

USO DIDÁCTICO DE COHETES DE AGUA EN LAS ESCUELAS TÉCNICAS COMO PROYECTO DE INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA

Juan I. Villar^a, Ariel. Di Jorgi^a, Leonardo Castelli^a, Juan Meschini^a, Luciano Verona^a
Email: juanignacio.villar@ing.unlp.edu.ar

^aDpto. Aeronáutica., Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/ 47 y 48 - (1900), Provincia de Buenos Aires, Argentina

INTRODUCCIÓN

Esta actividad de extensión versa sobre la intervención de la facultad de ingeniería de La UNLP en tres escuelas técnicas de la región para incitar el interés del alumnado en el estudio de la ingeniería planteando una problemática abierta que deban resolver haciendo uso de herramientas teórico prácticas de modo de cumplimentar una determinada misión objetivo e integrándolos con las evaluaciones de fin de semestre de trabajos integradores de alumnos de la facultad de ingeniería de la UNLP, del área de Fluidodinámica.

La actividad tiene como objetivos articular contenidos y metodologías de enseñanza de física aplicada entre ambos niveles educativos, permitiendo además generar el espacio propicio para afrontar problemas de tipo abierto en el que se deban asumir soluciones ingenieriles tendientes a optimizar los resultados, incrementar el interés en el trabajo en equipo, con objetivos particulares y generales fomentando además la curiosidad, capacidad de análisis teórico, experimentación práctica y espíritu crítico en la valoración de los resultados.

Mediante la implementación de medios didácticos de simulación y las actividades en los talleres y/o laboratorios correspondientes al ciclo superior de la escuela técnica, se abordan estas problemáticas y las que surgen como contenidos en las materias afines a la prácticas profesionalizantes.

La operación del cohete de agua consiste en expeler un chorro de agua desde la tobera el cohete usando aire comprimido alojado en su interior. Al apuntar hacia el cielo la gravedad naturalmente estratifica el contenido del cohete de modo tal que el aire no podrá escapar sin antes haber empujado toda el agua fuera de la cámara interior, así la energía acumulada en el aire, es eficientemente transformada en energía cinética del chorro de salida de agua, cambiando su cantidad de movimiento y por la 3ª ley de Newton empuja el cohete hacia arriba.

Al buscar alcanzar la mayor distancia posible, debido a su baja densidad el empuje provisto solo por aire resulta despreciable, mientras que un cohete cuya cámara esté completamente llena de agua, no puede ser presurizada y no habrá energía almacenada para convertir en cinética, resultando el problema en uno de optimización.

Las ecuaciones de la dinámica que gobiernan el movimiento incluyen la resistencia, el empuje, (funciones de la velocidad desarrollada y de salida respectivamente), y el peso que varían en el tiempo, convirtiendo la ecuación diferencial del movimiento en una de segundo orden no homogénea de coeficientes no constantes.

La no linealidad del problema de dinámica presentado y el acoplamiento de las variables en las ecuaciones que lo gobiernan hacen que sea sumamente apropiado también para introducir métodos numéricos de cálculo, simulación y permitiendo la corroboración de su validez mediante la experimentación.

El efecto de un trabajo mancomunado permite además lograr la formación de nuevos extensionistas y fortalecer el vínculo con las escuelas técnicas que ya se encuentran desarrollando actividades de extensión conjuntas con la UNLP.

METODOLOGÍA PARTE EXPERIMENTAL

El proyecto tiene por destinatarios los alumnos de las escuelas técnicas de la región de La Plata - Berisso - Los Hornos en grupos de al rededor de 15 a 20 alumnos.

Inicialmente las escuelas intervinientes serán las EET N° 2 "Ing Emilio Rebuerto" de Berisso y EET N°6 "Alberth Thomas" generando el espacio que permite a los alumnos de los años superiores 5º y 6º de las carreras técnicas, avisorar las potencialidades de un futuro estudio y trabajo en el ámbito de la ingeniería que no les sea ajeno e inalcanzable, familiarizándolos a través de las actividades pautadas con las incumbencias del ingeniero y su actividad diaria, vinculándolos con el pensamiento y criterios profesionales adquiridos a través de la experiencia, acercándolos al uso del equipamiento y los principios que los rigen despertando la curiosidad, el entendimiento y alcance de los mismos.

La idea de involucrar alumnos en la etapa intermedia avanzada de las carreras técnicas es que les permitan madurar los conocimientos y metodologías adquiridos para implementarlas a criteriosamente.

El trabajo propuesto es de construir un cohete de agua a ser lanzado exitosamente para lograr los objetivos de alcanzar la máxima distancia horizontal posible, evaluar adecuadamente dicha magnitud en forma teórica de modo de alcanzar la mayor precisión posible entre los datos obtenidos analíticamente y los medidos durante la experiencia.

Se busca pues lograr los siguientes objetivos.

- Competencia entre escuelas técnicas: Cohetes etapa simple que buscarán alcanzar la máxima distancia posible, evaluando adecuadamente dicha magnitud en forma teórica de modo de alcanzar la mayor precisión posible entre los datos obtenidos analíticamente y los medidos durante la experiencia y estimar el coeficiente de resistencia. (1er semestre del año)
- Objetivo conjunto entre las escuelas técnicas desarrollar un cohete multi etapa buscando alcanzar la máxima distancia posible con la última etapa del cohete mediante una separación exitosa controlada y su recuperación. Evaluar adecuadamente dicha magnitud en forma teórica de modo de alcanzar la mayor precisión posible entre los datos obtenidos analíticamente y los medidos durante la experiencia. Buscar el modo de censar la máxima altura que es capaz de lograr. (2do semestre del año)

En el primer semestre del año los alumnos construyen un cohete por grupo de modo tal que cada grupo tiene una única oportunidad de lanzar su cohete. En la que todos compiten para lograr la máxima distancia posible, el mayor tiempo de vuelo posible y a su vez buscan la mayor precisión entre los valores estimados analíticamente mediante modelos simplificados y los valores medidos en la experiencia.

Los jurados evalúan los aspectos considerados como objetivos y asignan un orden de mérito para cada uno de ellos de modo tal que quienes logran la mayor distancia resultan ganadores y los que logran el menor error entre los valores estimados analíticamente y medidos son los segundos debiendo presentar un informe una semana antes al menos de la fecha fijada para la experimentación con los datos correspondientes del cohete. El mismo

debe incluir una memoria de cálculo de cómo se determinan las características y configuraciones óptimas de su vehículo cohete, así como la conclusión final de que distancia alcanza, cuánto tiempo dura el vuelo y el valor de Cd (coeficiente de resistencia) estimado. Los ganadores del objetivo planteado para el primer semestre pueden decidir sobre qué área del proyecto en conjunto desean trabajar para poder repartir el resto de las tareas entre las escuelas restantes.

En el segundo semestre del año los alumnos de las tres escuelas técnicas se dividen responsabilidades sobre un proyecto común de construir un cohete multi etapa con sistema de recuperación y censado de altura con el objetivo de que cada una de las escuelas se circunscriba a una parte de un proyecto que a su vez es parte de un todo, lo que fomenta el trabajo en equipo y las tareas de integración tan comunes en ingeniería a su vez buscan la forma de predecir las trayectorias de ambas etapas. El trabajo fue estructurado siguiendo los objetivos planteados cronológicamente a saber:

1- Planteamiento de la problemática y el objetivo a alcanzar. Consolidación de las herramientas teóricas, modelo analítico, y abordaje matemático.

Se realizaron encuentros en el Laboratorio de Fluidodinámica del departamento de Aeronáutica donde se abordó la física que envuelve al problema, las ecuaciones no lineales de la dinámica de cohetes con masa variable y el cómo resolver el problema linealizado las ecuaciones que se presentan a continuación para mayor facilidad. Dado que en la dirección del movimiento la ecuación que gobierna la dinámica está dada por:

$$m\ddot{x}' = E - D - mg \sin \alpha_o \quad (1)$$

Donde el drag (D) o resistencia aerodinámica a su vez es función de la velocidad desarrollada por el cohete según la expresión $\frac{1}{2}\rho_{atm}\dot{x}'^2 C_d A_t$, el empuje (E) depende de la velocidad de salida del chorro de agua que varía con el cambio de la presión interna a medida que pasa el tiempo según la expresión $\rho_w V_s^2 A_s$ y finalmente el peso también se ve afectado conforme se produzca el vaciado de la botella afectando el término $mg \sin \alpha_o$, convirtiendo a (1) en una ecuación diferencial de segundo orden no homogénea de coeficientes no constantes. La no linealidad del problema de dinámica presentado por el cohete de agua y el acoplamiento de las variables en las ecuaciones que lo gobiernan hacen que sea sumamente propicio también para introducir métodos numéricos de cálculo y simulación y, la corroboración de su validez mediante la experimentación.

2- Estudio por simulación y estimación de parámetros teóricos.

Una vez estudiado el problema se introdujeron clases en aula virtual para el abordaje del problema mediante el uso de computadora para poder simular tanto el comportamiento del cohete en todas sus fases como el de los parámetros másicos y dinámicos durante la etapa de empuje mediante software Openrocket y Excel respectivamente.

3- Construcción y determinación de características aerodinámicas.

Los alumnos fueron instruidos en la construcción de prototipos que fueron evaluados en el túnel de vientos para determinar sus propiedades aerodinámicas, actividad que les permitió ponerse en contacto no solo con el uso de vientos sino además con el uso y método de calibración de balanzas de dos componentes, placas adquisidoras, software labview y finalmente relevamiento y post procesamiento de datos



Figura1: Ensayo en túnel de viento cohetes con uso de balanza y acondicionador de señal.

4- Estudio banco de pruebas estático para medición de empuje y en túnel de viento para determinación de resistencia

Nuevamente los alumnos fueron instruidos en la construcción de prototipos de motores sin aptitudes aerodinámicas presentes que permitieran relevar en el banco de ensayos estáticos de la facultad, la performance alcanzada por sus prototipos y comparación de los mismos familiarizándose nuevamente con el uso de celdas de carga, placas adquisidoras, así como también sistemas neumáticos de liberación y control remoto, así como nuevamente usaron el software labview para el relevamiento y post procesado de datos de empuje. Para obtener una referencia de la variación del empuje en el tiempo se utiliza a modo de aproximación una curva propia que se obtiene a partir de ensayo estático en banco para cada cohete.

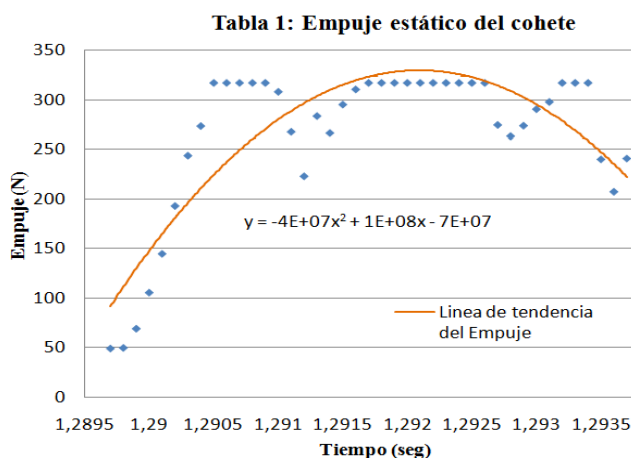


Figura 2: Banco ensayo estático y resultado de un ensayo de empuje tipo

5- Comparación de resultados entre los diversos métodos de simulación y los experimentales.

6- Prueba en Campo

7- Conclusiones

Un uso adecuado de los recursos como el agua considerado a criterio de cada equipo el determinar el volumen óptimo del mismo y sus implicancias. El combustible es únicamente agua sin ningún tipo de aditivo.

La presión suministrada queda estipulada por de cada equipo pero con una restricción de la presión máxima a que someterá su cohete considerando que el tope máx. admisible lo fijarán los jurados en función de la seguridad de la experiencia y de la resistencia mecánica del material utilizado y no pudiendo superar los 700KPa.

Finamente el ángulo de inclinación respecto del cenit es otra variable a contemplar por los equipos de modo tal que garantice el cumplimiento de los objetivos de maximizar la distancia y el tiempo de vuelo, Así como la configuración aerodinámica del mismo será potestad de los equipos fijando las características que brinden estabilidad en vuelo al cohete y la menor resistencia, como ser forma de la cofia, tipo y cantidad de aletas y posición de las mismas, relación L/D del modelo, materiales utilizados, etc.

Los requerimientos y limitaciones impuestas al problema de diseño y construcción son, entre otros propios de los procesos de manufactura, la utilización de botellas plásticas (PET) con restricción de volumen máximo.

Uso de materiales plásticos, poliméricos, cartón, papel, telas, pinturas, adhesivos vinílicos, epoxídicos, masilla, hilos, cintas adhesivas.

Los valores medios de escape y velocidad del cohete se usan para determinar los valores para el volumen de aire comprimido y la presión, la velocidad del chorro, y la aceleración inercial en una discretización del modelo físico en pequeños pasos de tiempo en la etapa de empuje. Lo que permite actualizar la velocidad, aceleración y altitud del cohete al final del periodo de empuje y así hallar las condiciones iniciales del período de balística.

Una vez que el período de empuje ha terminado, el cohete se halla en régimen de vuelo balístico. A partir de aquí el empuje ha dejado de actuar por lo cual la ecuación (1) se reduce a:

$$m_e \ddot{x}^j = -\frac{1}{2} \rho_{atm} V_c^2 C_d A_t - m_e g \sin \alpha_i \quad (2)$$

La presencia en el medio de un fluido como el aire, ejerce una fuerza de rozamiento sobre el cohete, que depende del módulo de la velocidad y cuyo sentido es opuesto a esta.

En esas condiciones, el movimiento de una partícula en un campo gravitatorio uniforme no sigue estrictamente una parábola y es sólo casi-parabólico, pero dadas las características del movimiento dicha aproximación es válida. A las velocidades desarrolladas, el flujo es predominantemente turbulento produciéndose remolinos y presiones que generan una fuerza de frenado proporcional al cuadrado de la velocidad.

Para esas ecuaciones la trayectoria resulta de integrar las ecuaciones diferenciales precedentes obteniendo unas ecuaciones de balística con rozamiento que resultan en un tiro cuasi parabólico a partir de las condiciones iniciales halladas al final de l periodo de empuje. La solución de estas ecuaciones con las condiciones iniciales $t=0$, $v_x=v_{0x}$, $v_y=v_0$.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= v_{0x} \exp(-bt) \\ \frac{dy}{dt} &= \left(\frac{g}{b} + v_{0y} \right) \exp(-bt) - \frac{g}{b} \end{aligned} \quad (3)$$

Para un proyectil disparado con velocidad v_0 y ángulo de tiro θ . Las velocidades iniciales son $v_{0x}=v_0 \cdot \cos \theta$, $v_{0y}=v_0 \cdot \sin \theta$. A modo de ejemplo para una trayectoria en la cual no se

consideran la componente de g por estar ésta contenida siempre en el eje de referencia y se llega a una expresión similar a la siguiente:

$$\begin{aligned}x &= \frac{v_{0x}}{b} (1 - \exp(-bt)) \\y &= \frac{1}{b} \left(\frac{g}{b} + v_{0y} \right) (1 - \exp(-bt)) - \frac{g}{b} t\end{aligned}\quad (4)$$

Anulando el parámetro tiempo de estas dos ecuaciones y asignando el valor final de “ y ” puede despejarse el alcance “ x ” del proyectil. Habiendo hecho todas estas consideraciones y experiencias antes del ensayo final, se presenta el Informe con una semana de antelación al menos de la fecha fijada para la experimentación y con la hoja final de estimaciones completa entre los que se declaran las características del cohete y la performance que espera alcanzar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lo alumnos aprenden que un cohete aerodinámicamente estable volará con su “nariz” por delante y mostrará una trayectoria de arco suave como la de la figura 4.

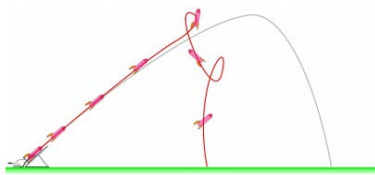


Figura 3: trayectoria de vuelo inestable

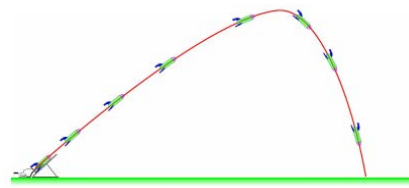


Figura 4 trayectoria de vuelo estable

Los alumnos demuestran gran interés, entusiasmo y proactividad a pesar de la barrera matemática que los separa del mundo universitario y cuentan con gran apoyo y empuje de sus docentes de ciencias físico matemáticas para salvar cualquier distancia que puedan encontrar para la solución de las problemáticas presentadas.

Si bien los alumnos cuentan con instalaciones de reciente modernización no tenían una chance concreta de proyectar un problema y resolverlo con el uso de celdas de carga túnel de viento y demás equipamiento provistos por la facultad para a experiencia.

CONCLUSIONES

El principal interés en aplicar esta metodología de enseñanza es la propia inquietud generada en el alumnado que ve por primera vez en muchos casos en sus estudios en que pueden cuantificar, analizar y ver plasmados en los resultados de la experiencia todos los conceptos vistos en un curso, midiendo resultados esperados, fruto de su anteproyecto y las implicancias de las decisiones tomadas en el proceso.

Queda mucho trabajo por desarrollar en lo que respecta sistema de liberación óptimos, configuraciones multibotellas y multietapa. Que quedaron relegados por falta de tiempos al segundo año de trabajo.

Respecto de los modelos, que se puedan implementar para resolver la dinámica del problema, ya han surgido discusiones y alternativas de cálculo a las presentadas buscando además ponderar en que etapa del desarrollo es deseable profundizar el análisis del modelo.

Así mismo será un desafío a futuro coordinar las tareas grupales con un objetivo común así como las salidas a campo para prueba, puesto que las salidas por institución presentan ciertas limitaciones que deberán ser salvadas con una agenda de actividades pautada con mucha antelación.



Figura 5: Prototipos de Modelos multietapa que ensayan y buscan su puesta a punto sirviendo de modelo a las escuelas técnicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Joseph M. Prusa, Hydrodynamics of a Water Rocket SIAM Review Vol 42, N°4 pp.719-726
<http://www.siam.org/journals/sirev/42-4/34822.html>
- M de Podesta. http://www.npl.co.uk/upload/pdf/wr_booklet_print.pdf
- Estimación de trayectoria y tiempo de vuelo de un Cohete de Agua, Trabajo Integrador - Mecánica de Fluidos - A0052 – Año 2013.
- Estimación de trayectoria y tiempo de vuelo de un Cohete de Agua, Trabajo Integrador - Mecánica de Fluidos - A0052 – Año 2016
- Aircommander

Trabajo anterior vinculado presentado en:

- CAIA 3