

Cohetes de agua

Ciencia, técnica y diversión

Antonio Bernal González

*Para todos los niños
que sueñan con ser astronautas
y para los adultos
que fomentan su ilusión.*

1. Cómo funciona un cohete

Las bases físicas de los cohetes

La manguera que serpentea sin cesar

El disparo de una pistola

La acción y reacción en astronáutica

Los aviones a reacción

Funcionamiento de un cohete

Funcionamiento de un cohete de agua

¿Cuánto sube?

2. Construcción de dos cohetes de agua

Cohetes de vinagre

Cohetes de aire comprimido

Maquillaje del cohete

Las aletas

La carga útil

Mejora del perfil aerodinámico

Mejora de la estabilidad

Cuánta agua poner

Una sesión de lanzamiento con niños de 10 a 12 años de edad

3. La plataforma de lanzamiento

Lanzadera de jardín

Base de lanzamientos de un tubo

Base de lanzamientos de tubos concéntricos

Trípode plataforma para base de lanzamientos

Un disparador remoto a cable

4. Carga útil. La parte mas delicada

El paracaídas

Doble del paracaídas

Mecanismo de lanzamiento del paracaídas

La cofia

El módulo de carga

La carga

El cohete terminado

5. Cálculos y medidas de un cohete

El empuje

La presión cambiante

La velocidad y la altura del cohete

La estabilidad

El desprendimiento

Cálculo del paracaídas

6. Software

Área de entrada de datos

Tanque

Aletas

Módulo de carga

Carga útil

Cofia

Contrapeso

Paracaídas

Datos del lanzamiento

Datos para los cálculos

Área de salida de datos

Plano del cohete

Área de datos y cálculos intermedios

Área de iteraciones

Trazado de curvas

Velocidad – altura

Cantidad de agua

Resultados logarítmico

7. Apéndices

Reglamento para una competencia de tiro al blanco

Reglamento para lanzamientos que quieran optar al récord mundial de altura

8. Referencias

Prefacio

Cuando llegué a Castelldefels hace ya más de siete años, me propuse, por consejo de Alfonso López, desarrollar unos talleres para dictar en colegios e institutos. El primero que se me ocurrió fue el de cohetes de agua que en ese tiempo eran bastante desconocidos en España, y empecé con mis escasísimos conocimientos del tema: sólo sabía que funcionan siguiendo la ley de la acción y reacción y que el empuje lo produce el agua al salir con violencia por la boquilla de la botella. Estuve todo el verano desarrollando un modelo y, cuando en el inicio del curso escolar 2002 – 2003 hice mi debut con chavales de sexto año, había lanzado más de 70 cohetes de prueba.

En ese tiempo recibí la ayuda muy valiosa de Guillermo Pérez que era estudiante de la ESO, con quien nos divertimos mucho lijando partes, pegando aletas y haciendo lanzamientos que casi todos eran fracaso pero tenían el incentivo de uno que otro éxito. También recibí ayuda de mi amigo Eladio Gandía, un “manitas” empedernido que colaboró con el desarrollo de la base de lanzamientos y gozaba como niño pequeño cuando veía elevar cada cohete.

Durante todos estos años, habiendo hecho más de 500 lanzamientos, he visto las expresiones de admiración de niños y adultos al ver superadas sus expectativas de altura, he escuchado aplausos emotivos al ver abrirse un paracaídas y he percibido la ilusión en los rostros de miles de niños que sueñan con ser astronautas.

Cuando sentí que mi cohete modelo llegaba a su madurez y desde que logré mi primer 20/20 (20 lanzamientos, 20 aperturas de paracaídas), pensé que algún día pondría todas mis experiencias en un libro – aún a sabiendas de que no sería para todos los públicos – y ese libro ahora ve la luz. He puesto en él todos los detalles que me ha sido posible, desde el procedimiento trivial para pegar una aleta a una botella de PET, hasta el intrínquis del cálculo de la estabilidad del cohete. Pero, eso sí, he dividido el libro en dos partes imaginarias: una, para que cualquiera haga y lance un cohete con pleno éxito, sin tener la más mínima noción de matemáticas (capítulos 1 al 4) y el resto para quien quiera hacer sus propios desarrollos o estudiar el comportamiento de un cohete determinado.

Con el libro entrego un software que he ido desarrollando desde que empecé con este taller. Es muy sencillo de manejar porque está hecho en formato de hoja de cálculo, una aplicación que casi todo el mundo conoce. Es un software que no se limita a calcular la altura en función de la presión y de la cantidad de agua, sino que ayuda a visualizar la estabilidad del cohete y a mejorar las probabilidades de que el paracaídas salga de su cubículo. Con él se pueden hacer análisis de las variables que influyen en el vuelo y se puede estudiar paso a paso lo que ocurre en cada una de las etapas, desde el momento del disparo hasta que el cohete toca tierra, con o sin paracaídas.

Viendo el libro terminado, no puedo menos que imaginarme el disfrute de quienes lo estudien, que seguramente será igual o mayor al que he sentido yo al escribirlo, pero en especial al ver el éxito de los lanzamientos.

Antonio Bernal González

1 Cómo funciona un cohete

Desde su invención en la segunda mitad del siglo XX, coincidiendo con la carrera espacial que llevó el hombre a la Luna, los cohetes de agua se han convertido en una herramienta didáctica de indiscutible valor para enseñar la nascente ciencia de la astronáutica y en una fuente de diversión para los aficionados, que están ahora tan organizados como los aeromodelistas o como estaban hace algunos años los radio aficionados. No se sabe a ciencia cierta a quién se le ocurrió la genial idea de hacer un modelo de cohete que funcione bajo las mismas leyes físicas que los cohetes de las agencias espaciales, pero sin utilizar materiales peligrosos como los derivados del petróleo o el hidrógeno líquido. Los primeros se hicieron en los Estados Unidos y se componían de tubos y accesorios de PVC, cosa que los complicaba mucho porque había que ser un verdadero “manitas” para montar tal rompecabezas. Pero en julio de 1983 apareció en la revista *Mother Earth News* (Noticias de la Madre Tierra) un artículo en el que se describía un cohete hecho con botellas plásticas de bebida y se daban instrucciones para hacer la base de lanzamientos y para poner en funcionamiento el cohete¹.

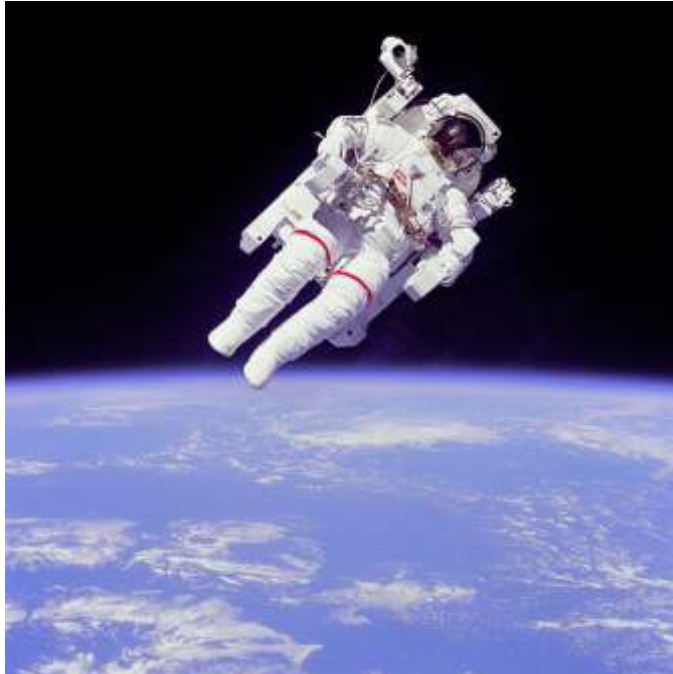
Hoy se realizan en todo el mundo competencias de altura alcanzada, de tiempo que el cohete está en el aire y de tiro al blanco. Son certámenes en los que la participación está reglamentada por una serie de normas que restringen el uso de ciertos materiales (como las partes metálicas) y que aseguran la medición exacta de los parámetros objeto de la competencia. En los apéndices se presentan dos de tales reglamentaciones: una “dura”, para competencias que pretenden alcanzar récords mundiales, que exigen la instalación a bordo de cámaras de vídeo, de altímetros y de otros instrumentos que garanticen la veracidad del récord; y otra más “blanda” para una competencia en la que pueden participar estudiantes de secundaria con proyectos más modestos pero serios.

En las competencias de altura se han alcanzado récords de más de 600 metros, pero esto se hace con sistemas muy elaborados que permiten elevar la presión hasta niveles muy altos. Los cohetes que presentamos aquí, se hacen con elementos de desecho, de los que se pueden conseguir en cualquier casa o en un... cubo de basura. Con ellos se pueden alcanzar con facilidad alturas entre 50 y 100 metros, que no son nada despreciables si las comparamos con un edificio de 25 plantas, que tiene unos 70 metros de altura.

Las bases físicas de los cohetes

Los cohetes, como los aviones a reacción, funcionan bajo el influjo de una de las leyes de la física enunciadas por Newton, –tercera ley del movimiento – con la que convivimos sin darnos cuenta, puesto que parece esconderse en la naturaleza. Pero sus resultados son sorprendentes. Se llama la Ley de la acción y reacción y dice que *a toda acción se opone una reacción igual y en sentido contrario*. La acción es originada por una fuerza como la que produce un cuerpo en movimiento acelerado (en este caso la

acción es en el sentido de la velocidad). El enunciado suena un poco abstruso para el lego, pero con un par de ejemplos se entiende perfectamente e incluso puede ser captada por niños de 9 ó 10 años, que todavía no conocen la esencia de conceptos de la física, como fuerza o aceleración.



El astronauta Bruce McCandless con su unidad de maniobra a la espalda.

La manguera que serpentea sin cesar

Pensemos, por ejemplo, en una manguera de jardín: está enrollada en el suelo, con la boquilla descansando sobre ella y el extremo opuesto conectado a un grifo cerrado. Viene alguien y abre de golpe el grifo con toda fuerza. ¿Qué ocurre en la boquilla de la manguera? Pues que da un tirón hacia atrás como si hubiera sido empujada por una fuerza invisible. Incluso, si dejamos el grifo abierto, la boquilla se quedará moviendo en vaivén a un lado y al otro. Analicemos lo que ha pasado. Al salir, el agua ejecuta una acción en la dirección de su movimiento, acción que, según la ley vista, provocará una reacción en sentido contrario. La reacción se traduce en una fuerza que empuja la boquilla hacia atrás y hace mover la manguera. Ahora bien, ¿de dónde viene la danza en vaivén que ejecutará la manguera si dejamos el grifo abierto? Sencillo: de la ley de la acción y la reacción. Cuando la manguera se mueve hacia atrás por reacción, la boquilla cambia de dirección puesto que la manguera está atada a sí misma, de manera que en un momento dado el agua acaba siendo lanzada en el sentido opuesto al original. La reacción, por supuesto, también ha cambiado de sentido y la manguera se mueve hacia el lado contrario, pero llega un momento en el que la fórmula se repite y el sentido del movimiento se vuelve a invertir.

El disparo de una pistola

Otro ejemplo muy común lo tenemos a diario dentro de casa y muchos, probablemente, dentro de la habitación. Se trata de uno de tantos disparos con arma de fuego que vemos todos los días en la tele. Saca un hombre la pistola, apunta, dispara y ¿qué le pasa a la mano? Pues que es empujada hacia atrás con violencia. Es la ley de la acción y la reacción. La acción la ejecuta la bala al salir hacia delante y esa acción produce una reacción que se traduce en una fuerza que, a su vez, empuja la pistola hacia atrás.



Tobera de un cohete desde la que se expulsan a alta velocidad los gases que lo impulsan. La salida de los gases se ha simulado en color gris.

La acción y reacción en astronáutica

En astronáutica, además de para los cohetes, la tercera ley de Newton se utiliza para que los astronautas puedan movilizarse en el espacio cuando salen a hacer actividades extra vehiculares (EVA). Cuando caminamos, podemos hacerlo porque nuestros pies se aferran al suelo: nos apoyamos en él; cuando nadamos, nos apoyamos en el agua a la que parecemos agarrar con las manos al braccar; cuando un ave vuela se agarra al aire

como el nadador al agua, como puede verse en las películas en cámara lenta que muestran el movimiento de las alas. Pero cuando un astronauta sale de su nave, está en el vacío del espacio en el que no hay ni tierra, ni agua, ni aire para apoyarse. Podría estar pateando y moviendo sus brazos indefinidamente y no se desplazaría de manera apreciable de su sitio.



En la ilustración se muestran diferentes tipos de cohetes en cuya parte baja se ven las toberas de forma acampanada. En el centro están el Saturno V, que llevó los primeros astronautas a la Luna y, a su lado, de color negro, el N1 soviético diseñado también para llegar a la Luna. Este cohete tenía 30 toberas que debían funcionar sincrónicamente, operación muy difícil que pudo ser la causante de su fracaso

Para moverse, un astronauta lleva a sus espaldas una mochila que tiene en su interior una botella de gas a presión y en el exterior una serie de boquillas por las que puede expulsar ese gas en varias direcciones. Cuando quiere desplazarse, expelle gas en la dirección opuesta a la que quiere tomar y automáticamente se produce la reacción que lo

hace mover. Si, por ejemplo, quiere subir, expulsará gas hacia abajo; si quiere ir hacia el frente, debe lanzar un chorro de gas hacia atrás. Incluso puede rotar con sólo producir un par de fuerzas no colineales y de sentido opuesto. Por ejemplo, si quiere girar hacia su derecha, deberá lanzar gas hacia atrás cerca de su brazo izquierdo y hacia delante cerca del derecho. Hasta hace unos años, los astronautas de la NASA utilizaban la llamada Unidad Humana de Maniobra (MMU) que posteriormente fue reemplazada por otra más pequeña y más fácil de manejar llamada SAFER. El astronauta puede disparar el gas por cualquiera de las boquillas, por medio de una botonera o de un *joystick*.

Los aviones a reacción

En un avión a reacción las turbinas lanzan gases hacia atrás a alta velocidad y la fuerza de la reacción impulsa el avión hacia el frente. Es de anotar que las turbinas lo único que hacen es impulsar el avión hacia delante, no lo hacen subir ni mantenerse en el aire. La sustentación es el resultado de la fuerza vertical que el aire induce sobre las alas, debido a la velocidad producida por las turbinas, de manera que se requiere una cadena de acontecimientos para que el avión vuele: la turbina expelle gases hacia atrás y el avión, por reacción, es empujado hacia el frente; al desarrollar velocidad, el aire pasa por las alas y ejerce sobre ellas una fuerza llamada levantamiento, que eleva el avión. Si las turbinas dejan de funcionar el avión planeará siempre y cuando la velocidad sea suficiente para que el aire produzca ese levantamiento.

Funcionamiento de un cohete

Un cohete tiene en su parte más baja una tobera o una serie de ellas, de forma acampanada. Cuando termina la cuenta atrás, tres, dos, uno, cero!, a la tobera llegan oxígeno y combustible, ambos en forma líquida y se encienden por medio de una bujía o de una llama. El líquido, entonces, se transforma en gas y éste ocupa un volumen muchas veces mayor, con lo que ahora no cabe en la tobera y es lanzado fuera de ella con gran violencia, hacia abajo que es la dirección en la que la tobera está abierta. Se produce, entonces, una reacción que impulsa el cohete hacia arriba. Esta fuerza de reacción es tan elevada, que es capaz de levantar un cohete que pesa, al salir, varios centenares de toneladas. Un Ariane 5, de la Agencia Espacial Europea puede pesar casi 800 toneladas en el momento del despegue; para hacernos a una idea de lo que ese peso significa, pensemos que un coche de turismo pesa alrededor de una tonelada. Se necesitan, entonces, 800 coches para hacer el peso de un Ariane 5, los mismos que puestos uno detrás de otro, formarían una fila de más de dos kilómetros de longitud. Los cohetes Saturno 5 que llevaron el hombre a la Luna a finales de los años 60, pesaban 2.900 toneladas con lo que la fila de coches se prolongaría más de ocho kilómetros. Estos enormes pesos se levantan del suelo y suben al espacio utilizando sólo la ley de la acción y la reacción.

Funcionamiento de un cohete de agua

En los cohetes de agua, como en los de las agencias espaciales, se lanza hacia abajo un fluido a alta velocidad para producir una fuerza de reacción hacia arriba. Podría hacerse solamente con aire, embotellándolo a alta presión dentro de un recipiente plástico, como una botella de bebida, y luego liberándolo súbitamente para que salga de manera controlada, produciendo así la fuerza de reacción. Un experimento sencillo en tal sentido consiste en inflar un globo de goma, mantener el aire dentro apretando fuerte con los dedos para que no escape y luego liberarlo. El globo sale impulsado por la fuerza de reacción que produce el escape del aire. Es verdad que en un experimento como éste el vuelo no es unidireccional como en un cohete porque la forma del globo no se presta para ello y, además, es una forma cambiante en la medida en que se expulsa el aire, pero nos proporciona una buena ilustración para visualizar el funcionamiento de un cohete.



En los cohetes de agua, el aire almacenado a presión en la parte superior del tanque, fuerza el agua a salir a velocidad elevada para producir el empuje.

Pero el aire solo es un mal propulsor porque tiene poca masa y por tanto se necesita una presión demasiado alta para producir un empuje aceptable. Según la tercera ley de Newton, el empuje es proporcional a la masa del fluido que se expulsa y a la velocidad del mismo. Se requiere, entonces, una velocidad muy elevada de salida del aire para compensar la poca masa del mismo. Y esa velocidad sólo puede obtenerse subiendo la presión hasta niveles muy elevados. Para obviar esta dificultad, se puede expulsar un fluido diferente al aire, que tenga una mayor masa por unidad de volumen (densidad), como el agua. Pensemos que mientras que cada litro de aire ambiente pesa del orden de 1 gramo, la misma cantidad de agua pesará 1 kg o sea mil veces más. Esta relación no es tan drástica para aire a presión, pero sigue siendo muy elevada. Por ejemplo, para una presión de 400 kPa* (kilopascuales) que es una presión normal de lanzamiento en cohetes de agua, el aire pesa 180 veces menos que el agua, por lo que el empuje será menor en la misma proporción.

Se trata, entonces de almacenar dentro de un recipiente – como una botella de bebida –, una cierta cantidad de agua con gas a presión que la fuerce a salir a alta velocidad para producir el empuje.

¿Cuánto sube?

La pregunta obvia cuando se habla de un cohete impulsado por agua es ¿cuánto sube? Y la respuesta, ésta no muy evidente, es: ¡más de lo que tú te imaginas! Esto es cierto porque lo demuestran los números, porque se ve en cada lanzamiento y por una tercera razón que es una mera ilusión: cuando se mira hacia arriba es casi imposible calcular distancias y tendemos a deformarlas o a ver los objetos de un tamaño diferente al que en realidad tienen. Una prueba de esto la tiene todo aquel que haya visto una lámpara callejera de las que van montadas en un poste largo, tirada en el suelo (por ejemplo porque se ha caído a causa de un accidente). La impresión que da es que su tamaño es enorme comparado con el que se ve cuando está en lo alto de su poste. Es que, por alguna razón psicológica, cuando miramos hacia arriba, contra el azul del cielo, los objetos se ven más pequeños de lo que deberían verse. Con los cohetes pasa lo mismo. Lo vemos tan pequeñito cuando está en su apogeo, que tendemos a sobredimensionar su altura.

He hecho lanzamientos en los que están presentes ingenieros – que suelen tener buen sentido para estimar distancias – y me han dicho: “debió subir por lo menos cien metros”. Pero el hecho es que mis cohetes normales, hechos con botellas de 2 litros, y a la presión que los lanzo, no suben más de 50 metros, como se puede comprobar con el software que se entrega con el libro. Es una altura que, aunque no llega a los cien metros que creen ver los expertos, es bastante en términos absolutos (como la de un edificio de 16 plantas) y suficiente para dejar boquiabiertos a los que lo ven por primera

* En adelante utilizaremos el kPa (kilopascal) como unidad de medida de la presión. Una atmósfera son 101 kPa y un bar son 100 kPa

vez. En la tabla se muestran las alturas de dos tipos de cohetes típicos, hechos con botellas, a diferentes presiones.

Descripción del cohete	Presión (kPa)	Altura (m)
Capacidad 2 l, peso 180 g	420	45
	600	53
Capacidad 4 l, peso 240 g	420	65
	600	77

La extraordinaria fuerza que se necesita para elevar el cohete a tan gran altura, la desarrolla en tres etapas o fases de impulso*.

Primera fase. El agua es expulsada hacia abajo por la tobera y, por reacción, el cohete se levanta del suelo y es acelerado hacia arriba.

Segunda fase. El agua se ha terminado, pero el aire que queda dentro de la botella está a presión y es expulsado hacia abajo, produciendo una aceleración adicional hacia arriba.

Tercera fase. El aire a presión se agota y el cohete continúa subiendo en un tiro parabólico simple, similar al lanzamiento de una piedra o de un balón.

En la siguiente tabla se resumen los datos de las tres fases de un cohete de agua hecho con una botella plástica de bebida, de 2 l, en el que se han puesto 650 ml de agua y se ha presurizado hasta 420 kPa.

Fase	Duración	Velocidad al final de la fase	Aceleración al final de la fase	Altura al final de la fase
Primera fase	114 milisegundos	36,3 m/s	961 m/s ²	1,23 m
Segunda fase	53 milisegundos	44,6 m/s	-8,13 m/s ²	3,5m
Tercera fase	2,6 segundos	0	-9,8m/s ²	46,15m

* En realidad hay una fase más, al inicio del vuelo, que tiene que ver con la lanzadera y la veremos más adelante.

La tabla merece algunas observaciones. Primero, el cohete es muy rápido pues sube hasta los 46,15 m en sólo 2,77 segundos (la suma de las tres duraciones). Esto arroja una velocidad promedio de más de 60 km/h pero, como no es uniforme, tiene un máximo de más de 165 km/h. Otra característica muy llamativa es que los primeros cuatro metros y medio los recorre en 122 milisegundos, con lo cual podemos decir que es invisible, puesto que el ojo no alcanza a seguir esa velocidad tan elevada. En efecto, cuando logramos ver un cohete de agua, éste ya está arriba.

Una tercera característica digna de anotar es la aceleración. Al final de la primera fase son casi 1000 m/s^2 , lo que equivale a 100 veces la aceleración de la gravedad (100G). Es un valor elevadísimo, si lo comparamos con el entrenamiento extremo que recibe un astronauta, en el que es sometido a aceleraciones de 16G. En las lanzaderas espaciales – similares al malogrado Columbia – se alcanza un valor de 3G y en una operación de reingreso a la atmósfera, que es una de las más peligrosas del vuelo espacial, el valor de la aceleración es menor de 8G. El récord obtenido por un ser humano, lo fue por el coronel norteamericano John Stapp en una máquina especialmente diseñada para el efecto en la que se sometió a una aceleración de 46,2G. Pero pagó caros los entrenamientos y la obtención del récord pues, además de varios huesos partidos durante los ensayos, acabó su vida con problemas de visión debido a lesiones en los vasos sanguíneos, producidas por las elevadas aceleraciones.

En el capítulo dedicado a la teoría y a la matemática, se explican más en detalle estas etapas...y una más.

¹ El artículo puede verse en la red en

<http://www.motherearthnews.com/Do-It-Yourself/1983-07-01/Moms-Two-Liter-Bottle-Rocket.aspx>