enrollada varias veces sobre sí misma.

— Después de esperar los segundos que tarda la mecha en llegar a la pólvora, el petardo explota dentro del agua e inmediatamente la botella se eleva sobre la superficie (fig. 9).

Hay que dejar que la mecha prenda bien antes de soltar el petardo (de lo contrario, podría apagarse) y nunca se deben utilizar botellas de vidrio, porque podrían estallar.



Figura 9. Propulsión de una botella por un petardo.

El efecto de la explosión se debe a que la pólvora no necesita oxígeno del aire para arder y explotar, ya que contiene su propio comburente, que le proporciona el oxígeno. Los gases generados en la combustión, al encontrarse en un volumen reducido, salen impulsados hacia arriba, produciéndose una fuerza de reacción que actúa sobre la mesa, la cual ejerce una fuerza normal sobre la botella y, como consecuencia, esta se eleva. En esta experiencia se produce la transformación de energía química, contenida en la pólvora, en energía calorífica y en energía mecánica (cinética y potencial), que adquiere la botella.

Teniendo en cuenta que por cada petardo utilizado se liberan 130 J, si se aprovechara toda esa energía, una botella de 330 mL llena de agua, en teoría, podría elevarse hasta 40 m. En realidad,

de toda la energía liberada en la combustión, solo se transforma un porcentaje muy reducido en energía potencial mecánica, el cual no llega al 5 %.

### Cohetes y efecto propulsor de la pólvora

Otro de los artículos pirotécnicos más utilizados en las fiestas y celebraciones de todo tipo son los cohetes. A diferencia de los petardos, estos artefactos, antes de explotar, se elevan sobre el suelo. Están fabricados con un cilindro de cartón duro, que contiene dos cargas de pólvora diferentes, unido a una varilla de madera fina, que tiene como finalidad estabilizar su trayectoria y que no se desvíe. En el interior del cohete (fig. 10) se diferencian dos zonas:

— La parte inferior, que no se encuentra cerrada ni comprimida, por donde entra la mecha de encendido y salen los gases de la combustión. La mecha está conectada con la primera carga, formada por 0,2 g de pólvora negra con efecto propulsor.

— La parte superior, comprimida por arcilla blanca, formada por 0,05 g de pólvora gris conectada con la mecha, que produce el efecto sonoro de estampido al

llegar a la máxima altura. La pólvora gris contiene clorato de potasio para dotarla de mayor potencia explosiva.

Cuando la mecha encendida llega hasta el interior del cohete, el calor que transmite enciende la primera carga de pólvora. Los gases liberados, junto con la energía desprendida en la deflagración, se expanden rápidamente, escapando por la salida existente en la parte inferior del cohete. Como consecuencia, y debido a la tercera ley de la dinámica de Newton, se produce simultáneamente una fuerza de reacción en la misma dirección pero en sentido opuesto a la salida de los gases, lo que origina que el cohete salga propulsado hacia el cielo.

Mientras el cohete asciende, por su interior el fuego se sigue propagando hacia la segunda carga de pólvora a través de la mecha. Al llegar a lo más alto del vuelo, se produce la deflagración de la pólvora y, como se encuentra comprimida, en esta ocasión, origina un pequeño estampido.

Los cohetes grandes pueden elevarse centenares de metros antes de realizar varias etapas y efectos. En su interior, contienen

### Se introducen junto a las cargas de pólvora otras sustancias pirotécnicas, como metales pulverizados y sales metálicas

unos pequeños tubos rellenos de pólvora o mechas de retardo, que facilitan la transmisión del fuego de una etapa a otra. Modificando la composición de las mechas de retardo, se puede ajustar con precisión el retardo entre las fases, que puede variar de 1 a 8 s. Para que se produzcan diferentes efectos explosivos (estrellas luminosas, luces brillantes, colores espectaculares, etc.) en cada etapa, se introducen junto a las cargas de pólvora otras sustancias pirotécnicas, como metales pulverizados y sales metálicas.

Para analizar el efecto propulsor de la pólvora contenida en un pequeño cohete, se propone la siguiente experiencia:

— Pegar un cohete con cinta adhesiva a la parte superior de un pequeño coche. Acortar la varilla del cohete para que no interfiera en el movimiento.

— A continuación, colocar el coche en el extremo de un cilindro de plástico resistente, de 1 m de longitud, con el extremo final cerrado pero agujereado para que los gases puedan salir.

— Encender el cohete. Al arder la primera carga de pólvora, se produce la salida de los gases de la combustión por la tobera inferior del cohete. Como resultado, y de acuerdo con la ley de acción-reacción, el coche es impulsado hacia delante, avanzando por el interior del cilindro de plástico (fig. 11). Seguidamente, la mecha prende la segunda carga de pólvora y tiene lugar una pequeña deflagración en el interior del tubo protector.

Es posible medir la velocidad que transmite el cohete al coche



Figura 10. Interior de un pequeño cohete pirotécnico.

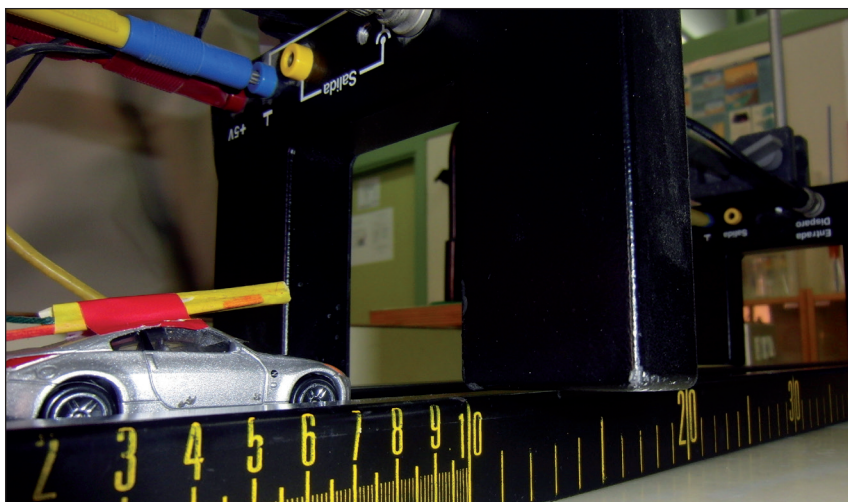


Figura 11. Efecto propulsor de un cohete unido a un coche.

utilizando un sistema de puertas fotoeléctricas. Con este dato y la masa del coche, se puede calcular la energía cinética adquirida y el rendimiento energético del proceso, que también es bastante reducido.

En otra experiencia se puede analizar el efecto propulsor de la pólvora utilizando como propelente pólvora sin humo (trinitrato de celulosa) en forma de papel o algodón. Este compuesto contiene suficiente oxígeno para convertir totalmente los productos de la combustión en gases ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{N}_2$ ) (fig. 12).

— Introducir una pequeña bolita de papel de nitrocelulosa en el fondo de un tubo de ensayo, cerrando el extremo con un tapón de corcho que lleva incorporada en el exterior una varilla para simular que es un cohete.

— Sujetar con unas pinzas de madera el tubo de ensayo y



Figura 12. Efecto propulsor de nitrocelulosa en un tubo de ensayo.

calentar la base con la llama de un mechero Bunsen.

— A los pocos segundos, en el interior del tubo se produce una repentina y sorpresiva combustión, seguida de la propulsión del tapón a varios metros de distancia, causada por la presión generada por los productos gaseosos formados.

### Conclusiones

La pirotecnia está rodeada de un halo mágico, atrae la atención, provoca fascinación y genera admiración, por lo que es un excelente recurso didáctico para la enseñanza de la química en todos sus niveles. Difícilmente se pueden encontrar experiencias y demostraciones más atractivas para los estudiantes que las relacionadas con los efectos pirotécnicos. De esta forma, utilizando el asombro como método de aprendizaje, se abren caminos para llegar más fácilmente hasta el conocimiento, a la vez que se consigue mayor motivación, aumentar las ganas de aprender y estimular futuras vocaciones. Muchas carreras científicas se han iniciado bajo el estímulo del atractivo de experimentos pirotécnicos realizados durante la juventud. La enseñanza de la química del siglo XXI debe estar rodeada de ilusión, imaginación y belleza.

### Bibliografía

- CONKLING, J. A. (1990). «Pirotecnia». *Investigación y Ciencia*, n.º 168, p. 58-65.
- COURTY, J.; KIERLIK, E. (2003). «300 estrellas de artificial». *Investigación y Ciencia*, n.º 324, p. 84-85.
- CHANG, R. (1999). *Química*. 6.ª ed. México: McGraw-Hill.
- FORD, A. (1993). *Chemical magic*. Nueva York: Dover.
- PARTINGTON, J. R. (1999). *A history of Greek fire and gunpowder*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- PERAL, F.; TROITIÑO, M.; CRUZ, M.; PLAZA, M. (2003). *Didáctica de la química y vida cotidiana: Química de los fuegos artificiales*. Madrid: ETS Ingenieros Industriales.
- PRADA, F. (2006). «El fuego: química y espectáculo». *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, vol. 102, n.º 2, p. 54-59.
- (2009). «El fuego como luminoso recurso didáctico». *Educació Química EduQ*, n.º 2, p. 11-15.
- (2013). «Fundamento científico de los artículos pirotécnicos». *Revista Eureka*, vol. 10, n.º 2, p. 273-281.



### Fernando Ignacio de Prada Pérez de Azepeitia

Es jefe del Departamento de Física y Química del IES Las Lagunas de Rivas (Madrid). Ha participado en eventos científicos divulgativos y en cursos para profesores en museos de ciencia y de arte. Es autor y coautor de trabajos y artículos en diversas revistas científicas, así como de libros de texto de física y química. C. e.: [pradaperez@hotmail.com](mailto:pradaperez@hotmail.com).