



IES Arquitecto Ventura Rodríguez

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y LANZAMIENTO DE UN COHETE EXPERIMENTAL

Y SU IMPLEMENTACIÓN COMO PROYECTO VISUAL EN EL AULA



Autor: Pablo Antón Granado

Tutor: Gregorio Rosa Palacios

Trabajo de Investigación 2021-2022

Proyecto de Investigación Bachillerato de Excelencia
IES Arquitecto Ventura Rodríguez

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y LANZAMIENTO DE UN COHETE EXPERIMENTAL

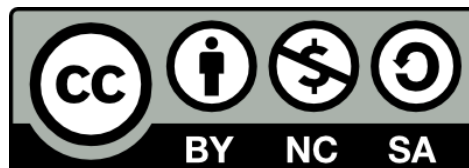
Y SU IMPLEMENTACIÓN COMO PROYECTO VISUAL EN EL AULA

Autor: Pablo Antón Granado

Tutor: Gregorio Rosa Palacios

2021-2022

Trabajo regulado bajo licencia [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



“Lo más importante que podemos hacer es inspirar a las mentes jóvenes y avanzar en el tipo de educación científica, matemática y tecnológica que ayudará a los jóvenes a llevarnos a la próxima fase del viaje espacial”.

John Glenn

En primer lugar, he de agradecer a todos los compañeros que colaboraron en el marco práctico de este proyecto y que hicieron posible el lanzamiento del cohete. A Dominic, Gabriel, Cristina, Tyn, Dennis, Christine Suchman y todos los que echaron una mano durante las jornadas de lanzamiento.

Gracias a Clear Creek por proporcionar el laboratorio tecnológico, a Tripoli Houston por ceder sus instalaciones durante los lanzamientos y al IES Arquitecto Ventura Rodríguez por motivar la realización de esta investigación.

Debo agradecer también a Gregorio Rosa, tutor de este proyecto y quien me ha apoyado y aconsejado incondicionalmente durante los últimos meses, además de a Paz Rosado, quien me enseñó a ver la física con otros ojos y ha estado pendiente de mí durante gran parte de este largo proceso.

A mis compañeros y compañeras de 2ºE, que han vivido esta misma experiencia de forma paralela. El clima de interés común por nuestras investigaciones ha sido sin duda una de las claves del éxito.

Gracias a mis padres, Carmen y Adolfo, a mi hermano Miguel, que me han guiado cuando más perdido estaba y me han motivado a seguir adelante. Gracias a mis abuelos, que, a pesar de no tener oportunidades en su juventud, siempre me han transmitido la importancia de seguir aprendiendo.

Y, por último, gracias a todos los familiares y amigos que han sido mi apoyo moral durante esta investigación.

Os estaré siempre agradecido.

SÍNTESIS

El principal propósito de esta investigación es el de desarrollar un cohete experimental, incluyendo todos los procesos de diseño, construcción y lanzamiento. Este trabajo abarca contenidos tecnológicos y gira en torno a unos principios básicos de ingeniería. Además, se centra en su marco científico en el estudio de la estabilidad aerodinámica y sus aplicaciones en la cohetaría experimental o amateur. La hoja de cálculo toma, por tanto, un importante papel predictivo y es una de las herramientas clave durante la investigación. Por último, se aplican todos los conocimientos tratados a un contexto social, en concreto al aprendizaje científico en los centros educativos españoles. El estudio concluye con distintas resoluciones que remarcan la cohetaría experimental como una actividad coste-efectiva de llevar a cabo en el aula.

ABSTRACT

Experimental rocketry is a relatively new discipline that involves a wide variety of areas into a single activity. Taking part in such projects, students increase their knowledge in terms of physics, technology and engineering, improving at the same time their ability to work with other people. Therefore, this study pretends to analyze the viability of these experimental projects in the Spanish classroom and to prove it by building and launching a model rocket.

Firstly, a lot of time was spent researching for previous papers with similarities in the objectives and procedures. After creating the first sketches and understanding the main principles behind experimental rocketry, a design was made using a computer assisted drawing tool (Autodesk Inventor) This step led to the building process, which took part in a technological lab, where the team got to build a rocket using simple materials.

As soon as the rocket was built, we contacted Tripoli Houston, who agreed on letting us launch the prototype in a safe environment. By doing so, different conclusions were obtained, such as the importance of measuring the aerodynamic stability value of any design previous to its launch. Due to this finding, a spreadsheet was designed to easily calculate this variable in any flat-finned rocket.

Concluding, all the designs and experiences learnt during the making of this paper were written down so that anyone who desires to get hands-on and start working on a similar project can do it more easily than before. In the end, this type of project has been proved to be less complex than what people tend to think and it is also a very cost-effective way of understanding physics from an experimental perspective.

ÍNDICE

ESTADO DEL ARTE	15
1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO	15
2. HISTORIA Y REFERENTES EN LA DISCIPLINA	15
3. PRECEDENTES	17
3.1. <i>EN LA COHETERÍA EXPERIMENTAL</i>	17
3.2. <i>EN EL PLANO EDUCATIVO</i>	17
4. TIPOS DE COHETES Y VIABILIDAD DEL PROYECTO	18
4.1. <i>REGULACIONES VIGENTES</i>	18
OBJETIVOS.....	19
1. DESARROLLO DE UN COHETE EXPERIMENTAL	19
2. BASE PARA FUTUROS PROYECTOS EDUCATIVOS	19
DESARROLLO	19
1. METODOLOGÍA	19
1.1. <i>MÉTODO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO</i>	19
2. DISEÑO.....	20
2.1. <i>PRIMERAS HIPÓTESIS E IDEAS. DISEÑO CONCEPTUAL</i>	20
2.2. <i>DISEÑO EN 3D</i>	21
3. CONSTRUCCIÓN	21
3.1. <i>MATERIALES Y SEGURIDAD</i>	21
3.2. <i>FASES DE LA CONSTRUCCIÓN</i>	22
4. PRIMEROS LANZAMIENTOS	23
4.1. <i>RESULTADOS Y PRUEBAS VISUALES</i>	23
5. LANZAMIENTOS FINALES	25
6. ESTUDIO TEÓRICO DE LA ESTABILIDAD AERODINÁMICA.....	26
7. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL ESTUDIO TEÓRICO SOBRE ESTABILIDAD AERODINÁMICA	30

CONCLUSIONES	33
1. CONCLUSIÓN PRINCIPAL.....	33
2. SOBRE EL DESARROLLO DE UN COHETE EXPERIMENTAL	33
3. SOBRE LA COHETERÍA EXPERIMENTAL COMO RECURSO EDUCATIVO.....	34
4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	35
5. CONCLUSIÓN PERSONAL	35
BIBLIOGRAFÍA.....	36
ANEXO 1. NORMATIVAS EN TERRITORIO ESPAÑOL.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO 2. PRIMEROS BOCETOS, DISEÑOS DEL MODELO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO 3. USO DE LA HOJA DE CÁLCULO COMO RECURSO ADICIONAL.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO 4. SISTEMA DE ALERONES ACOPLABLES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ANEXO 5. VÍDEOS Y RECURSOS VARIOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

ESTADO DEL ARTE

1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

Las aplicaciones de la física en ámbitos práctico-visuales suelen ser una herramienta infravalorada en el marco educativo. A pesar de los avances tecnológicos desarrollados en el último siglo, la creación de nuevas técnicas de enseñanza sigue siendo una tarea pendiente a día de hoy. Dentro de esta problemática, las ciencias exactas como la física, la química y la biología suelen ser las más afectadas, al centrarse en el estudio de fenómenos de naturaleza visual y/o experimental difíciles de representar en el aula.

Es así como aparece el concepto de la **cohetería experimental**, partiendo desde un esfuerzo por llevar un área científica aparentemente compleja a las manos de cualquiera que desee adentrarse en el mundo de la física y la tecnología, sin requerir conocimientos avanzados sobre estas áreas.

Y es que desde la carrera espacial en los años sesenta, la cohetería no ha parado de aumentar su potencial para acercar el conocimiento físico a las nuevas generaciones, moviendo cantidades importantes de dinero alrededor del globo. En 2021, destacan los 19.8 B€ destinados a NASA (Science Appropriations Act, 2021) y los 6.5 B€ a ESA (esa.int, 2021).

En cambio, aunque esta área del conocimiento suele ser clasificada como una rama científica demasiado compleja y por tanto, fuera del alcance del ciudadano medio, puede llegar a simplificarse a niveles elementales comprensibles incluso por los estudiantes más jóvenes.

La cohetería experimental destaca como una de las disciplinas más útiles para entender áreas como la **cinemática** o la **dinámica**, normalmente impartidas desde una perspectiva teórica, además de proporcionar unos conocimientos tecnológicos básicos sobre el desarrollo de un producto, adentrándose también en el mundo de la **ingeniería**.

2. HISTORIA Y REFERENTES EN LA DISCIPLINA

Esta nueva rama científica alcanzó su momento álgido a finales de los años 50, tras el lanzamiento de Sputnik 1 y la posterior carrera espacial que acabaría a finales de los sesenta con el alunizaje. A pesar de ganar popularidad en la segunda mitad del siglo XX, los primeros registros individuales en relación a esta disciplina datan de 1926, cuando **Robert Goddard**, un pionero en el área, lanzó el primer cohete de propulsión líquida (Lehman, 1963) y más tarde con la creación de la Sociedad Interplanetaria de Manchester (Burgess, 1937) y otras 19

sociedades distribuidas por Europa y Norteamérica para el año 1952 (Heinz v. Diringshofen, 1952)

La **Segunda Guerra Mundial** también marcó un antes y un después en el ámbito de la cohería profesional y amateur. El desarrollo del modelo V2 en 1942 por parte de la entonces Alemania Nazi fue el primer paso hacia la construcción de cohetes a gran escala e imitaciones de los mismos. Tras la derrota militar de Hitler, la escuela de ingenieros aeroespaciales alemana fue obligada a dispersarse principalmente en los Estados Unidos y la Unión Soviética, a través la Operación Paperclip y Osoaviakhim, respectivamente. Estos hechos históricos dieron paso a la conocida **carrera espacial** de los años sesenta entre las dos potencias nombradas, que marcaría un punto de inflexión en las ambiciones de la juventud por la exploración espacial (Rockwell, 2012).

Es así como numerosos estudios relatan que la construcción de cohetes experimentales se destacó como el proyecto estrella en el aula durante finales de los 50 y principios de los 60, principalmente en los Estados Unidos (Boggs, 1958).

Estas iniciativas, muchas veces llevadas a cabo en institutos de educación secundaria, dieron paso a la creación de las asociaciones referentes en la actualidad. Entre las más importantes, destacan **Tripoli (TRA)**, creada por un grupo de adolescentes en 1964 (Tripoli.org, 2012) o *National Association of Rocketry (NAR)*. Aunque la mayoría de organizaciones nacionales se desarrollaron principalmente en los Estados Unidos, posteriormente se impulsaron iniciativas similares en otros países como Reino Unido (*UKRA*) o Sudáfrica (*Rocketry SA*).

En España, el referente principal es la prefectura de *Tripoli España*, fundada en el seno del club *SpainRocketry* en diciembre de 2005, convirtiéndose en uno de los catorce clubes asociados con la organización americana. Al frente de *Tripoli Spain* se encuentra José Luis Cortijos, uno de los pioneros, en el ámbito estudiado, en nuestro país.

Según su propio testimonio para esta investigación, desde Tripoli España se han impulsado iniciativas focalizadas en la juventud desde su creación, pero las nuevas leyes aplicadas en los últimos años han dificultado muchas las actividades de la asociación, que en la actualidad lucha junto a diferentes entes profesionales por el cambio de unas normativas que consideran exageradas y que por el momento han parado casi por completo su actividad de campo (Real Decreto 1036/2017) (Comisión Unión Europea, 2019).

En cambio, otras asociaciones como Cosmic Research (cosmicresearch.org), fundada en 2016 por un grupo de estudiantes de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), continúa sin problemas con sus proyectos según confirmaron personalmente. De hecho, planean llevar a cabo el lanzamiento más alto de un modelo construido por estudiantes universitarios en Europa con su cohete Bondar, en algún punto de 2022.

3. PRECEDENTES

Desde el comienzo de la investigación, se han hallado precedentes similares en lo que se refiere al diseño y construcción de un cohete a escala reducida, además de estudios previos que remarcan la importancia de las actividades prácticas y visuales en el aula para una mejor comprensión y un aumento de motivación por parte del alumnado.

3.1. EN LA COHETERÍA EXPERIMENTAL

En lo que se refiere a la cohetería experimental, existen en la actualidad distintos concursos y competiciones enfocadas en el aprendizaje del área por parte de estudiantes de distintos niveles, centrándose principalmente en estudiantes de secundaria y universitarios.

Uno de los concursos globales que más atención recibe cada año es el **Concurso Internacional de Cohetería (IRC)** al que clasifican equipos de estudiantes de USA (TARC), Reino Unido (UKROC), Francia (GIFAS) y Japón, dónde se celebran sus respectivos clasificatorios nacionales anualmente. Es precisamente el evento organizado en Estados Unidos el que sirvió de precedente clave para este proyecto, y lo que hizo posible los lanzamientos, en colaboración con los ya mencionados Tripoli (TRA) y N.A.R. En estas iniciativas asociadas participan cada año más de 20.000 estudiantes a nivel mundial (Revelli, 2016).

Otros referentes son *EUROC*, organizado por la agencia espacial portuguesa y *WSMC* con la participación de más de 25 países alrededor del globo.

Además, también existen precedentes similares en nuestro país, como CanSat, organizado por la Agencia Espacial Europea, que a través de ESERO (esero.es), impulsa el conocimiento relacionado con la industria aeroespacial.

3.2. EN EL PLANO EDUCATIVO

Durante las últimas décadas se ha llegado a la conclusión común de que los estudiantes no hallan motivación en una enseñanza puramente teórica. Por el contrario, se apunta a que *“el aprendizaje por descubrimiento es especialmente apropiado para áreas como las ciencias”*

(Más, 2014) y que “es necesario romper con la rutina metodológica en el aula, utilizando recursos didácticos alternativos” (Cavero, 2006).

A su vez, se destaca que, en muchas ocasiones, los docentes no cuentan con los **recursos suficientes** para implantar métodos de enseñanza innovadores en sus respectivas materias, y la falta de experiencias previas en este ámbito hace que las iniciativas se vean frenadas. (Cañal, Travé, & Pozuelos, 2011). Una de las posibles soluciones señaladas sería la **oferta de formación** adicional en relación con el desarrollo de proyectos experimentales en el aula (Pozuelos, 2007, pág. 135).

Por otro lado, aunque los docentes pueden sentir desconfianza por parte del alumnado a la hora de organizar nuevas actividades, varios estudios muestran que, en cambio, los estudiantes sí se preocupan por la calidad educativa. Tras preguntar a una muestra de 700 jóvenes (VTR, 2008), el 83,7% mostró **gran preocupación** por este ámbito, situándolo así por encima de temas de alto calibre como el medioambiente (66.9%) o el racismo (54,7%).

Todos estos datos y conclusiones señalan que cualquier tipo de proyecto experimental y/o innovador deberá contar con el **apoyo tanto de alumnos y profesores** además de con la ayuda de la comunidad educativa.

4. TIPOS DE COHETES Y VIABILIDAD DEL PROYECTO

Los cohetes diseñados por aficionados, suelen estar diferenciados en **dos áreas** distintas que dependen principalmente de si se pretende hacer uso de materiales prefabricados o si se construirá el diseño de forma manual en su totalidad (Incluyendo el motor).

Esta segunda variante suele ser más compleja además de requerir conocimientos avanzados acerca de cómo construir un motor de propulsión. Es por esto que cualquier proyecto desarrollado en el aula será normalmente centrado en la **cohetería modelista** donde el motor es adquirido de una fuente fiable y cuenta por tanto con unas garantías de seguridad aceptables.

4.1. REGULACIONES VIGENTES

Todo intento de lanzamiento en el ámbito de la cohetería experimental ha de ser realizado bajo la normativa vigente establecida por el Gobierno de España (Real Decreto 1036/2017). Se adjuntan las regulaciones en el Anexo 1. Al realizarse el apartado experimental de este proyecto en territorio americano, se pudo sobrepasar ese techo de 120 metros marcado en España, por lo que, de realizarse un proyecto similar en nuestro país, se debería adquirir un motor de menor potencia al utilizado en estas prácticas para poder permanecer dentro de la ley.

OBJETIVOS

1. DESARROLLO DE UN COHETE EXPERIMENTAL

El principal objetivo de este proyecto es el **diseño** y **construcción** de un cohete experimental, además de su **lanzamiento** en un sistema abierto. Se incluye en este proceso el diseño de un modelo en 3 dimensiones utilizando distintos recursos tecnológicos y adentrándose en el área de la ingeniería y el desarrollo de un producto. Por otro lado, se marca como objetivo específico el **estudio de la estabilidad** de un móvil en un medio y su posible utilidad en cohetes de alcance reducido, mejorando la **seguridad** del entorno científico y la de los participantes en futuros lanzamientos.

2. BASE PARA FUTUROS PROYECTOS EDUCATIVOS

Este proyecto de investigación no solo cuenta con unos objetivos específicos en relación con el desarrollo de un producto físico y su comportamiento científico, sino que también trata de **divulgar** unos contenidos que puedan servir de base para futuras iniciativas emprendidas en centros educativos. Esto incluye la documentación de todos los procesos realizados durante la investigación, lo que facilitaría cualquier intento de réplica y/o **mejora**. De esta forma, se pretende potenciar la aplicación práctica de la física elemental en el aula.

DESARROLLO

1. METODOLOGÍA

1.1. MÉTODO CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO

Es importante mencionar que los procedimientos utilizados durante el desarrollo de este artículo se llevaron a cabo a través de diferentes métodos de estudio debido a la temática tratada, que requiere de distintas herramientas tecnológicas además del estudio de algunos aspectos científicos.

Al presentarse por igual manera ambas áreas de estudio, se hizo uso de las dos metodologías para tratar de llegar a un punto intermedio entre el desarrollo de un producto y el estudio científico de un fenómeno, como es el lanzamiento de un móvil perpendicularmente a la superficie terrestre y su comportamiento aerodinámico.

Tal y como se puede deducir, la coherería siempre ha sido una industria altamente relacionada con la tecnología punta y la ciencia al mismo tiempo. Además, en su ámbito

profesional, la vida de algunos expertos está en juego, lo que requiere una extrema **precisión** y **seguridad**. Por ello, la predicción científica juega un papel de gran importancia. Se observa un esquema de **combinación de metodologías** en la Figura 2 del [Anexo 5](#).

2. DISEÑO

2.1. PRIMERAS HIPÓTESIS E IDEAS. DISEÑO CONCEPTUAL.

El primer paso para comenzar a esbozar un diseño fue el de **delimitar el alcance** del mismo. Se decidió crear un primer modelo que no superara 1 metro de altura en su totalidad y que además se mantuviera por debajo de los 500 gramos de peso. Estos convenios fueron decididos principalmente tras la búsqueda de precedentes a este proyecto con similitudes en las capacidades y objetivos (José Rojas, 2008) (Peckham, 2014) (Revelli, 2016).



Figura 1: Motor F39T-6.

Además, se decidió utilizar un **motor comercial** de potencia media. Sin experiencia previa, es más recomendable adquirir un motor prefabricado que certifique la seguridad de cualquier lanzamiento. El modelo concreto que se usó se denomina F39T de la marca AeroTech (Figura 1). Este cuenta con un empuje máximo de 59,6 Newtons, 70 mm de altura y 24 mm de diámetro. Su tiempo de combustión es de 1.3 segundos.

El precio inicial por el que se adquirió el motor fue de 9.90 €/Unidad más los 54.01 € de la carcasa para el motor, siendo esta reutilizable.

Hay que hacer un pequeño inciso para mencionar los distintos tipos de motor que se comercializan en el mercado. Se diferencian principalmente por su potencia y se clasifican desde los motores “A” hasta los motores “G”, que marcan el límite de la cohetaría experimental con su ámbito profesional. En el caso particular de esta investigación, se utilizó uno de clase “F”. Dependiendo de la altura que se desee alcanzar, se optará por uno u otro.

El **primer diseño conceptual** del cohete presentaba cuatro piezas principales diferenciadas entre sí; una nariz superior, un cuerpo superior, una transición central, un cuerpo inferior y un set de seis alerones cilíndricos (que parecían haber sido exitosos en diseños previos). Se creó también una cavidad interna para introducir el motor posteriormente. Este primer boceto se puede observar en el [Anexo 2](#)

2.2. DISEÑO EN 3D

Tras el proceso de esbozo y los primeros días tratando de encontrar las proporciones más beneficiosas para el diseño de forma hipotética, se introdujeron todas estas ideas en un programa informático de **modelación en 3 dimensiones** (Autodesk Inventor). La licencia del software fue obtenida gracias a una prueba gratuita para estudiantes y profesores accesible desde su [página web](#) (Autodesk, 2020). Este paso fue fundamental para visualizar los bocetos iniciales de una forma más intuitiva. Además, se imprimió en 3D la transición central que no era factible de construir a mano, dada su mayor complejidad.



Figura 2: Primer diseño en 3D.

Todos los planos del primer diseño se encuentran en el [Anexo 2](#), mostrando así los resultados de este primer paso. Además, en el mismo apartado se encuentra un enlace con los videos completos sobre la realización del diseño, para comprender los procesos necesarios y el funcionamiento del programa utilizado.

3. CONSTRUCCIÓN

3.1. MATERIALES Y SEGURIDAD

Tras varias semanas de investigación y diseños, llegó el momento de llevar a cabo la construcción de las distintas partes. Para este proceso, se hizo uso de un **laboratorio científico-tecnológico** con las herramientas necesarias. El único requisito fundamental en este proceso fue el de cumplir con todas las medidas de seguridad pertinentes. Así, se compraron guantes de látex para poder manejar cualquier tipo de pegamento sin dañar la piel. Hay que destacar que no fue necesario el uso de ninguna herramienta eléctrica que pudiera suponer un riesgo para la integridad de los participantes. Se observa una tabla con todos los materiales utilizados, las partes resultantes y su lugar de adquisición en la Figura 3 del [Anexo 5](#).

Es necesario recalcar que todos los materiales utilizados fueron precisamente elegidos con una función principal de aligerar la masa total del modelo (0,469 kg). A pesar de haber podido optar por unos más resistentes y rígidos, esto hubiera comprometido la eficiencia final del cohete, sobrepasando además los 500 gramos preestablecidos como límite. Se puede ver la tabla de presupuesto del proceso de construcción en la Figura 1 del [Anexo 5](#).

3.2. FASES DE LA CONSTRUCCIÓN

El primer paso fue el de recortar los tubos de papel fenólico tal y como se diseñaron en el modelo. De esta forma, utilizando un cúter de precisión, se crearon dos tubos de 200 mm y 350 mm además de seis unidades de 110 mm destinadas a los alerones del modelo.

Todos ellos fueron reforzados con cola vinílica, lo que aumenta la dureza del material y los hace impermeables. Fueron pulidos posteriormente con papel de lija para mejorar su comportamiento aerodinámico. Hay que mencionar que se tuvieron que esperar 24 horas para poder asegurar un secado óptimo de la cola en los tubos, lo que ralentizó en cierta medida el proceso. Se observan los tubos ya recortados junto con la lona de nylon, la nariz superior y la cola en la Figura 3. Además, en el [Anexo 5](#), se adjuntan varias fotos del proceso de construcción.



Figura 3: Materiales utilizados.

Tras este primer paso, se continuó diseñando la estructura interna donde se colocaría el motor posteriormente. Para este proceso, se imprimieron en 3 dimensiones dos aros de sujeción con forma toroidal y un diámetro externo de 80 mm e interno de 28 mm.

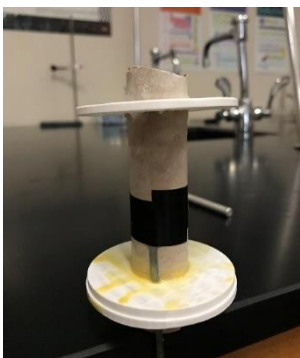


Figura 4: Cavidad del motor.

Estos aros fueron adheridos a un tubo de 28 mm de diámetro y 90 mm de longitud que sería posteriormente el compartimento destinado al motor. Es necesario destacar que una pequeña tablilla de metal fue incluida en la estructura, sobresaliendo en su parte inferior. Su propósito era el de asegurar que el motor no pudiera despegarse del cohete en ningún momento, pudiendo esto resultar peligroso durante el lanzamiento. Esta pieza se observa en la Figura 4, tras su proceso de construcción.

Una vez finalizada la estructura interna del motor, se introdujo una cinta elástica a través del cuerpo inferior del modelo, atando uno de los extremos de la cinta al aro superior de la cavidad del motor y el otro a la parte inferior de la transición impresa anteriormente, quedando el tubo sobre la cuerda y sin posible salida.

El aro inferior de la pieza mostrada en la Figura 4 fue adherida con pegamento epoxídico a la base del tubo inferior, quedando anclada de forma permanente, y con la totalidad de la estructura en el interior del cohete. Este paso asegura que cuando el cuerpo inferior y la transición se separen para activar el paracaídas, no puedan hacerlo totalmente, sino que queden

unidas por el cordón elástico, lo que hará que aterricen en el mismo lugar y que solo sea necesario el uso de un sistema de deceleración en la caída.

Después, se adquirió un cilindro elástico de poliespán, como los utilizados en las piscinas, que serviría para tratar de llevar a cabo la idea de incluir un huevo de gallina en el modelo. Usando solo una pequeña porción del tubo, se recortó una cavidad cilíndrica en su interior. Esta “carcasa” trataría de amortiguar el impacto y prevenir la rotura del huevo.

Tras ese proceso, se pasó a diseñar el paracaídas con una lona de nylon. Se situaron seis marcas en su parte externa donde poder introducir las cuerdas que lo unirían al modelo. Cuando estos hilos estaban totalmente asegurados al paracaídas, se ataron en su otro extremo a la cinta elástica ya mencionada, lo que permitiría guardarlos en el interior del cuerpo inferior y después hacerlos funcionales a partir de la separación de los dos módulos del cohete. Se observa el proceso en la Figura 5.



Figura 5: Diseño del paracaídas.

Continuando con el proceso, se ensamblaron el cuerpo superior del cohete y la transición, que nunca han de ser separados. Además, se llevó a cabo el mismo proceso con los seis alerones, que se situaron en la base del cohete. Por último, se unió la nariz superior con el cuerpo superior y todo este bloque (nariz, cuerpo y transición) al cuerpo inferior. Estas dos uniones son temporales, por lo que no requieren pegamento de cianocrilato, usado previamente.

Como punto final al proceso de construcción se situaron dos piezas alineadas en el cuerpo de mayor diámetro por donde se introduciría después la vara de lanzamiento y se pintó todo el modelo de color rojizo, mejorando el aspecto visual del mismo.

4. PRIMEROS LANZAMIENTOS

4.1. RESULTADOS Y PRUEBAS VISUALES

El 27 de marzo de 2021, *Tripoli Houston* organizó la **primera jornada de lanzamientos** en la que el equipo pudo participar. Esta actividad se llevó a cabo en un campo abierto alejado de cualquier centro urbano y con el permiso de las autoridades competentes. Además de suponer una oportunidad segura de lanzamiento, también se pudo conversar con diferentes equipos que trataban de construir cohetes similares e incluso preguntar a estudiantes más avanzados que habían desarrollado modelos mucho más complejos.

Al llegar al área de lanzamiento, se tuvo que poner a punto el cohete durante algo más de dos horas. Esto incluye procesos como la organización de los hilos del paracaídas, que han de estar correctamente alineados y doblarse regularmente. El propio paracaídas se dobla en un semicírculo y se repite este proceso por segunda vez. Tras cada doblez se impregna la superficie interior con polvos de talco para aumentar el agarre de las capas entre sí, disminuyendo las posibilidades de que pierda su posición durante el despegue. Tras el segundo doblez, se sitúan las cuerdas ya recogidas sobre la superficie del paracaídas y se unen los extremos de esta, dejando las cuerdas envueltas en el interior. Después se introduce con cuidado este componente en el tubo inferior del cohete, donde previamente hay que situar un material ignífugo que previene cualquier posibilidad de que el motor incendie la parte superior del móvil. Tras este proceso, se sitúa el huevo en su carcasa de protección. Es importante introducir este sujeto de prueba dentro de una bolsa estanca.

Después se introduce el altímetro en la nariz superior que se adhiere a este con cualquier celofán. Hay que remarcar también que este es el único componente electrónico que incorporamos durante los lanzamientos, ya que no se pensaban tomar más medidas que la altura y el tiempo, y tratando también de reducir al máximo la masa y el volumen del modelo.

La preparación previa al lanzamiento finaliza con la incorporación del motor al cohete, que se introduce por su parte inferior, y se sitúa en el compartimento específicamente diseñado con las medidas del mismo. Se observa en la Figura 6.

Cuando la organización dio luz verde a nuestro modelo, certificando que se encontraba en condiciones de seguridad aptas para ser lanzado, se colocó en la plataforma de despegue (proporcionada por la organización) a través de las dos piezas alineadas previamente en el tubo inferior. Esta misma se orientó a favor del viento y con una desviación de 5 grados respecto a la normal, para no experimentar una fuerza aerodinámica demasiado notable durante los momentos de ignición.

El cohete se puso en marcha en dos ocasiones a lo largo de la jornada, resumiendo horas de trabajo en pocos segundos. A pesar de todo, se alcanzaron varios objetivos preestablecidos. Uno de ellos fue el de recuperar al sujeto de pruebas (huevo) con total éxito y sin presentar ninguna rotura aparente. Tras ser extraído del modelo se pudo comprobar que aún se encontraba en buenas condiciones y por tanto no había sido deteriorado durante el vuelo.

En lo que se refiere al tiempo y la altura, el modelo alcanzó su apogeo a **197 metros** (647 pies) tras **28 segundos** de vuelo. En el segundo intento del día, la marca fue de

204 metros (669 pies) tras **29,5 segundos** de vuelo. En las siguientes figuras (6 y 7) se pueden ver más detalles del lanzamiento. Se adjuntan también en el [Anexo 5](#) varias imágenes de la jornada de lanzamiento.



Figura 6: Inserción del motor.



Figura 7: Adecuación del paracaídas.

Los problemas puntuales observados durante la primera jornada de lanzamientos fueron tenidos en cuenta y se elaboraron distintas mejoras en el modelo con el objetivo principal de reducir el tiempo de preparación previo al lanzamiento. Estas mejoras se mencionan en la Figura 7 del [Anexo 5](#). Además, durante el periodo de tiempo comprendido entre las jornadas de lanzamiento, se ingenió un nuevo modelo de alerones acoplables que se adjunta como alternativa en el [Anexo 4](#).

5. LANZAMIENTOS FINALES

El 24 de abril de 2021, *Tripoli Houston* convocó a las afueras de Hitchcock, Texas la **segunda jornada de lanzamientos** y clasificación para el campeonato nacional de cohetería (TARC). El equipo presentó allí el modelo definitivo incluyendo todas las mejoras mencionadas en la Figura 7 del [Anexo 5](#). Los resultados fueron positivos en mayor medida, pudiendo lanzar el cohete en cinco ocasiones. Se mejoró así la marca previa de dos únicos vuelos y se pudieron obtener datos más variados. En cuanto a la altura alcanzada, el nuevo diseño de alerones planos (aunque sin la incorporación del sistema de engranaje) dio sus resultados y el móvil llegó a alcanzar 256 metros de altura, con una media de **237 metros** entre los cinco lanzamientos. Además, la incorporación del nuevo sistema de paracaídas acoplables permitió mantener el cohete en el aire durante un periodo más amplio de tiempo y reducir así su velocidad de impacto con la superficie. El tiempo medio registrado fue de **42 segundos**.

Aunque el equipo no consiguió la clasificación para la fase nacional en Washington, los resultados obtenidos fueron notablemente satisfactorios y dejaron reflejado el intenso trabajo durante los meses previos.

6. ESTUDIO TEÓRICO DE LA ESTABILIDAD AERODINÁMICA

Uno de los puntos clave de este proyecto ha sido en todo momento velar por la seguridad de los participantes, y aquellos que de una manera u otra se involucren en el proceso. Es este el motivo principal que llevó a la investigación del término de **estabilidad** y sus aplicaciones en la optimización de un diseño aeromodelístico.

En aeronáutica, la estabilidad de un móvil se refiere a su capacidad física para corregir la trayectoria del vuelo cuando fuerzas externas son aplicadas en la superficie del vehículo. Esto quiere decir que cuanto más estable sea un cohete, tendrá menos posibilidades de salir de su trayectoria ideal y por tanto poder causar accidentes en el entorno de lanzamiento.

La estabilidad aerodinámica aplicada en cohetes experimentales es una magnitud **escalar** y **adimensional**. Se calcula como el cociente de la diferencia de distancia entre el centro de masas y de presiones partido del diámetro mayor del modelo. Por tanto, la estabilidad está definida según la siguiente fórmula.

$$C = \frac{X_{CP} - X_{CG}}{D_M} \quad [C] = \text{Calibres} \quad [1]$$

X_{CP} = Posición del centro de presiones (CP)

D_M = Diámetro mayor del modelo

X_{CG} = Posición del centro de gravedad (CG)

C = Estabilidad

A pesar de no contar con una unidad dimensional, se expresa en **calibres**. Como se deduce en la fórmula, la estabilidad es de 1 calibre cuando la distancia entre el centro de presiones y el centro de gravedad es igual al diámetro mayor del modelo.

Cualquier modelo diseñado deberá presentar una estabilidad de entre 1 y 3 calibres, preferentemente y nunca debería situarse por debajo de la unidad. Cuando se cumpla esta condición se puede afirmar que el cohete es aerodinámicamente estable.

Para entender el porqué de este razonamiento es necesario definir qué es el centro de gravedad y el centro de presiones, dos factores clave en la ecuación.

Def1: El **Centro de Gravedad** o Centro de Masas (CG) es aquel punto donde la masa de un móvil se concentra de forma hipotética y define a su vez el punto de oscilación de cualquier movimiento rotatorio cuando se aplican fuerzas en el móvil.

Def₂: El **Centro de Presiones** (CP) es aquel punto donde se aplican todas las fuerzas aerodinámicas en forma de un vector suma y su posición en el móvil tiene una relación directa con el sentido de una posible rotación del modelo alrededor del CG.

Sobre el centro de gravedad se aplica el peso del modelo y el empuje producido por el motor. Por tanto, el vector suma aplicado en el CG se define por la siguiente fórmula.

$$\vec{F}_{CG} = \vec{E} + m\vec{g} \quad [2]$$

En nuestro caso, podemos calcular esta fuerza, ya que conocemos el empuje máximo del motor además de la masa en el momento de despegue (que puede variar ligeramente debido al proceso de combustión) y la aceleración gravitatoria.

$$|F_{CG}| = 59,6N - 0,469g \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 55,0N$$

Sin embargo, ese vector fuerza no actuaría con una dirección y sentido factibles de estudiar cuando el cohete tenga un ángulo de ataque respecto al eje vertical. Por eso es necesario descomponer el vector peso para estudiar de aquí en adelante todas las fuerzas en los ejes del cohete y no del medio.

$$si \alpha \neq 0 \rightarrow \begin{cases} \vec{F}_{CG\parallel} = \vec{E} + \vec{P}_y & ; |F_{CG\parallel}| = E - mg \cos \alpha \\ \vec{F}_{CG\perp} = \vec{P}_x & ; |F_{CG\perp}| = mg \sin \alpha \end{cases} \quad [3]$$

α = Angulo de ataque

m = Masa

g = Aceleración de la gravedad

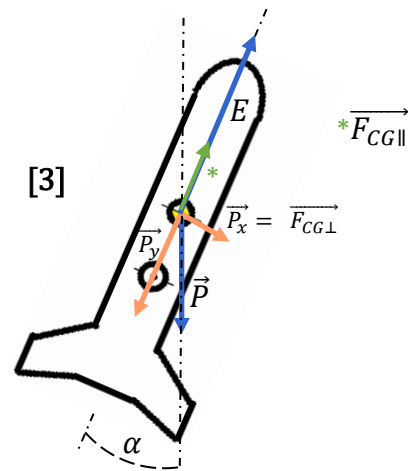


Figura 8: Descomposición de Fuerzas (CG).

A su vez, se pueden expresar todas las fuerzas aerodinámicas aplicadas sobre el centro de presiones como un único vector suma, que actúa perpendicularmente a la superficie de lanzamiento y en contra del movimiento, al igual que el peso. Este vector siempre mantendrá su dirección y sentido debido a que la trayectoria (y por tanto el viento relativo) es principalmente vertical, a pesar de poder experimentar posibles desviaciones despreciables. Al igual que con el peso, resulta eficiente descomponer esta fuerza total en dos componentes en torno a los ejes del móvil y no del entorno. La fuerza descompuesta en el eje paralelo al cohete es igual a la resistencia aerodinámica que irá en contra del movimiento y la componente

perpendicular será igual a la sustentación, que más tarde será la clave para la estabilización del modelo. Todo esto se aprecia en la Fórmula 4 y en la Figura 9.

$$si \alpha \neq 0 \rightarrow \begin{cases} \vec{F}_{CP\parallel} = \vec{A} \cos \alpha = \vec{R}_A \\ \vec{F}_{CP\perp} = \vec{A} \sin \alpha = \vec{S} \end{cases} \quad [4]$$

\vec{A} = Vector suma fuerzas aerodinámicas

\vec{R}_A = Resistencia aerodinámica (\vec{A}_y)

\vec{S} = Sustentación aerodinámica (\vec{A}_x)

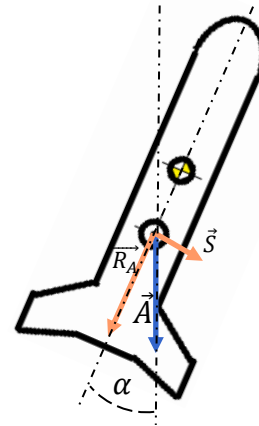


Figura 9: Descomposición de Fuerzas (CP).

Por lo tanto, en lo que se refiere al eje de ordenadas, que coincide con el eje de simetría del modelo, podemos sumar los dos vectores aplicados en el CG y el CP ($\vec{F}_{CP\parallel} + \vec{F}_{CG\parallel}$), ya que siempre mantendrán su dirección y sentido y el punto de aplicación de estos es irrelevante dado que no producirán rotación alguna.

$$|F_{\parallel}| = |F_{CG\parallel}| - |F_{CP\parallel}| = E - mg \cos \alpha - A \cos \alpha = E - \cos \alpha \cdot (mg + A) \quad [5]$$

El eje de ordenadas no es relevante para la estabilización del modelo ya que tan solo definirá la aceleración del móvil durante el despegue, pero no podrá crear un momento angular que provoque la desestabilización del móvil. La aceleración vertical se definirá entonces, aplicando la segunda ley de Newton en la Fórmula 5, resultando en la Fórmula 6.

$$a = \frac{E - \cos \alpha \cdot (mg + A)}{m} \quad [6]$$

En cuanto al eje de abscisas del modelo, donde se encuentran las fuerzas que actúan perpendicularmente a la superficie del cohete, estudiamos principalmente la acción de las que actúan en el CP y su efecto rotatorio en el CG. En este caso se desprecian la posible componente perpendicular del peso ($\vec{F}_{CG\perp}$) ya que no es un factor importante en la ecuación por actuar sobre el propio eje de rotación, y por tanto no poder variar el momento aplicado sobre el mismo. Como se indica en la Fórmula 7, se expresa $|F_{CP\perp}|$ como una magnitud negativa, dado que creará una aceleración rotatoria contraria a la propia rotación del modelo (lo que se denomina una fuerza de restauración) y siempre tenderá a estabilizar el modelo para que $\alpha = 0$

$$|F_{\perp}| \sim (-F_{CP\perp}) \sim (-A \sin \alpha) \quad [7]$$

Una vez llegado a estas conclusiones, se proceden a exponer las posibles influencias de \vec{F}_{\perp} en el CG. En la Figura 10, se observa un cohete acelerando perpendicularmente a la superficie de lanzamiento, por lo que su F_{\perp} es nula y la resistencia (R_A) es máxima.

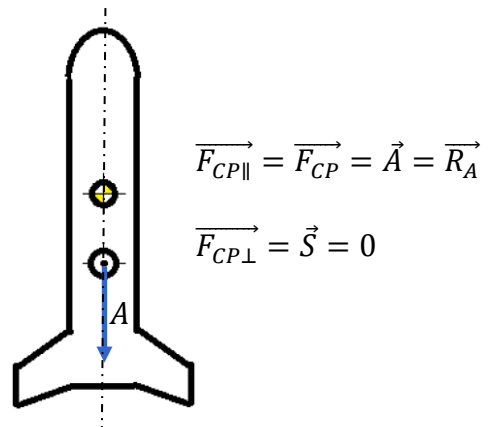


Figura 10: Modelo con ángulo de ataque nulo.

En cambio, en la Figura 11, el cohete dispone de un ángulo de ataque α que provoca una fuerza de sustentación \vec{S} actuando en el CP también expresada como $\vec{F}_{CP\perp}$. Se observa que, al encontrarse el CP tras el centro de masas o CG, la rotación provocada en torno a este punto tiende a anular el ángulo de ataque, lo que significa que la fuerza perpendicular resultante (S) provoca un movimiento armónico simple donde el punto de equilibrio se alcanza cuando $\alpha = 0$

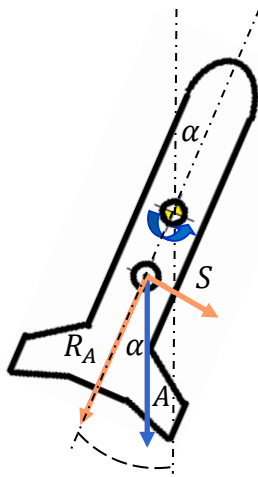


Figura 11: Diseño Estable.

Por el contrario, si el diseño del cohete fuera deficiente, situando el CP a menos distancia que el CG de la nariz superior ($x_{CP} < x_{CG}$) tendería a la inestabilidad en cualquier $\alpha \neq 0$ lo que podría provocar accidentes en el área de lanzamiento y reduciría el alcance vertical del cohete. Esto se puede ver en la Figura 12.

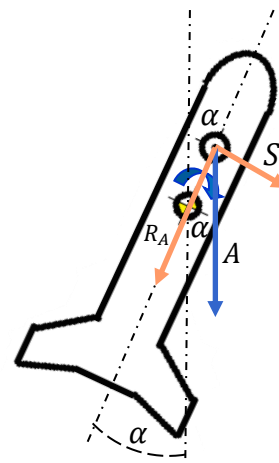


Figura 12: Diseño Inestable.

7. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL ESTUDIO TEÓRICO SOBRE ESTABILIDAD AERODINÁMICA

Tras el **estudio teórico** en términos de la estabilidad aerodinámica, resulta interesante poder calcular la posición exacta del centro de presiones y el centro de masas, para averiguar así la estabilidad de cualquier modelo diseñado. Partiendo desde esta idea, se procedió a la investigación de posibles técnicas experimentales y/o matemáticas que pudieran proporcionar la posición de ambos puntos de interés.

Para calcular la **posición del centro de Masas** (X_{CP}) existen diferentes técnicas físicas, pero, sin embargo, hay una técnica visual que ofrece bastante precisión y se puede realizar con materiales simples en el aula. En el caso de finalizar un modelo, se situaría el mismo sobre una regla perpendicular a la superficie de la mesa (o cualquier otra herramienta) Esta ha de moverse hasta encontrar el punto de equilibrio donde se mantenga suspendido el modelo. Es importante equipar el cohete con el motor de forma provisional para poder hallar la magnitud exacta a la hora del despegue. Este proceso se observa en la Figura 13.



Figura 13: Medición de la posición del centro de gravedad (x_{CG})

Tratando de calcular la **posición del Centro de Presiones**, se hallaron muchas más dificultades y ninguna metodología simple pareció aportar resultados concluyentes. Esto es principalmente debido a que las fuerzas aerodinámicas estudiadas solo están presentes cuando el móvil se encuentra en movimiento, lo que dificulta el cálculo de la posición del CP.

A pesar de estas problemáticas, se trató de crear una **hoja de cálculo** que pudiera simplificar todo el proceso matemático y físico que hay detrás. Para esta experiencia práctica se utilizó como recurso primario el estudio pionero publicado por la **NASA** en los años 60

(Barrowman, 1967) que rige la relación entre las distintas medidas de un modelo aeroespacial y su centro de presiones en el aire. Se pueden observar en las siguientes figuras (14 y 15).

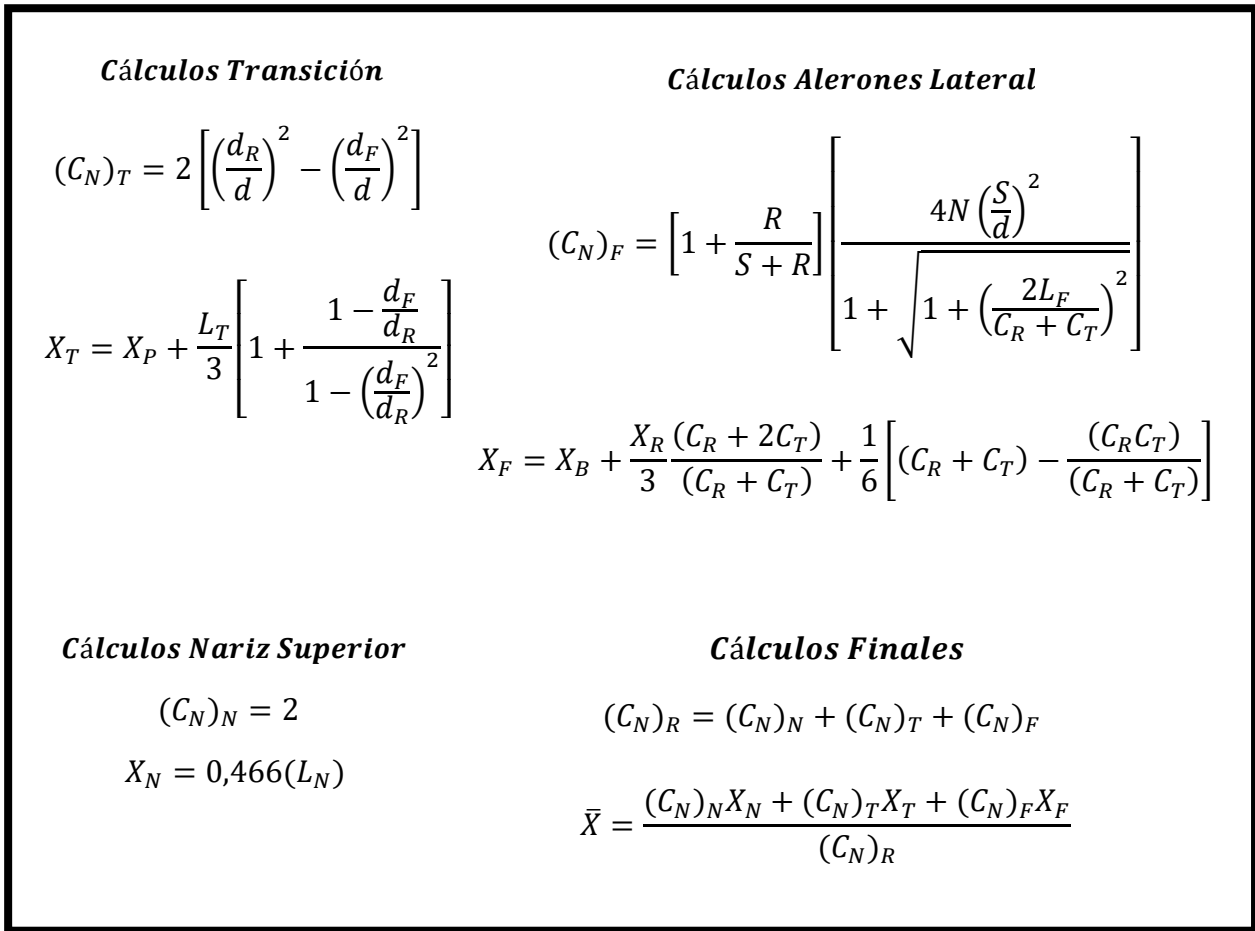


Figura 14: Ecuaciones de Barrowman.

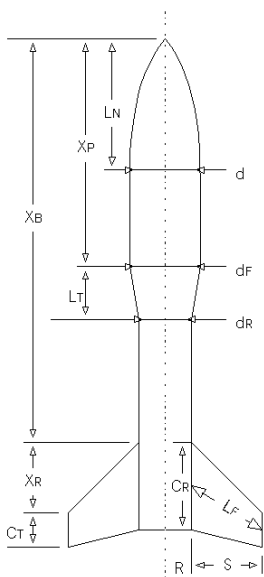


Figura 15: Esquema medidas.

De este **experimento informático** se sacaron conclusiones varias acerca de las relaciones entre las distintas medidas del cohete y su estabilidad. Una de ellas, fue la de encontrar una dinámica clara en la variación de medidas de los alerones. Aunque puedan parecer un elemento estético en muchas ocasiones, la aplicación de las ecuaciones de Barrowman establecen que su diseño es fundamental para controlar las fuerzas aerodinámicas que se aplican en el cohete. En la Figura 16 se puede observar la variación de estabilidad en relación al cambio de la altura de los alerones, (C_R en las ecuaciones) manteniendo las demás variables constantes. (Uno de los ejemplos, entre otros, de estas dinámicas expuestas)

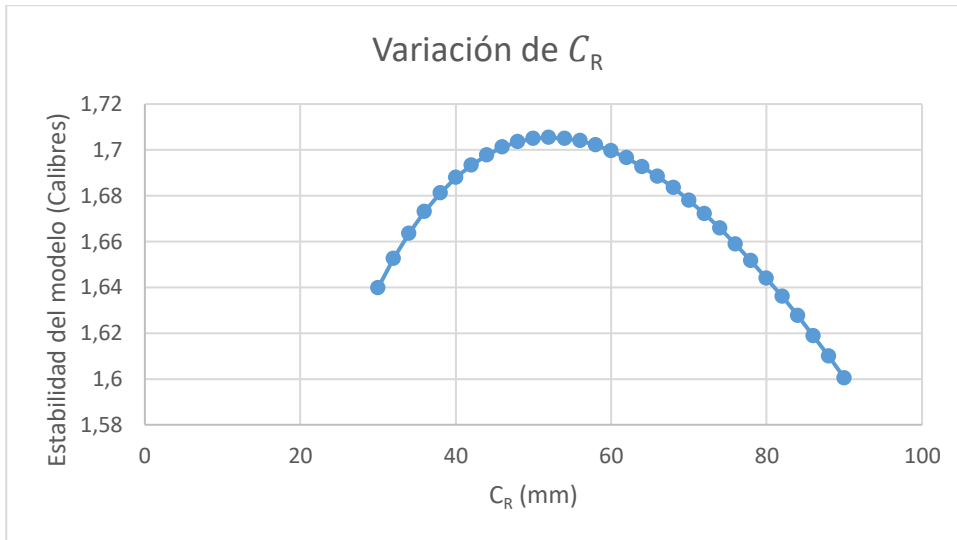


Figura 16: Relación entre C_R y la estabilidad del móvil.

Sin embargo, se encontraron otras relaciones que no disponen de una maximización en la eficiencia de la estabilidad siendo funciones lineales, con una pendiente determinada. En estos casos, la relación es directamente proporcional (Como se ve en la Figura 17), aunque hay excepciones donde incrementar la medida de un componente puede afectar negativamente a la estabilidad reduciendo su valor.

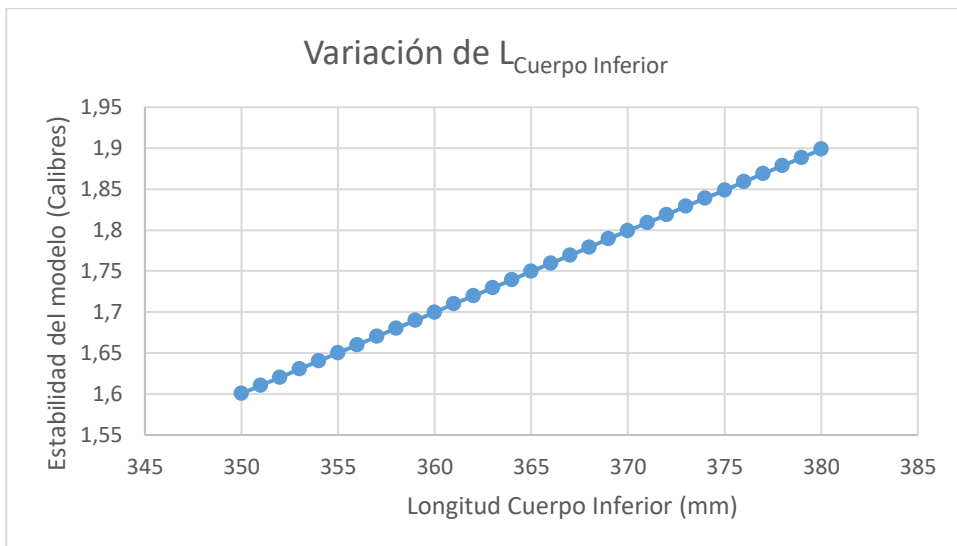


Figura 17: Relación entre L_{CI} (Longitud Cuerpo Inferior) y la estabilidad del móvil.

El archivo completo de la hoja de cálculo y la explicación de su funcionamiento se encuentran en el [Anexo 3](#) y el archivo puede ser utilizado con cualquier diseño de alerones planos.

CONCLUSIONES

1. CONCLUSIÓN PRINCIPAL

Tras un año de investigación constante, concluyo como aprendizaje final de este proyecto que **sí es posible** llevar a cabo proyectos educativos en relación con la cohería experimental en el aula. Como ha quedado reflejado durante este artículo, a pesar de no disponer de conocimientos previos en el área y siendo un grupo de estudiantes de secundaria, los resultados obtenidos han sido **sustancialmente positivos** y han mejorado mis conocimientos en varios aspectos, tanto físicos como tecnológicos, cumpliendo así la función didáctica de esta iniciativa.

2. SOBRE EL DESARROLLO DE UN COHETE EXPERIMENTAL

En general, los contenidos teóricos abarcados en este proyecto, principalmente en términos de la **estabilidad aerodinámica** de un móvil, no llegan a alcanzar un nivel excesivamente complejo (a pesar de poder ampliarse, claro está, introduciendo conceptos más avanzados) por lo que pueden ser comprendidos por la mayoría de estudiantes de Bachillerato e incluso en cursos superiores de la ESO.

Concluyo en este marco físico las siguientes afirmaciones:

1: El estudio de la estabilidad de un móvil es **necesario** para cualquier lanzamiento, y deberían por tanto implementarse herramientas que faciliten el cálculo de esta magnitud y que puedan ser utilizadas por la comunidad científico-educativa, tales como la diseñada en esta investigación.

2: En términos de los cambios que pueda sufrir el valor de la estabilidad, se ha observado que los **alerones** destacan por ser la parte del cohete que permite una **mayor variación** en la estabilidad del móvil. Son, por tanto, **necesarios** a pesar de poder parecer simples adornos estéticos.

En cuanto a los recursos tecnológicos, se ha mencionado que los programas utilizados durante el desarrollo del proyecto son completamente gratuitos, y, además, creo haber cumplido uno de los objetivos de esta investigación al proporcionar en los anexos pertinentes una guía acerca del diseño en 3 dimensiones de un cohete básico en formato vídeo. Esto acaba por facilitar una de las tareas más importantes como es la de alcanzar unos conocimientos base en términos de la ingeniería detrás de la investigación.

Concluyo también que, a pesar de ser este un proyecto tecnológico en cierta medida, el proceso de construcción del producto que lo enmarca no es complejo en su mayoría, y como se ha mencionado durante el cuerpo del trabajo, no se requiere ninguna herramienta eléctrica que pueda ser peligrosa para los participantes. El proceso de construcción se destaca por tanto como un procedimiento simple habiendo comprendido los pasos a seguir, que quedan remarcados en el desarrollo de la investigación.

A mi parecer, también concluyo este trabajo habiendo aprendido una lección en términos del **principio de ensayo-error**, una técnica recurrente a lo largo de la historia de la ciencia y la tecnología. A través de la experiencia y los distintos lanzamientos, se han conseguido plasmar en este trabajo distintos hallazgos en cuanto a la mejora en la eficiencia de los diseños mostrados, algo que resulta gratificante después del tiempo empleado en los mismos.

3. SOBRE LA COHETERÍA EXPERIMENTAL COMO RECURSO EDUCATIVO

Es cierto que como se ha demostrado según numerosos estudios mencionados en el marco teórico de este proyecto, cualquier actividad experimental necesita un **compromiso** tanto de profesores como de alumnos. A su vez, se ha de contar con unos recursos que a veces pueden ser difíciles de obtener, pero que dependen fundamentalmente del presupuesto del que se disponga.

Concluyo en este marco social las siguientes afirmaciones:

1: Todos los procesos mencionados en este proyecto han sido realizados con un presupuesto menor de **200 euros**, lo que lo sitúa como relativamente **económico** al englobar el aprendizaje de un grupo de alumnos.

2: Los estudiantes de secundaria tienden a mostrar interés por aquellos temas relacionados con la **cohetería**. Esto convierte la actividad en cuestión en un aliciente positivo que potencia la motivación de los mismos a la hora de comprender la física y la tecnología, algo que yo mismo he podido comprobar durante el último año.

4. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Queda abierta este proyecto a las ampliaciones que cualquiera desee realizar, y por tanto destaco distintas **líneas de investigación** que podrían ser complementadas con lo expuesto previamente.

1: Un aspecto que se intentó desarrollar en la parte tecnológica de esta investigación es la de tratar de **simular el comportamiento aerodinámico** del diseño en lo que se refiere a la presión que se genera a su alrededor. Para esto se trató de utilizar el programa informático **Autodesk CFD**, de la misma compañía que Autodesk Inventor, el utilizado para el propio diseño. No se llegó a indagar más en estos términos debido a la falta de tiempo y al incremento en la complejidad del tema.

2: Queda, por supuesto, abierto el tema a cualquier cambio en el panorama de estudio, sobre todo en lo que se refiere al cambio de normativas, creación de nuevas iniciativas y/o de organizaciones relacionadas con la cohetería amateur...

Además de poderse profundizar en el área de estudio, también se remarca que todas las herramientas incluidas en el trabajo son **libres de ser utilizadas** por particulares, profesores o cualquiera que lo desee, siempre que se cumpla con la licencia marcada al comienzo de la investigación. Con esto hago referencia a la **hoja de cálculo** sobre la estabilidad, los **vídeos** explicativos acerca del diseño del cohete y los **planos** del mismo.

5. CONCLUSIÓN PERSONAL

Concluyo finalmente que este proyecto de investigación ha sido una iniciativa positiva a mi parecer, que me ha permitido comprender más acerca de un tema tan versátil e interesante como es la cohetería y sus aplicaciones en contextos elementales.

Además, he podido comprobar mi interés por el mundo de la ingeniería, algo de lo que había dudado en ocasiones previas, y he contado con la oportunidad de aprender a utilizar distintos recursos tecnológicos que pasan por el desarrollo de un producto, la impresión en 3d y la optimización de un diseño, entre otros.

Ha sido por tanto una **experiencia positiva** en su conjunto, que a pesar de haber requerido mucho tiempo y dedicación, ha merecido la pena y no descarto repetir en un futuro, quizá ampliando este mismo tema de estudio o indagando en otro distinto.

BIBLIOGRAFÍA

- (ESERO), E. S. (2021). *esero.es*. Obtenido de <https://esero.es/>
- Apogee Components. (2021). *apogeerockets.com*. Obtenido de https://www.apogeerockets.com/Building_Supplies/Nose_Cones/Low_Mid_Power_Nose_Cones/56mm_Foam_Nose_Cone?cPath=306_
- Autodesk. (2020). *Autodesk.com*. Obtenido de <https://www.autodesk.com/education/edu-software/overview?sorting=featured&page=1>
- Barrowman, J. S. (1967). *The Practical Calculation of the Aerodynamic Characteristics of Slender Finned Vehicles*. Washington, D.C.
- Boggs, J. E. (1958). Amateur Rocketry. *Journal of Chemical Education*, 376 - 380.
- Burgess, E. (1937). *Bulletin of the Manchester Interplanetary Society*. Manchester.
- Cañal, P., Travé, G., & Pozuelos, F. J. (2011). *Análisis de los obstáculos y dificultades de profesores y estudiantes en la utilización de enfoques de investigación escolar*. Huelva, Sevilla.
- Cavero, M. Á. (2006). *Motivación y rendimiento académico en alumnos de Educación Secundaria Obligatoria y bachillerato LOGSE*. Madrid.
- Comisión Unión Europea. (2019). *REGLAMENTO DE EJECUCIÓN (UE) 2019/947 DE LA COMISIÓN*. Bruselas.
- esa.int. (2021). *ESA Funding*. Paris.
- Gobierno De España. (2017). *Real Decreto 1036/2017*.
- Heinz v. Diringshofen, R. E. (1952). *Raumfahrtforschung*. Berlín, Boston.
- José Rojas, X. P.-B. (2008). *Model Rocket Workshop: A Project-Based Learning Experience for Engineering Students*. Barcelona, España: International Journal of Emerging Technology in Learning.
- Knight, R. D. (1995). *The vector knowledge of beginning physics students*. San Luis Obispo, California, USA.
- Lehman, M. (1963). *This High Man: The Life of Robert H. Goddard*. Nueva York: Farrar, Straus.
- Más, L. J. (2014). *Enseñanza de las ciencias a través de la experimentación*. Soria.
- Peckham, S. (2014). Student Rocket Competition. *Tech Directions*, 6.
- Pozuelos, F. (2007). *Trabajo por proyectos en el aula: Descripción, Investigación y experiencias*. Sevilla: Grafidós S.L.
- Research, C. (2021). *cosmicresearch.org*. Obtenido de <https://cosmicresearch.org/>
- Revelli, V. (2016). Largest Rocketry Competition Launches Student Careers in STEM. *Tech Directions*, 10.
- Rockwell, T. S. (2012). *Space Propaganda "For All Mankind": Soviet and American Responses to the Cold War, 1957-1977*. Edmont, Alberta.

Tegtmeyer, A. (05 de 09 de 2017). <https://www.youtube.com/watch?v=KNt4QL1uScw&t=631s>.
Rocket Stability. Naperville, Illinois, USA.

Tegtmeyer, A. (26 de 07 de 2018). <https://youtu.be/lvMjSTvD4Ow>. *Aerodynamic Forces on a Rocket*.
Naperville, Illinois, USA.

TRIPOLI ROCKETRY ASSOCIATION. (02 de 05 de 2012). *Tripoli.org*. Obtenido de
<http://www.tripoli.org/History>

USA Government. (2021). *Science Appropriations Act*. Washington DC.

VTR. (2008). *Estudio Índice Generación Digital*. Chile.

