

COHETES PROPULSADOS POR AGUA

DOCUMENTACIÓN DE ACTIVIDADES PARA EL CONCURSO DE COHETERÍA DE LA COMISIÓN NACIONAL DE ACTIVIDADES ESPACIALES

Autores:

ARTUSA, Juan Ignacio
CAMPITI, Nicolás
COMPETIELLO, Marcos
MORI RODRIGUEZ, Juan Martín
ROJAS, Silvio
SOLARES, Federico

Docente:

GONZALEZ, Pablo Martín





“Al principio vienen necesariamente a la mente la fantasía y la fábula. Desfilan después los cálculos matemáticos, y sólo al final la realización corona el pensamiento”

Konstantín Tsiolkovski

Introducción

La frase precedente refleja para nosotros lo que significó participar en el diseño, construcción y lanzamiento de cohetes propulsados por agua. El trabajo es sencillo, pero la cantidad de variables que intervienen para que el vuelo sea realmente controlado son muchas. A lo largo de este documento plantearemos los problemas a los que nos enfrentamos y cómo intentamos resolverlos, algunos mediante el cálculo y otros utilizando las pruebas de campo. La impresión que provoca en los alumnos puede notarse en las palabras de Nicolás Campiti, cuando expresa “la idea que se plantea este concurso es una idea genial, el hecho de dar a conocer una actividad como ésta, poco común pero al alcance de todos ya es un buen inicio para un proyecto. El hacer participar a estudiantes en este tipo de competencias fomenta el crecimiento y la curiosidad en nuevas ramas, ya que desde lo más simple en la construcción de un cohete se tiene que ir investigando y haciendo pruebas para lograr un desarrollo óptimo de éste. Además, brinda la posibilidad de esparcimiento para poder realizar tareas al aire libre y con otros alumnos de otros colegios”.

Esperamos poder manifestar en este documento el trabajo y la imaginación de este grupo de alumnos entusiastas en las ciencias espaciales.

Ing. Pablo M. González
Docente tutor

BREVE INTRODUCCIÓN TEÓRICA

FISICA DEL VUELO

Un cohete es básicamente una máquina voladora autopropulsada que se mueve siguiendo las leyes básicas de la física. La diferencia entre este y un avión radica fundamentalmente en que no se apoya en el medio para propulsarse, o sea que puede viajar en el vacío. Existen cuatro fuerzas básicas que predominan en el cohete:

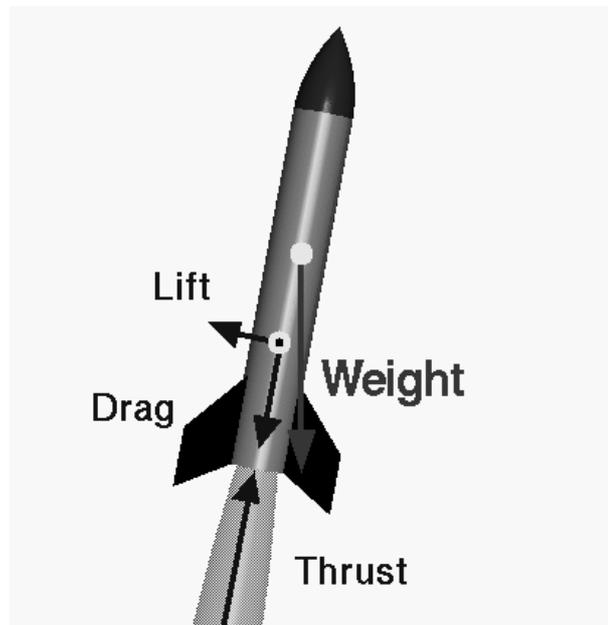


Imagen cortesía de NASA

El peso (weight) es la fuerza generada por la atracción gravitacional de la Tierra. Depende de la masa, pero en este caso como no la conserva durante todo el vuelo consideraremos la masa total sólo en el primer momento y aplicada en el **centro de gravedad (CG)**.

El empuje (thrust) es la fuerza que impulsa hacia arriba y genera el movimiento principal del cohete. Se genera por la salida de masa desde un extremo a alta velocidad cumpliendo el **principio de acción y reacción**.

La sustentación aerodinámica (lift) se produce por la acción de las superficies de sustentación cuando el cohete se desplaza.

La resistencia aerodinámica (drag) es generada por el rozamiento del cuerpo del cohete con el aire, y se opone al movimiento vertical.



LEYES DE NEWTON

Nuestro cohete además está sometido a las tres **leyes o principios de Newton**:

Según la PRIMERA LEY DE NEWTON, si no existen fuerzas externas que actúen sobre un cuerpo, éste permanecerá en reposo o se moverá con una velocidad constante en línea recta. El movimiento termina cuando fuerzas externas de fricción actúan sobre la superficie del cuerpo hasta que se detiene. Cuando se presenta un cambio en el movimiento de un cuerpo, éste presenta un nivel de resistencia denominado INERCIA. Por tanto, a la primera ley de Newton también se le conoce como ley de la inercia.

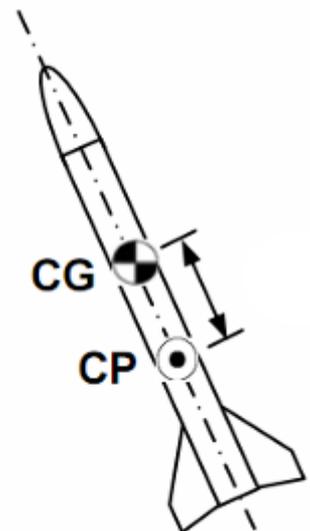
La SEGUNDA LEY DE NEWTON determina que si se aplica una fuerza a un cuerpo, éste se acelera. La aceleración se produce en la misma dirección que la fuerza aplicada y es inversamente proporcional a la masa del cuerpo que se mueve. Si la masa de los cuerpos es constante, la fórmula que expresa la segunda ley de Newton es: fuerza = masa x aceleración. En cambio cuando la masa del cuerpo aumenta o disminuye (cohete), la aceleración disminuye o aumenta. Entonces, debes establecer la cantidad de movimiento (p) que equivale al producto de la masa de un cuerpo por su velocidad. Es decir: $p = m \times v$.

La TERCERA LEY DE NEWTON postula que la fuerza que impulsa un cuerpo genera una fuerza igual que va en sentido contrario. Es decir, si un cuerpo ejerce fuerza en otro cuerpo, el segundo cuerpo produce una fuerza sobre el primero con igual magnitud y en dirección contraria. La fuerza siempre se produce en pares iguales y opuestos. Por esta razón, a la tercera ley de Newton también se le conoce como ley de acción y reacción.

AERODINÁMICA

Las fuerzas aerodinámicas que produce en su movimiento el cohete se pueden simplificar en dos: sustentación y arrastre. Para mejorar el vuelo, se debe producir la sustentación sin incrementar demasiado el arrastre. El Centro de Presiones (CP) es el lugar donde se concentran todas las fuerzas aerodinámicas normales que actúan sobre un modelo de cohete durante su vuelo. Es decir, es el punto donde actúa la "Fuerza Normal" resultante de todas las fuerzas de presión que ejerce el aire sobre la superficie del modelo. La ubicación de éste punto puede variar dependiendo de la forma del modelo. El Centro de gravedad (CG) es el lugar donde se concentra todo el peso del cohete. Es decir, hay tanto peso distribuido delante del CG del cohete, como detrás de él. La ubicación de éste punto varía durante el vuelo del modelo, ya que conforme el motor va consumiendo su propelente el reparto del peso en todo el modelo va cambiando.

El Margen de estabilidad de un cohete es la distancia existente entre el CP y el CG. Por convención, la distancia mínima para considerarla como Margen de estabilidad, es una separación entre el CP y el CG igual al mayor diámetro del cuerpo del cohete. A esta distancia mínima se la conoce como calibre.



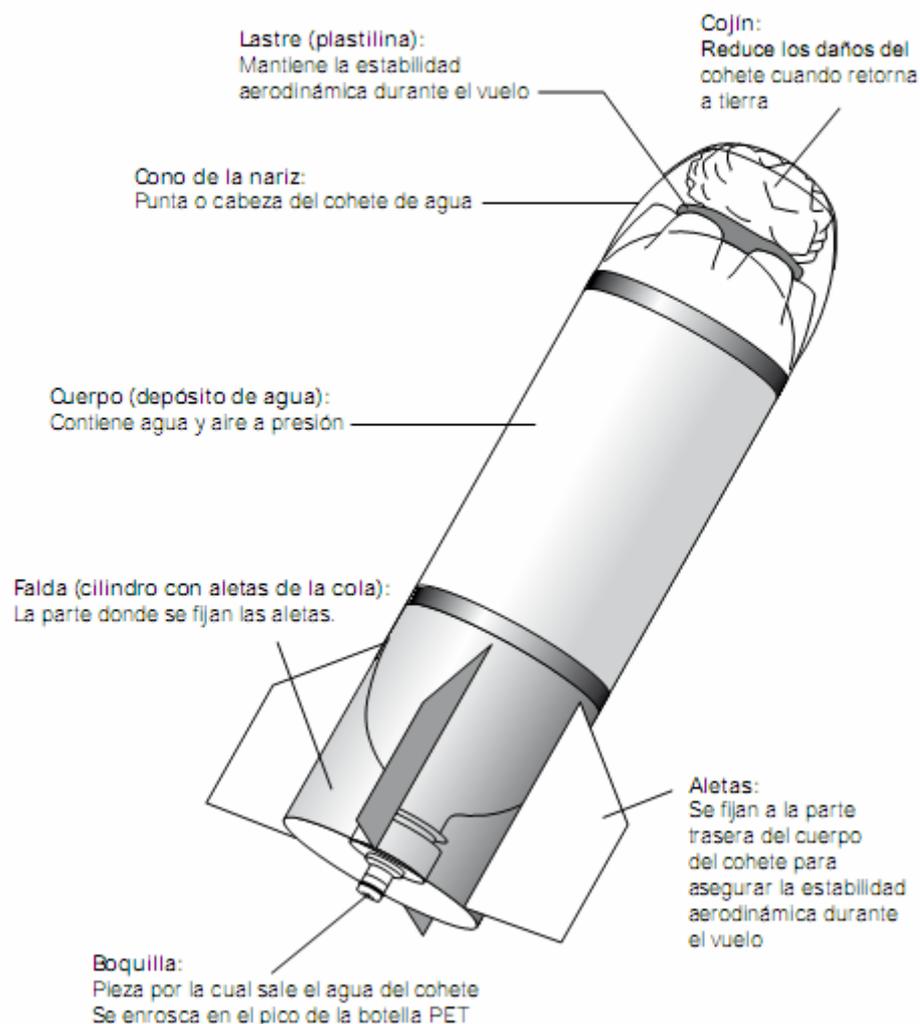
Regla de estabilidad en un modelo de cohete.

“Un modelo de cohete será estable siempre que su Centro de Presiones (CP) esté situado por detrás de su Centro de Gravedad (CG)”. En un cohete el CP debe estar situado hacia la cola, mientras que el CG estará situado hacia el cono.

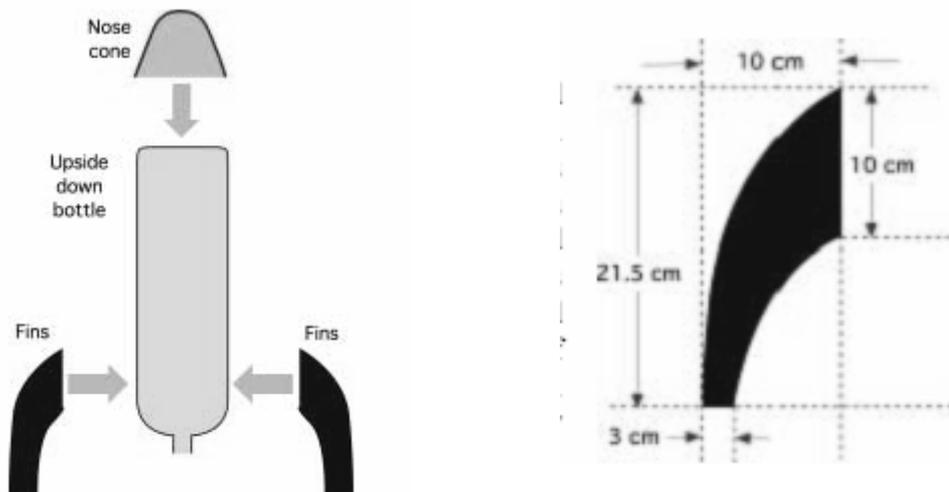
CONSTRUCCIÓN DE COHETES

En su forma más simple, un cohete de agua es una botella a la cual se le introduce agua y se presuriza mediante un inflador o compresor, para luego ser liberada a través de un mecanismo. Pero para lograr una mejor performance, se debe mejorar el drag, poniendo alguna ojiva, estabilizar mediante aletas, poner un contrapeso en la punta y decorar. Nosotros adoptamos el modelo recomendado por el manual de la JAXA (Agencia Espacial Japonesa):

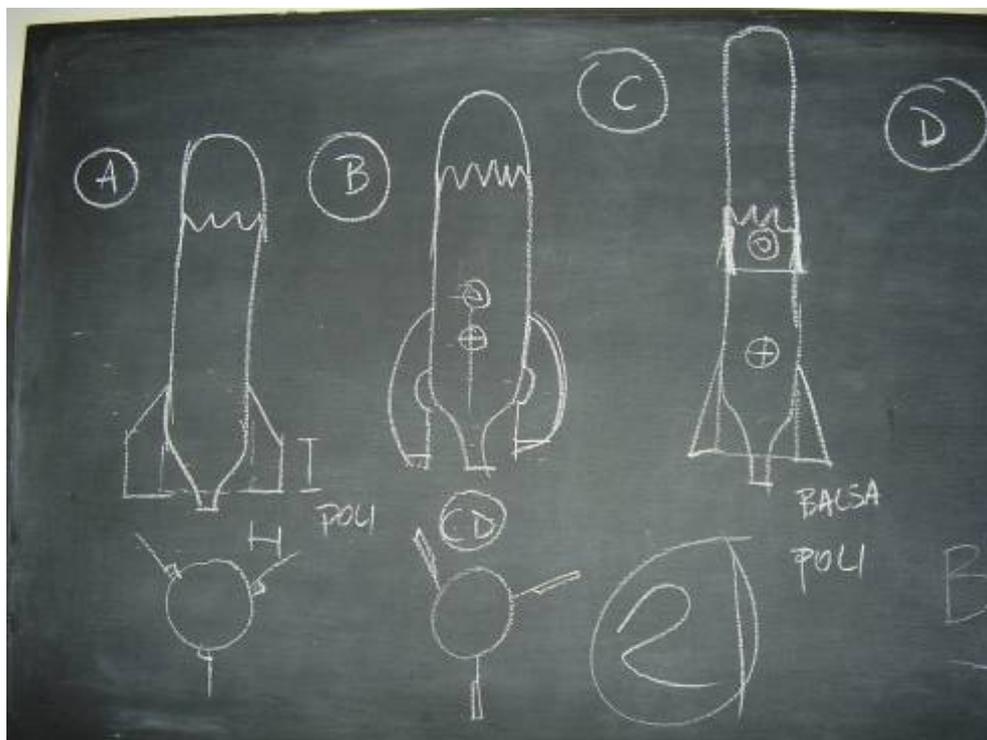
Terminología del cohete de agua



También probamos, con poco éxito, el modelo inglés, que utiliza aletas más grandes, una ojiva hecha con una esfera y sin un faldón aerodinámico:



Propusimos tres modelos, variando el material de las aletas y la relación largo / diámetro.





Nuestros modelos fueron contruidos en el laboratorio del colegio, ya que carecemos de taller, por ser un bachillerato. Formamos un grupo, con el que construiríamos al menos dos cohetes para las pruebas:

AREA 21



ARTUSA, Juan Ignacio
CAMPITI, Nicolás
COMPETIELLO, Marcos
MORI RODRIGUEZ, Juan Martín
ROJAS, Silvio
SOLARES, Federico

Comenzamos cortando las botellas, los faldones y las aletas. Fue trabajoso alinearlas una vez puesto el faldón, entonces procuramos pegarlas a 90° antes de colocarlas en el cohete.



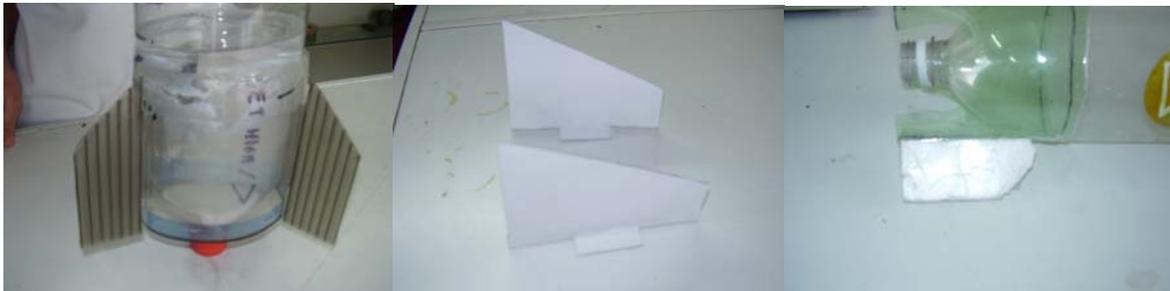


Partimos de botellas de soda de 2,25 litros de capacidad, a las cuales le agregábamos otra cortada para que sirva de ojiva, cortando también la rosca del pico.

El material elegido para las aletas fue variado. Las construimos de:

- Cartón
- Madera balsa
- Compact Disc
- Plástico
- Telgopor

Se eligieron las aletas de madera balsa y cartón, en configuración de 3 (tres) espaciadas a 120° cada una.



Determinación del CG y el CP

Se determinó el centro de gravedad (CG) usando un cordel y balanceando el modelo hasta que encuentre el equilibrio. Para el centro de presión (CP) proyectamos la silueta del modelo sobre un cartón y determinamos el centro de gravedad de esa figura, la cual nos debería dar el CP. Sin embargo, sabemos que un cohete estable debe tener un calibre (diámetro) de distancia entre esos dos puntos (CG y CP), así que marcamos el CG sin el contrapeso de la punta y luego pusimos peso en la ojiva para que el nuevo CG se distanciara al menos un diámetro del anterior.

Como contrapeso utilizamos plastilina. Los valores del contrapeso estuvieron en el orden de los **60 gr**, y el peso total del cohete en **170 gr**, dependiendo de la configuración.



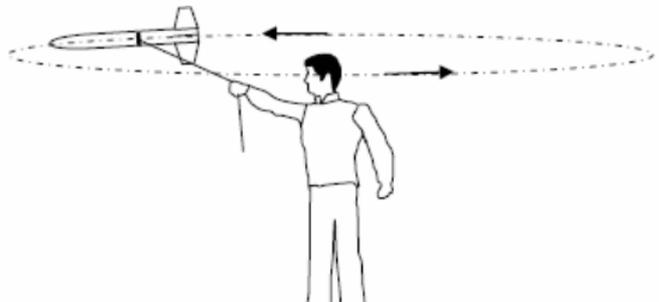
Pruebas realizadas

Pruebas estáticas:

Se equilibró el cohete estáticamente para que el CG estuviera sobre el eje principal. Para ello, el balanceo se hizo con el cohete completo y consistió en agregar o sacar plastilina en los lugares donde servían de contrapeso.

Pruebas dinámicas:

Método del giro sobre la cuerda: una vez terminado el cohete, se ató mediante un cordel al CG y se lo hizo girar. Si el modelo “cabeceaba” (tendía a subir o bajar) se consideraba inestable. En nuestro caso no hubo problemas.



Túnel de viento:

Construimos un sencillo túnel usando un ventilador y cartulina para evitar corrientes de aire no deseadas. Al disponerlo horizontalmente, colocamos colgando el cohete SIN CONTRAPESO y medimos la fuerza con un dinamómetro. Los datos obtenidos fueron:

Prueba	Modelo	Condición	Marca del Dinamómetro
#1	1 – sin ojiva – aletas balsa	Sin viento	88 gr
#2	1 – sin ojiva – aletas balsa	Viento nivel 1	86 gr
#3	1 – sin ojiva – aletas balsa	Viento nivel 2	85 gr
#4	1 – con ojiva – aletas balsa	Sin viento	102 gr
#5	1 – con ojiva – aletas balsa	Viento nivel 1	100 gr
#6	1 – con ojiva – aletas balsa	Viento nivel 2	99 gr



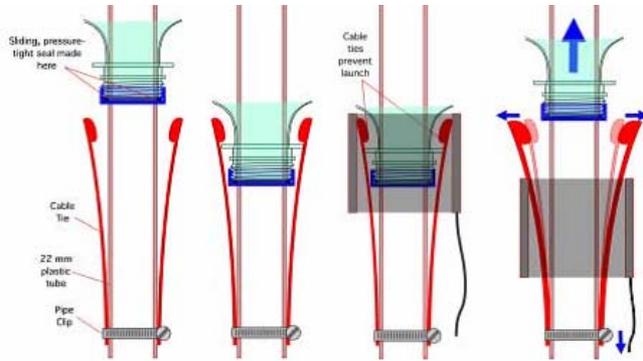
Notamos que aunque el cohete estaba balanceado, tendía a girar un poco con el viento en sentido antihorario.

Construcción de la rampa

La rampa fue uno de los grandes desafíos. Partimos de un tubo de cañería con una válvula de neumático de auto en un extremo, al que le pusimos un tubo de aluminio con el diámetro de la boquilla de botella estándar (25 mm) y una ranura para alojar dos arandelas tipo O-RING. La estructura fue hecha con listones de madera de pino, con una bisagra para ajustar el ángulo de tiro y soportes para clavar la rampa mediante estacas. Sujetamos el tubo a la rampa mediante dos abrazaderas.



Mecanismo de liberación (gatillo): usando precintos plásticos y un tubo que los contuviera, pudimos reproducir uno de los tantos mecanismos de liberación.



Prueba de rampa: se probó la rampa en el Torneo de otoño de las Escuelas Raggio, obteniéndose buenos resultados, pero el mecanismo comenzó a fallar luego del sexto lanzamiento. Mejoramos los puntos críticos (ver CLAVES) y para la segunda tanda de pruebas, hicimos siete lanzamientos sin incidentes.

Claves en la rampa:

- Uso de arandelas O-RING para evitar la pérdida de presión
- Uso de varios precintos para distribuir la tensión y evitar deformaciones (estiramientos)
- Lubricación del gatillo y de las superficies de ajuste

Control de variables

Las variables que intervienen en el vuelo de un cohete se aguan pueden resumirse en:

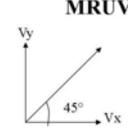
Ángulo de tiro

El ángulo óptimo teórico de tiro para obtener el máximo alcance es de 45°

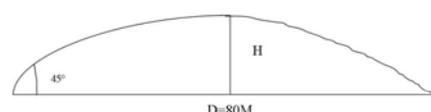
Con este ángulo y para alcanzar los 80 metros, la velocidad de salida debería ser al menos de 56,02 m/s.

Tiro Oblicuo

MRUV



MRU $\left\{ \begin{array}{l} V_x: V \cdot \cos 45^\circ \\ V_y: V \cdot \sen 45^\circ \end{array} \right.$



MRUV (X) $V = A/T \quad A = V/T \quad \Rightarrow 80 \text{ M}$

MRUV (Y) $\left\{ \begin{array}{l} G = V \cdot T \rightarrow VI = G \cdot T \\ VI = V \cdot \sen 45^\circ \end{array} \right.$

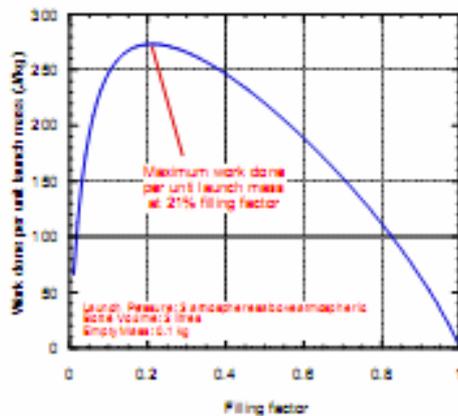
$2T = V \cdot \sen 45^\circ / G$

$V = \sqrt{(160 \text{ M} \cdot 9.81 \text{ M/S}^2) / \cos 45^\circ \cdot \sen 45^\circ}$



Cantidad de agua

Debido a que este tipo de cohete se comporta como un sistema no conservativo (pierde gran cantidad de masa durante su vuelo), esto lo hace antes del primer segundo, por lo que la mayor parte del vuelo es inercial. Sin embargo, se debe balancear la cantidad de agua para que no sea demasiada masa al despegue ni que no pueda cumplir la tercera ley de Newton (acción y reacción). Estudios teóricos indican que la cantidad óptima de agua está alrededor del 20% del volumen del cohete.



Presión interior

Para que pueda expeler el agua, se debe presurizar el recipiente. Si bien cualquier presión superior a 10 psi es efectiva, cuanto más presión pueda darse al interior de la botella, más efectivo será el lanzamiento. El límite lo impone el material (PET) del recipiente, el compresor usado y el mecanismo de liberación en la rampa.

Aerodinamia

El “drag” o arrastre que sufre el cohete, es decir, la resistencia al avance debido a la fricción con el aire es crítico. Para tener una idea del Cd (coeficiente de arrastre) se puede consultar la siguiente tabla:

Forma del objeto	Valor aproximado de C_d
Disco circular rígido 	1.2
Hemisferio 	0.8
Semi-hemisferio plano 	0.75
Esfera 	0.4
Avión / Planeador 	0.06

La ojiva debe ser lo más aerodinámica posible, ya que es la parte que enfrenta al aire, y las aletas deben afilarse para contribuir a mejorar el drag.



Diámetro de la tobera (nozzle)

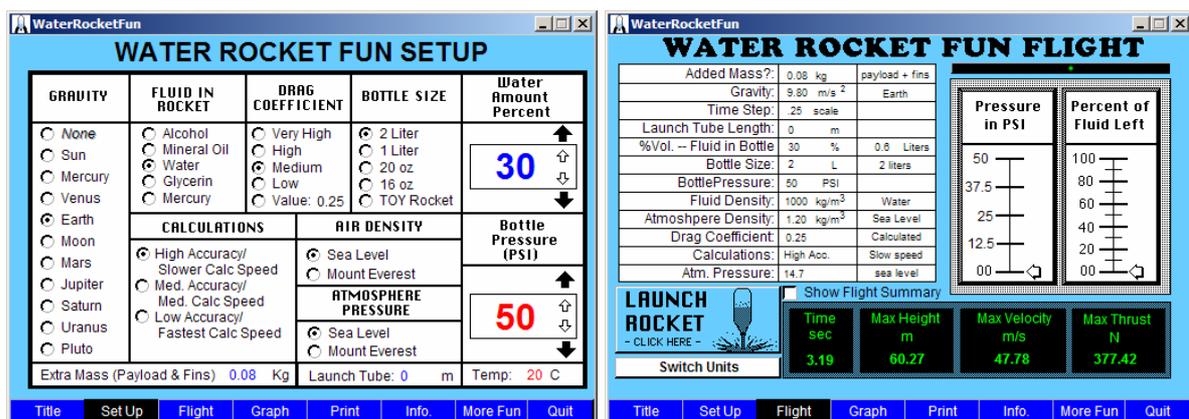
El orificio de salida de agua a presión es un factor crítico como variable para lograr alcance y altura de vuelo, ya que un diámetro menor deja escapar el agua a distinta velocidad y con otro ritmo. Como este factor está ligado al diseño de rampa y gatillo de liberación, nosotros optamos por simplificar el diseño y no reducimos el diámetro estándar de la botella PET (22 mm).

Simulaciones

Contamos con un verdadero arsenal de software, tanto on-line como para descargar. Realizamos pruebas con los siguientes:

Water rocket Fun

Es un sencillo programa que permite setear algunos parámetros como el porcentaje de agua, la presión y el peso extra, y tiene parámetros fijos como la gravedad, el drag, el volumen de la botella, etc.



Sirve para lanzamientos verticales y para tener una idea del vuelo, pero es muy limitado.

Water Rocket sim

Es uno de los programas más completos para la simulación del vuelo de un cohete de agua. Se pueden ajustar todos los parámetros, incluyendo el diámetro de salida de agua y su eficiencia, el factor de drag, la presión (en atmósferas), el ángulo de tiro, e incluso el hecho de tener un paracaídas.

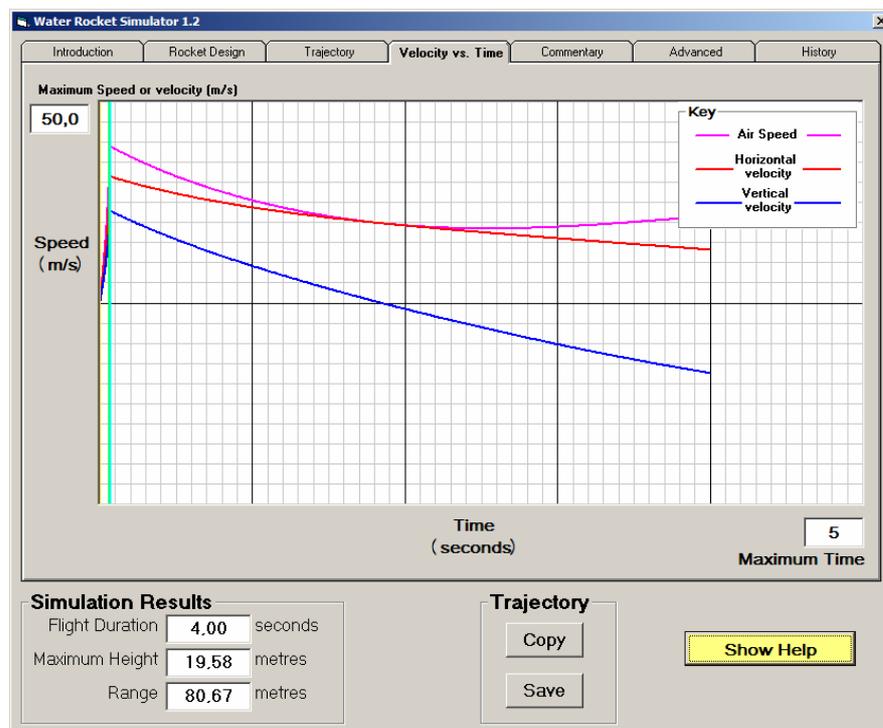
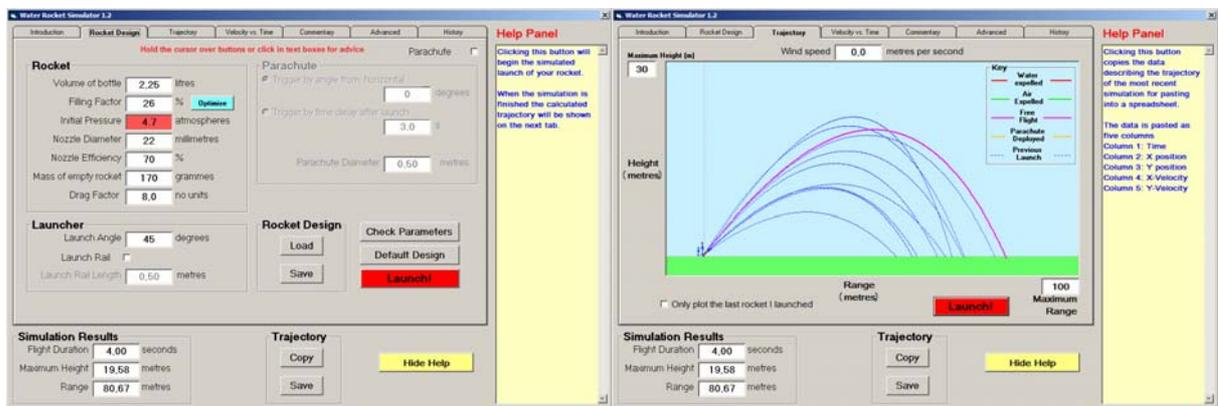
Lo más sorprendente del programa es el detalle con el que muestra sus resultados: alcance horizontal y vertical, tiempo de vuelo, trayectoria, gráficos de velocidad- tiempo y resultados avanzados como presión inicial y final, temperatura, cantidad de energía, etc.

Como complemento realiza un historial con los cambios de diseño o parámetros que efectuamos en los distintos lanzamientos.



Los valores adecuados, según esta simulación, para alcanzar los 80 metros de alcance son:

Volume 2,25 l
Filling Factor 26 %
Density 1
Pressure 4.7 atm
Nozzle 22 mm
Mass 170 g
Drag 8,0
Efficiency 70 %
Angle 45°

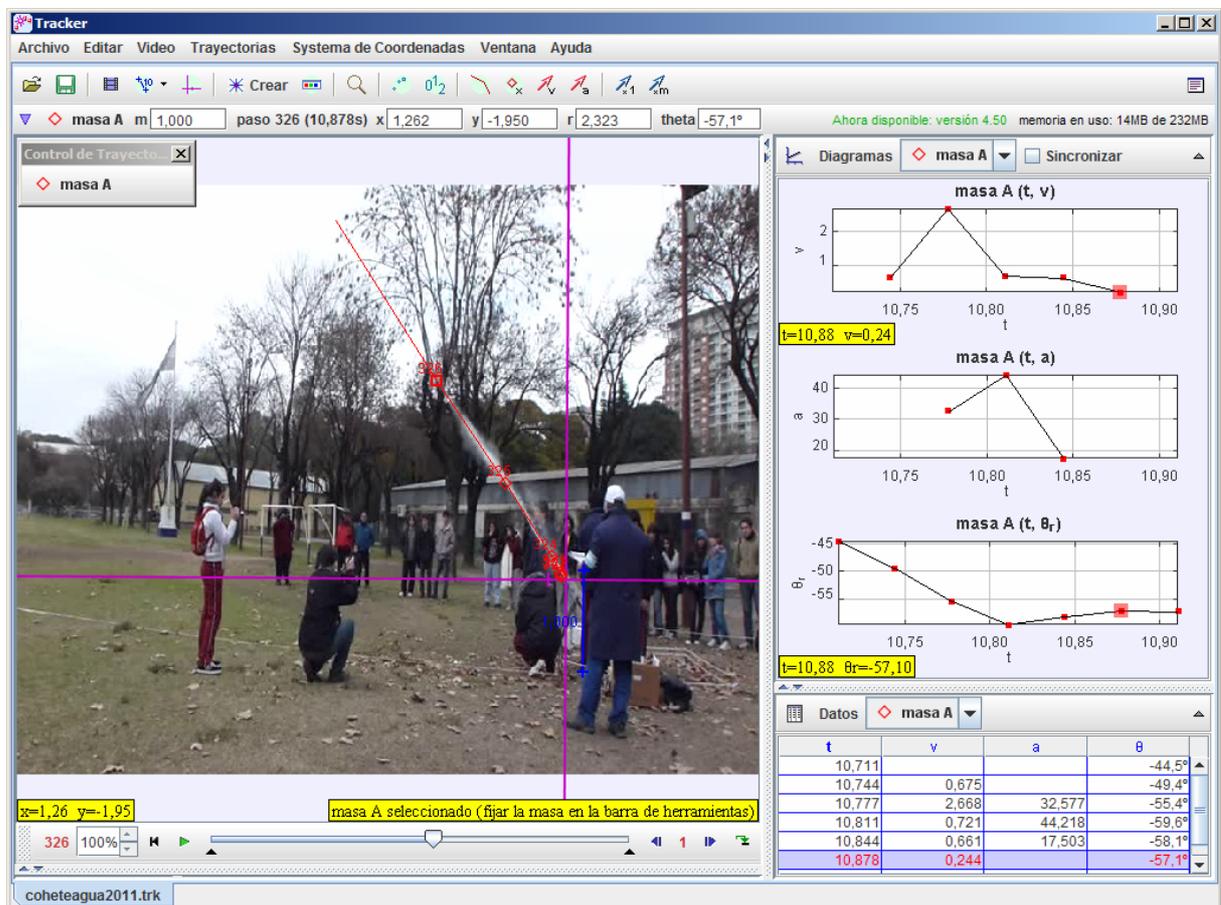




Tracker

A partir de los videos que habíamos obtenido en dos de las pruebas en la Escuela Raggio, usamos este excelente programa para medir algunos de los valores característicos del vuelo de un cohete de agua. Nos interesaba contrastar los datos de la velocidad de salida y tiempo de vuelo con los obtenidos en el campo. La diferencia en cuanto a la velocidad inicial teórica fue notable: mientras que la velocidad teórica es de 56 m/s, la medida fue de 41 m/s y el Tracker nos arrojaba 44 m/s.

También pudimos evaluar datos de posición que nos mostraron el ángulo inicial, la trayectoria en el vuelo inercial y el tiempo empleado en alcanzarlo.



Pruebas y mediciones realizadas

Ángulo de tiro: se determinó usando un cuadrante y apoyándolo en el soporte del tubo lanzador. El ángulo óptimo se encontró entre los 45° y 50°



Velocidad de salida: Fue muy difícil medir la velocidad de salida de la rampa, pero pudimos medir con un sensor digital construido en Escuelas ORT una velocidad de 41 m/s en un tiro con una presión de 40 psi .





Distancia alcanzada en las pruebas: Ajustando algunas variables pudimos estar en distancias aceptables, de 70 a 75 metros, con presiones de 40, 50 y 60 psi y ángulos entre 40° y 50°, dependiendo de la configuración y la cantidad de agua. La imagen de abajo muestra el trabajo de campo:

Características

COHETE	ALETAS	CARGA cm ³	Presión	ángulo	tiempo	distancia
1	Balsa	450 cm ³	40 psi	45	—	5,5 m
1	Balsa	2850	40 psi	45	4,905	10 m
2	Balita	500 cm ³	50 psi	45	V=47,5	X
1	BALSA	400 cm	50	50	4,55	X
3	CARROW	500	50	50	4,905	10 m
2	Pol ²	600 cm	50	50		
1	BALSA	600	60	50		+70

Paralelamente, en algunos lanzamientos pudimos colocar en el exterior, desbalanceando el cohete, una microcámara para ver el vuelo desde el aire. Pudimos de esa forma medir el tiempo exacto de vuelo (4,28 segundos).





Algunas conclusiones

Construcción:

Este tipo de cohetes es muy fácil de construir, muy barato y resulta sencillo ponerlos a punto.

Rampa:

Si bien hay diferentes tipos para tomar como modelo, la dificultad mayor radica en la construcción de un mecanismo fiable de liberación del cohete cuando este tiene la presión de despegue.

Fijación de parámetros

Los parámetros más fáciles de fijar son la cantidad de agua y el ángulo de tiro. La presión puede simplificarse usando siempre el mismo compresor alimentado con batería, ya que un inflador manual provee incertidumbres. El parámetro más difícil de evaluar y corregir es la aerodinamia del cohete, que provoca desviaciones en su trayectoria y la inestabilidad en vuelo.