

Desarrollo de cohetes híbridos tipo sonda para potenciar la industria aeroespacial en Colombia

| Fecha de recibido: 02 de julio de 2024 | Fecha de aprobado: 14 de agosto de 2024 |

| Reception date: July 2, 2024 | Approval date: August 14, 2024 |

| Data de recebimento: 02 de julho de 2024 | Data de aprovação: 14 de agosto de 2024 |

Santiago Prada Conde

<https://orcid.org/0009-0000-0671-6964>
s.prada1@uniandes.edu.co

Mag. en Ingeniería Mecánica
Investigador - Universidad de Los Andes, Colombia
Rol del investigador: experimental y escritura
Grupo de Conversión de energía del Departamento de Ingeniería Mecánica

Master in Mechanical Engineering
Teacher and researcher - Universidad de Los Andes, Colombia
Researcher's role: experimental and writing
Energy Conversion Group of the Department of Mechanical Engineering

Mestrado em Engenharia Mecânica
Docente e investigador - Universidad de Los Andes, Colombia
Papel do investigador: experimental e escrito
Grupo de Conversão de Energia do Departamento de Engenharia Mecânica

Fabio Arturo Rojas Mora

<https://orcid.org/0000-0001-5351-3369>
farojas@uniandes.edu.co

Ph. D. en Ingeniería Mecánica
Investigador - Universidad de Los Andes, Colombia
Rol del investigador: experimental y escritura
Grupo de Conversión de energía del Departamento de Ingeniería Mecánica

Ph. D. in Mechanical Engineering
Teacher and researcher - Universidad de Los Andes, Colombia
Researcher's role: experimental and writing
Energy Conversion Group of the Department of Mechanical Engineering

Doutor em Engenharia Mecânica
Docente e investigador - Universidad de Los Andes, Colombia
Papel do investigador: experimental e escrita
Grupo de Conversão de Energia do Departamento de Engenharia Mecânica

Cómo citar este artículo: Prada Conde, S. y Rojas Mora, F. A. (2025). Desarrollo de cohetes híbridos tipo sonda para potenciar la industria aeroespacial en Colombia. *Ciencia y Poder Aéreo*, 20(1), 15-32. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.833>



Desarrollo de cohetes híbridos tipo sonda para potenciar la industria aeroespacial en Colombia

Resumen: Los cohetes sonda, utilizados en investigaciones espaciales, transportan cargas a altitudes elevadas y permiten estudios variados en breves tiempos espaciales. Son herramientas rentables por su naturaleza no orbital y la ausencia de propulsores costosos, lo cual los hace ideales en estudios de áreas inaccesibles para satélites. Recientemente, los cohetes híbridos tipo sonda fusionan características de motores de combustibles sólido y líquido, y han emergido como soluciones innovadoras, ofreciendo ventajas en rendimiento, seguridad y control. Estos cohetes usan propulsores que contienen elementos en fases sólidas y líquidas o gaseosas. A pesar de desafíos técnicos como la eficiencia de combustión reducida, han ganado relevancia en aplicaciones académicas y recreativas.

La metodología de este estudio combina enfoques cuantitativos y cualitativos para entender la tecnología tipo sonda global, identificar características de cohetes híbridos y explorar oportunidades para su implementación en Colombia. Por su parte, La propulsión híbrida se alinea con las oportunidades y los desafíos del entorno aeroespacial colombiano, ofreciendo una alternativa técnica y estratégica. Los resultados finales, como la construcción del cohete AINKAA H1, validan la viabilidad de desarrollar cohetes híbridos en Colombia. Finalmente, es esencial que Colombia fortalezca su infraestructura y sus colaboraciones para aprovechar oportunidades y consolidarse en el mercado espacial global.

Palabras clave: cohetes sonda; industria aeroespacial; propulsión híbrida.

Development of hybrid probe rockets to boost the aerospace industry in Colombia

Abstract: Sounding rockets, used in space research, carry payloads to high altitudes and allow varied studies in short space times. They are cost-effective tools due to their non-orbital nature and the absence of expensive propellants, which makes them ideal for studies in areas inaccessible to satellites. Recently, hybrid sounding rockets fuse characteristics of solid and liquid fuel engines and have emerged as innovative solutions, offering advantages in performance, safety and control. These rockets use propellants containing elements in solid and liquid or gas phases. Despite technical challenges such as reduced combustion efficiency, they have gained relevance in academic and recreational applications.

The methodology of this study combines quantitative and qualitative approaches to understand the global probe technology, identify characteristics of hybrid rockets and explore opportunities for their implementation in Colombia. Hybrid propulsion is aligned with the opportunities and challenges of the Colombian aerospace environment, offering a technical and strategic alternative. The final results, such as the construction of the AINKAA H1 rocket, validate the feasibility of developing hybrid rockets in Colombia. Finally, it is essential for Colombia to strengthen its infrastructure and collaborations to take advantage of opportunities and consolidate its position in the global space market.

Keywords: Sounding rockets; aerospace industry; hybrid propulsion.

Desenvolvimento de foguetes de sonda híbridos para impulsionar o setor aeroespacial na Colômbia

Resumo: Os foguetes de sondagem, usados em pesquisas espaciais, transportam cargas úteis a grandes altitudes e permitem estudos variados em curtos espaços de tempo. Eles são ferramentas econômicas devido à sua natureza não orbital e à ausência de propulsores caros, o que os torna ideais para estudos de áreas inacessíveis aos satélites. Recentemente, os foguetes de sondagem híbridos combinam características de motores de combustível sólido e líquido e surgiram como soluções inovadoras, oferecendo vantagens em termos de desempenho, segurança e controle. Esses foguetes usam propulsores que contêm elementos nas fases sólida e líquida ou gasosa. Apesar dos desafios técnicos, como a redução da eficiência da combustão, eles ganharam relevância em aplicações acadêmicas e recreativas.

A metodologia deste estudo combina abordagens quantitativas e qualitativas para entender a tecnologia global da sonda, identificar as características dos foguetes híbridos e explorar as oportunidades de sua implementação na Colômbia. A propulsão híbrida se alinha com as oportunidades e os desafios do ambiente aeroespacial colombiano, oferecendo uma alternativa técnica e estratégica. Os resultados finais, como a construção do foguete AINKAA H1, validam a viabilidade do desenvolvimento de foguetes híbridos na Colômbia. Por fim, é essencial que a Colômbia fortaleça sua infraestrutura e colaborações para aproveitar as oportunidades e consolidar sua posição no mercado espacial global.

Palavras-chave: Foguetes de sondagem; setor aeroespacial; propulsão híbrida.

Introducción

La industria aeroespacial es un sector en rápida evolución que juega un papel crucial en el desarrollo económico y tecnológico de los países. En Colombia, aunque se han logrado avances importantes, como el lanzamiento de satélites (Fuerza Aérea Colombiana [FAC], s. f.) y la colaboración con agencias internacionales (FAC, 22 de junio 2023), persisten desafíos significativos, en particular en el ámbito de la propulsión de cohetes (Robayo-Salazar *et al.*, 2020). Como detalla Morante-Granobles (2021) en la revisión de los clústeres aeroespaciales en Colombia, el país enfrenta desafíos significativos en términos de desarrollo tecnológico e infraestructura, lo cual limita su competitividad en el escenario aeroespacial global. Por su parte, se hace evidente que la falta de desarrollo en tecnologías de propulsión que puedan competir a nivel internacional limita la capacidad del país para avanzar en la carrera espacial.

Este estudio se enfoca en los cohetes híbridos tipo sonda, una tecnología emergente que combina las características de los motores de propulsión sólida y líquida (Sutton y Biblarz, 2016). La propulsión híbrida no solo representa una opción técnicamente viable, sino también una solución económicamente accesible para el desarrollo de sistemas de tipo cohete en Colombia (Urrego-Peña, 2019). Además, dada la ubicación estratégica del país cerca de la línea del ecuador, la implementación de este tipo de tecnología podría optimizar las operaciones espaciales y reducir los costos de lanzamientos significativamente (Poveda-Zamora, 2020). A su vez, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) ha identificado un “triple desarrollo” como fundamental para el avance espacial del país, destacando el potencial del sector espacial para impulsar el desarrollo sostenible, fomentar el crecimiento económico y social, y fortalecer las capacidades tecnológicas e industriales de Colombia (Barrero-Barrero, 2021).

El objetivo de este artículo es analizar el potencial de los cohetes híbridos tipo sonda para catalizar el desarrollo aeroespacial en Colombia. Se evaluará su viabilidad técnica y tecnológica, y se propondrá

un marco de implementación adaptado a las condiciones del país. La investigación incluye una revisión sistemática utilizando palabras clave de la bibliografía, estudios de casos internacionales y una evaluación detallada del primer prototipo funcional desarrollado en Colombia: el AINKAA H1 (Prada-Conde, 2023).

La industria aeroespacial colombiana, si bien en crecimiento, enfrenta limitaciones en cuanto a infraestructura y desarrollo tecnológico. Este artículo busca contribuir al fortalecimiento de este sector, proporcionando una alternativa innovadora que podría posicionar a Colombia como un actor relevante en la industria aeroespacial global.

Cohetes sonda

Los cohetes sonda son vehículos espaciales diseñados específicamente para la investigación, capaces de transportar cargas útiles a altitudes elevadas en la atmósfera. Estos cohetes, que actúan como laboratorios móviles, han sido fundamentales para realizar estudios en diversas condiciones, desde microgravedad hasta investigaciones astrofísicas (Seibert, 2006). Aunque su tiempo en el espacio es limitado, generalmente entre cinco y veinte minutos, y su velocidad es moderada, son herramientas ideales para ciertos experimentos científicos (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2023). Además, en regiones del espacio inaccesibles para los satélites, estos cohetes ofrecen soluciones valiosas para realizar mediciones. Su carácter no orbital y la ausencia de necesidad de propulsores costosos los convierten en opciones económicas viables frente a misiones orbitales (NASA, s. f.).

Propulsión híbrida

Un cohete de propulsión híbrida se caracteriza por tener un motor cuyo propelente se compone de dos elementos en distintas fases: uno sólido y otro que puede ser líquido o gaseoso (Sutton y Biblarz, 2016). Estos motores presentan varias ventajas en comparación con los motores de propulsión sólida o líquida, como una mayor seguridad, control de empuje, robustez, versatilidad, y una naturaleza más económica.

No obstante, también enfrentan desafíos, tales como una eficiencia de combustión reducida, tiempos de respuesta más lentos y variaciones en la relación oxidante/combustible (Sutton y Biblarz, 2016). A pesar de estos retos, los cohetes híbridos han encontrado su lugar como cohetes sonda en diversas aplicaciones, tanto en el ámbito académico como entre aficionados, lo cual ha llevado a una continua inversión en investigación para superar sus limitaciones y mejorar su eficiencia (Chiaverini y Kuo, 2007).

Metodología

El estudio implementa un enfoque mixto, combinando una revisión cualitativa y cuantitativa de programas internacionales reconocidos, junto con el desarrollo experimental de un cohete de propulsión híbrida. Esta metodología se describe a través de cuatro etapas esenciales.

Etapa 1: Revisión sistemática

Se llevó a cabo una revisión sistemática utilizando palabras clave relevantes para identificar y analizar los principales programas de cohetes sonda a nivel mundial. Las bases de datos consultadas incluyeron, entre otras, agencias espaciales como la NASA (National Aeronautics and Space Administration), la ESA (European Space Agency), la JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) y la ISRO (Indian Space Research Organization), donde se buscaron artículos, informes técnicos y publicaciones que abordaran el desarrollo y las aplicaciones de cohetes sonda. Estos programas fueron seleccionados en función de su relevancia para la aplicabilidad en contextos similares al colombiano.

Etapa 2: Análisis de cohetes híbridos operativos

Esta fase consistió en la recopilación y el análisis de datos técnicos sobre cohetes híbridos funcionales ya probados, enfocados en características clave como la

carga útil, el apogeo, su empuje nominal y la seguridad operativa. Se utilizaron datos reportados por organizaciones reconocidas, tales como HyImpulse, Nammo y HyEnD-Universidad de Stuttgart, y se contrastaron con las innovaciones tecnológicas en propulsión híbrida para evaluar su aplicabilidad en cohetes tipo sonda.

Etapa 3: Análisis contextual para la implementación en Colombia

Se llevó a cabo un análisis contextual detallado para estudiar las oportunidades y los desafíos de implementar tecnologías de cohetes híbridos tipo sonda en Colombia. Este análisis considera aspectos como las ventajas geográficas de Colombia para lanzamientos espaciales, la disponibilidad de materiales, y la infraestructura existente, así como las políticas gubernamentales y normativas que podrían influir en el desarrollo de estos cohetes en el país.

Etapa 4: Validación experimental

Con el fin de validar la viabilidad del desarrollo de cohetes híbridos en Colombia, se diseñó y desarrolló el prototipo AINKAA H1, el primer cohete híbrido del país. El motor de este prototipo, el Zeus 1 (Prada-Conde, 2023), fue sometido a pruebas en banco estático para evaluar su rendimiento bajo condiciones controladas. Para validar las especificaciones teóricas del cohete, se realizaron tres pruebas de encendido del motor, las cuales fueron monitoreadas para registrar parámetros clave como el empuje generado, el tiempo de quemado y la estabilidad del motor. Los resultados se compararon con las simulaciones teóricas realizadas como parte del proceso de diseño de este prototipo.

Resultados

Etapa 1: Industria de cohetes sonda alrededor del mundo

Mientras que Estados Unidos fue pionero y mantiene un programa activo de cohetes sonda para el estudio

de la atmósfera superior, otros países no se han quedado atrás. Japón, India, Noruega, Suecia y Brasil cuentan, actualmente, con programas robustos y disponen de instalaciones de lanzamiento en funcionamiento. Así mismo, Países como Alemania, Francia, Italia, España, Dinamarca, Australia, Canadá y Pakistán han llevado a cabo lanzamientos de este tipo. Además de las instalaciones de lanzamiento fijas, también se han utilizado varios sitios remotos en campañas para lanzamientos con fines especiales. Estos han incluido Perú, Groenlandia, Puerto Rico y el norte de África (Larsen, 2003). Algunos de los programas de cohetes tipo sonda más destacados son:

- **NASA (Estados Unidos):**

Durante más de cuatro décadas, el programa Sounding Rocket ha aportado significativamente al programa espacial nacional con valiosas contribuciones científicas, técnicas y educativas (NASA, 2023). Este se destaca como uno de los programas de vuelo más robustos, versátiles y costo-efectivos de la NASA. Actualmente, cuenta con dieciséis vehículos cohetes sonda distintos, los cuales abarcan desde el cohete Orion de aproximadamente 5,6 metros de altura, el cual logra un apogeo de alrededor de 85 km, hasta el cohete de cuatro etapas Black Brant XII, que supera los 20 metros de altura, y es capaz de levantar desde 450 kg a una altitud de 500 km hasta 110 kg a cerca de 1400 km de apogeo. Cada vehículo, con sus características únicas, refleja la versatilidad y evolución de la tecnología, adaptándose a las distintas necesidades y objetivos de las misiones de este programa.

Como lo muestra la Figura 1, este programa cuenta con campos de lanzamiento alrededor del mundo, y se destacan lugares como Alaska, Nuevo México, Virginia, Noruega, Suecia y Australia, junto con sitios temporales en Groenlandia, las Islas Marshall, Puerto Rico y Brasil. Estas plataformas brindan un amplio acceso a fenómenos de interés para la comunidad científica. Las áreas de investigación más comunes en donde se emplean estos cohetes sondas van desde la física de plasma, la astrofísica y física solar, hasta la biología (NASA, 2021). Según la descripción dada, el programa proporciona todo el personal y el equipo necesarios

para llevar a cabo misiones exitosas en cualquier parte del mundo, adaptándose a los requerimientos para cada tipo de carga útil.



Sitios de lanzamiento pasados y presentes en todo el mundo utilizados por el Programa de Cohetes Sonda para realizar investigaciones científicas:

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. Kwajalein Atoll, Islas Marshall | 8. Wallops Istanas, VA |
| 2. Barking Sands, HI | 9. Fort Churchill, Canadá |
| 3. Poker Flat, AK | 10. Groenlandia (Thule y Sondre Stromfjord) |
| 4. White Sands, NM | 11. Andaya, Noruega |
| 5. Punta de Lobos, Perú | 12. Esrange, Suecia |
| 6. Alcantara, Brasil | 13. Svalbard, Noruega |
| 7. Camp Tortuguero, Puerto Rico | 14. Australia (Equatorial Launch Australia (ELA) y Woomera) |

Figura 1. Lugares de lanzamiento del programa “Sounding Rocket”

Fuente: adaptado al castellano de NASA (2021).

- **ISRO (India):**

En 1963, con la creación de la Estación de Lanzamiento de Cohetes Ecuatoriales de Thumba (TERLS), cerca del ecuador magnético en Thumba, la aeronomía y las ciencias atmosféricas en India experimentaron un avance significativo. El lanzamiento del primer cohete sonda desde TERLS en 1963 marcó el inicio del Programa Espacial Indio (ISRO, 2023). Estos cohetes, inicialmente importados de Rusia y Francia, permitieron estudios de la atmósfera y el desarrollo de sistemas aeroespaciales propios.

A partir de 1965, la ISRO comenzó a lanzar cohetes sonda fabricados en India, con lo que logró desarrollar gradualmente su industria aeroespacial local (ISRO, 2023). El RH-75 fue el primer cohete sonda completamente indio, seguido por los modelos RH-100 y RH-125. Este programa sentó las bases de la tecnología de vehículos de lanzamiento de la India, proporcionando una experiencia crucial para el desarrollo de vehículos espaciales y motores sólidos. Desde entonces,

la familia de cohetes Rohini (RH) han facilitado numerosas misiones científicas nacionales e internacionales (ISRO, 2023).

Actualmente, los cohetes de sondeo operativos incluyen tres versiones: RH-200, RH-300-Mk-II y RH-560-Mk-III. Estos cubren un rango de carga útil de 8 a 100 kg y un alcance de apogeo de 80 a 475 km. Sus características principales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1.
Cohetes sonda indios operativos

Vehículo	RH-200	RH-300-Mk-II	RH-560-Mk-II
Etapas	2	1	2
Longitud (m)	3,6	4,9	7,7
Peso (kg)	108	510	1350
Carga útil (kg)	10	60	100
Apogeo (km)	80	160	470
Objetivo	Meteorología	Atmósfera media	Atmósfera superior

Fuente: ISRO (2023).

En la Tabla 1, se presentan los cohetes operativos de la ISRO, los cuales pueden ser de una o dos etapas, además de presentar diversas capacidades de carga útil y apogeo según su objetivo de investigación. Hasta el momento, se han lanzado más de 1545 cohetes RH-200, demostrando el alto nivel de calidad y confiabilidad de este cohete (ISRO, 2023).

Finalmente, gracias a los avances significativos en la ingeniería aeroespacial impulsados por el programa de cohetes sonda, el 23 de agosto de 2023 la India marcó un hito histórico al convertirse en el cuarto país en posicionarse sobre la Luna, además de ser pionero en la exploración de un área cercana al polo sur lunar (Parra, 2023).

- **Programas europeos:**

La base de lanzamientos de Andøya Space es pionera en servicios de lanzamiento suborbital desde los años sesenta, con un récord de más de mil cohetes sonda destinados a la investigación de la atmósfera ártica, alcanzando altitudes de hasta 1600 km (Andøya Space, 2023). Estratégicamente ubicada, esta instalación ha sido el escenario de experimentos de microgravedad de la ESA, proporcionando cerca de seis minutos de experimentación en ingravidez, con cohetes que

regresan al Atlántico Norte en tan solo quince minutos. Con dos centros de lanzamiento, en Andøya y Ny-Ålesund (Svalbard, Noruega), Andøya Space (2023) ofrece versatilidad en trayectorias de cohetes y acceso a todas las capas atmosféricas.

Por otro lado, la ESA ha empleado cohetes sonda durante más de treinta años en Esrange, ubicado en el norte de Suecia, para investigar fenómenos de microgravedad con diversas aplicaciones (Swedish Space Corporation [ssc], 2023). Esrange, bajo la propiedad y operación de la ssc desde 1966, sirve actualmente como punto de lanzamiento para la comunidad científica internacional en investigaciones atmosféricas y de microgravedad.

En Europa, existen tres diferentes líneas de cohetes sonda ofrecidas a cualquier cliente que pague por investigaciones en microgravedad. Normalmente, estas misiones son utilizadas por la ESA y la Agencia Espacial Alemana (DLR), pero en el pasado también fueron empleadas por usuarios japoneses como la JAXA (ESA, 2014). Los tres modelos que emplea la ESA son Texus, Maser y Maxus, y sus principales características se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2.
Características de los cohetes sonda utilizados por ESA

Vehículo	Texus	Maser	Maxus
Etapas	2	2	1
Longitud (m)	13	13	16,2
Peso (kg)	6150	6150	12300
Carga útil (kg)	400	400	800
Empuje etapa 1 (kN)	102	102	430
Empuje etapa 2 (kN)	240	240	-
Apogeo (km)	260	260	705

Fuente: ESA (2014).

- **JAXA (Japón):**

En 2003, la JAXA se estableció al fusionar el Instituto de Ciencias Espaciales y Astronáuticas (ISAS), la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial del Japón (NASDA) y el Laboratorio Aeroespacial Nacional del Japón (NAL). El ISAS, ahora una de las cuatro secciones clave de la JAXA, se dedica a promover la ciencia espacial en Japón en colaboración con universidades y contribuye al avance espacial del país (JAXA, 2020).

Los cohetes sonda del ISAS han sido fundamentales en campos como la astrofísica y la física del plasma espacial. El ISAS desarrolla innovadores sistemas aeroespaciales y utiliza tres cohetes sonda principales: S-310, S-520 y SS-520, lanzados principalmente desde el Centro Espacial Uchinoura en Kimotsuki, Japón. Además, el modelo S-310 ha apoyado observaciones en la Antártida y Noruega, y el modelo SS-520 ha sido lanzado en Noruega para estudios de la magnetosfera (JAXA, 2020).

Los cohetes japoneses son utilizados para observaciones científicas y experimentos a altitudes máximas de 190 km y 1000 km. Mientras que los cohetes S-310 y S-520 se destinan principalmente a observaciones atmosféricas en altitudes elevadas y a experimentos de recuperación, el cohete SS-520 se especializa en observaciones de la magnetosfera sobre Spitsbergen, Noruega (IH Aerospace, 2018). En la Tabla 3 se muestran las características principales de estos motores:

Tabla 3.
Características de los cohetes sonda utilizados por la JAXA

Vehículo	S-310	S-520	SS-520
Longitud (m)	7,1	8	9,6
Diámetro (m)	0,31	0,52	0,52
Peso total (kg)	700	2100	2600
Carga útil (kg)	50	95/150	140
Apogeo (km)	150	300	800

Fuente: JAXA (2020).

- **INPE (Brasil):**

Desde 1965, Brasil ha llevado a cabo campañas de lanzamiento de cohetes sonda, iniciadas con la puesta en marcha del Centro de Lanzamiento Barreira do Inferno (CLBI). El Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) ha sido el principal proveedor de estos vehículos en el país. Además, el IAE ha suministrado vehículos para programas internacionales, incluyendo los programas de microgravedad Texus y Maser de la ESA, con lanzamientos realizados en territorio europeo (Da Motta-Silva y Perondi, 2020).

Por su parte, dentro de este programa brasileño, Sonda se refiere a una serie de cohetes sonda propulsados por combustible sólido y producidos por el

Instituto Nacional de Investigación Espacial del Brasil (INPE). Esta serie de cohetes, iniciada en la década de 1960, fue utilizada para investigaciones atmosféricas (Robledo-Ascencio, 2012). Posteriormente, esta familia de cohetes dio paso a la familia vs, que, hasta 2020, ha registrado más de cincuenta lanzamientos exitosos desde Brasil, Suecia, Noruega y Australia.

Tabla 4.
Características de los primeros cohetes brasileiros del programa Sonda

Vehículo	Sonda 15	Sonda 26	Sonda 37	Sonda 48
Masa total (kg)	100	400	1500	7200
Altura (m)	4,5	5,6	8	11
Diámetro (m)	0,11	0,3	0,3	1,01
Etapas	2	1	2	2
Empuje (kN)	27	36	102	203
Apogeo (km)	65	180	600	800
Lanzamientos	226	15	31	4

Fuente: Robledo-Ascencio (2012).

En la Tabla 4, se presentan las características técnicas principales de los motores Sonda brasileiros, los cuales funcionaron desde 1965 hasta 1989, sumando un total de 276 lanzamientos, lo que impulsó significativamente el desarrollo industrial del país (Robledo-Ascencio, 2012).

A su vez, en la Tabla 5 se presentan los parámetros más relevantes de los motores de la familia de cohetes sonda brasileiros de la familia vs, los cuales son la base del programa espacial de Brasil (Robledo-Ascencio, 2012).

Tabla 5.
Características principales de los cohetes sonda brasileiros de la familia vs

Vehículo	VS-30	VS-40	VS-50
Longitud (m)	7,43	9,5	12
Diámetro (m)	0,56	1,01	1,46
Peso total (kg)	1460	6800	15000
Carga útil (kg)	260	500	500
Apogeo (km)	160	950	En desarrollo
Empuje en despegue (kN)	102	207	550

Fuente: Robledo-Ascencio (2012).

Etapa 2: Cohetes híbridos tipo sonda

Actualmente, la mayoría de los cohetes de tipo sonda utilizan motores de combustible sólido, ya que su diseño e implementación es más simple en términos técnicos. Sin embargo, los cohetes híbridos ofrecerían una serie de ventajas que los convierten en una opción atractiva para ser implementados como cohetes sonda (Chiaverini y Kuo, 2007). Entre algunas características se tienen las siguientes:

- **Mayor controlabilidad:** Los cohetes híbridos pueden controlarse durante el vuelo mediante la regulación del flujo del combustible. Esto permite realizar maniobras más precisas, desde cambios en la trayectoria hasta la posibilidad de tener un descenso controlado.
- **Mayor seguridad:** Los cohetes híbridos son más seguros que los cohetes sólidos, ya que pueden apagarse en caso de emergencia, mientras que los motores sólidos permanecen encendidos hasta agotar por completo su combustible. Por su parte, al almacenar el oxidante y el combustible por separado, se reduce la probabilidad de autoignición o una explosión súbita (Sutton y Biblarz, 2016), situaciones que son de alto riesgo al utilizar combustibles sólidos.
- **Menor costo:** En términos económicos, la fabricación de los cohetes híbridos representa una menor inversión que los cohetes líquidos, sin embargo, estos son más caros que los cohetes sólidos.

De igual forma, para enriquecer la discusión, es necesario presentar las desventajas relevantes de los motores híbridos (Chiaverini y Kuo, 2007):

- **Mayor complejidad:** Los cohetes híbridos requieren dos sistemas de almacenamiento, uno para el combustible y otro para el oxidante, lo cual aumenta la complejidad del diseño y la fabricación del cohete.
- **Menor eficiencia:** Los cohetes híbridos son menos eficientes que los cohetes líquidos, es decir

que requieren más propelente para alcanzar la misma altitud. Esta reducción en la eficiencia proviene de factores como bajas tasas de regresión y baja densidad aparente del combustible, además de los cambios de relación de oxidante y combustible en función del consumo del grano sólido (Prada-Conde, 2023).

- **Mayor riesgo de combustión incompleta:** La combustión incompleta puede provocar la formación de gases tóxicos o inflamables, lo cual representa un riesgo para los operadores del cohete, así como un posible aumento en la contaminación del ambiente.

A lo largo de la última década, las universidades, instituciones de investigación y empresas internacionales han impulsado significativamente la tecnología de propulsión híbrida. Se han investigado nuevos combustibles, como las mezclas basadas en cera de abejas (Osorio-Tovar, 2022), para optimizar la tasa de regresión y, por tanto, motores más compactos con alta densidad de empuje (Schmierer *et al.*, 2019). Estas mejoras han posibilitado la implementación de cohetes híbridos en sistemas de propulsión para cohetes sonda y vehículos lanzadores de pequeños satélites.

Ejemplos notables incluyen el lanzamiento exitoso del Heros 3 en 2016, que empleó óxido nitroso y parafina como combustible (Kobald *et al.*, 2017), y el lanzamiento exitoso del cohete Nucleus de Nammo, que utilizó peróxido de hidrógeno y un combustible basado en HTPB (Nammo, 2018). De igual forma, el desarrollo de Hylmpulse, el primer motor de 10 kN con rendimiento estable por más de 10 segundos utilizando parafina y oxígeno líquido. Estos eventos subrayan el potencial de los cohetes híbridos como sistemas de propulsión de bajo costo y alto rendimiento.

A nivel global, instituciones como JAXA y NASA están investigando y optimizando aún más estos motores, y diversas empresas emergentes se suman al desarrollo, aunque la comercialización masiva aún está pendiente (Schmierer *et al.*, 2019). En la Tabla 6, se listan algunas de las empresas que han logrado avances significativos con este tipo de propulsión.

Tabla 6.
Empresas emergentes y establecidas activas en el campo de la propulsión

Empresa	País	Negocio	Combustible	Oxidante
Hylmpulse	Alemania / Unión Europea	SR, 500 kg LV	Basado en parafina	LOX
Nammo	Noruega	SR, <150 kg LV	HTPB	H ₂ O ₂
The Spaceship Company	Estados Unidos	Suborbital	Poliamida	N ₂ O
Space Propulsion Group	Estados Unidos	Orbital	Basado en parafina	LOX y otros
TISpace	Taiwán	SR, 300 kg LV	HTPB	N ₂ O
Gilmour Space	Australia	SR, 400 kg LV	Combustible impreso 3D	H ₂ O ₂
Rocket Crafters	Estados Unidos	LV	ABS impreso 3D	N ₂ O
T4I	Italia	Propulsión orbital	Basado en parafina	H ₂ O ₂
Space Forest	Polonia	Cohete sónico	Basado en parafina	N ₂ O
Space Link	Eslovenia	Cohete sónico	Basado en parafina	LOX
Equatorial Space Ind.	Singapur	65 kg LV	Basado en parafina	LOX

SR = Cohete sónico LV = Vehículo de lanzamiento

Fuente: adaptada al castellano a partir de Schmierer *et al.* (2019).

En la Tabla 6, se proporciona la comparación de varias empresas de propulsión espacial a nivel global. Es notable la variedad de tecnologías de combustibles estudiados incluyendo parafina y HTPB hasta innovaciones utilizando impresión 3D. Además, es necesario destacar la variedad de aplicaciones de este tipo de propulsión en cohetes sónicos y cohetes sonda hasta vehículos de lanzamiento suborbital. Este panorama demuestra una industria en crecimiento, con múltiples actores buscando innovar y posicionarse en el mercado con este tipo de tecnologías. En la tabla 7, se presenta la información técnica de los cohetes híbridos más relevantes para el presente artículo.

Tabla 7.
Características principales de cohetes híbridos tipo sonda

Vehículo	Hylmpulse	Nucleus	N2ORTH
Longitud (m)	14	9,5	7,8
Diámetro (m)	0,64	0,37	0,26
Peso total (kg)	1200	820	95
Carga útil (kg)	250	70	0
Apogeo (km)	200	100	64
Empuje nominal (kN)	75	30	15
Tiempo de quemado (s)	30	40	25

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 7, se presentan las características principales de cohetes híbridos tipo sonda con los mejores rendimientos encontrados durante la revisión técnica. El cohete Hylmpulse, fabricado por la empresa de mismo nombre, es el primero de este tipo en utilizar oxígeno líquido como oxidante. Al tener capacidad para una carga útil de 250 kg y alcanzar un apogeo de 200 km, demuestra un desempeño sobresaliente (Hylmpulse, 2021). El Nucleus, un cohete que presta servicio comercial, es capaz de desarrollar un empuje nominal de 30 kN, llevando consigo 70 kg de carga útil a 100 km de altitud.

Finalmente, el N2ORTH, desarrollado por el grupo de investigación HyEnD de la Universidad de Stuttgart (Alemania), es uno de los cohetes híbridos más potentes y avanzados hasta la fecha. El martes 18 de abril de 2023, N2ORTH alcanzó una altitud de 64 km, lo cual casi duplica el récord de altitud anterior para los híbridos construidos por estudiantes, establecido en 2016 con el cohete Heros 3, desarrollado por el mismo equipo (HyEnD, 2023).

En cuanto a la Tabla 8, se presentan las características principales de cohetes híbridos desarrollados por grupos de investigación universitarios. Los cohetes

Compass (Oechsle *et al.*, 2022) y Heros (Schmierer *et al.*, 2015), desarrollados por HyEnD, son prototipos experimentales que, a través de estudios rigurosos, lograron establecer un diseño óptimo para la construcción del N2ORTH (HyEnD, 2023). Finalmente, el cohete Phoenix-1B Mk-II, desarrollado por un grupo de investigación de la Universidad de KwaZulu-Natal, logró un apogeo de 35 km con un empuje nominal de 7,25 kN en una campaña de lanzamientos del año 2021, con lo que alcanzó el récord del cohete Heros (Aerospace Systems Research Institute [ASRI], s. f.).

Tabla 8.
Características principales cohetes híbridos experimentales

Vehículo	Compass	Heros	Phoenix-1B Mk-II
Longitud (m)	2,45	7,5	4,9
Diámetro (m)	0,122	0,22	0,17
Peso total (kg)	15	75	88
Carga útil (kg)	0	1	0
Apogeo (km)	3	32	35
Empuje nominal (kN)	0,8	10	7,25
Tiempo de quemado (s)	12	15	14

Fuente: elaboración propia.

Este panorama de desarrollo de propulsión híbrida global nos permite establecer un estado del arte inicial para la posible implementación de este tipo de cohetes en programas de cohería sonda en Colombia. Sin embargo, como una conclusión prematura, en este punto se hace evidente la necesidad de aumentar los esfuerzos en investigación y desarrollos de la propulsión híbrida, con el fin de lograr rendimientos semejantes a los motores sólidos.

Etapa 3: Oportunidades para la implementación de cohetes híbridos tipo sonda en Colombia

La evolución constante del sector aeroespacial en Colombia, desde la concepción de la FAC hasta el lanzamiento reciente del satélite FACSAT-2 en abril de 2023 (FAC, 2023), se ha desarrollado gracias a la sinergia entre la academia, la industria y el Estado, junto con

alianzas internacionales. El conjunto de estos actores es denominado “la triple hélice de la cadena aeroespacial colombiana” (Revista *Contacto*, 2022). Los recursos con los que cuenta Colombia, aprovechados por esta sinergia, conciben una serie de oportunidades emergentes por considerar para el desarrollo de un programa de cohetes sonda en el país:

- **Ventajas geográficas:**

La ubicación de Colombia cerca de la línea del ecuador es estratégicamente ideal para el lanzamiento de cohetes sonda y satélites. Debido a la rotación terrestre, esta zona proporciona un impulso adicional a los lanzamientos, lo cual se traduce en un menor consumo de combustible y un aumento en la capacidad de carga útil. Esta ventaja pone a Colombia en una posición privilegiada en comparación con naciones más alejadas del ecuador y permite una optimización tanto en los costos como en las operaciones espaciales (Álvarez-Calderón, 2020).

- **Sostenibilidad y rentabilidad del sector espacial:**

Se prevé que la industria espacial continúe su tendencia de crecimiento acelerado, con expectativas de ingresos globales superando el trillón de dólares hacia 2040 (Knowledge at Wharton, 4 de junio de 2019). Colombia, dadas sus ventajas geográficas, tiene una oportunidad única de integrarse en este mercado en crecimiento, ofertando servicios de lanzamiento que son competitivos y rentables a nivel global (Poveda-Zamora, 2020). Adicionalmente, la consolidación y expansión de la red satelital colombiana, impulsada por la soberanía del país sobre su órbita geostacionaria, exige la disponibilidad de cohetes sonda para el avance tecnológico y de entendimiento en materia espacial, facilitando así el crecimiento de esta industria en el país, tal como se vio en países como India y Brasil.

- **Oportunidades geopolíticas:**

Las alianzas geopolíticas actuales ofrecen retos y ventajas para Colombia. La adhesión a los acuerdos Artemis por parte de Colombia (NASA, 2022), que establecen un conjunto de principios prácticos para guiar la cooperación en materia de exploración espacial

entre naciones, ofrece un escenario interesante a nivel de cooperación internacional. Es claro que las relaciones internacionales serán determinantes en las futuras colaboraciones y en el despliegue de infraestructura espacial en territorio colombiano.

- **Políticas internas:**

Colombia ha estado trabajando en establecer una presencia en el ámbito aeroespacial y del espacio ultraterrestre, lo cual se refleja en varias leyes y políticas públicas. A continuación, se presentan algunos de los esfuerzos y estructuras legislativas relevantes:

Ley 2302 de 2023: Establece medidas para asegurar la defensa e integridad territorial de Colombia en el espacio, promoviendo el desarrollo del sector espacial bajo el liderazgo estatal. Asegura la alineación con la Constitución y los tratados internacionales, y busca que las actividades espaciales, incluyendo la Luna y otros cuerpos celestes, no comprometan la seguridad, la defensa, las operaciones aéreas y espaciales, ni la soberanía nacional.

Proyecto de Ley 023 de 2023: Crea la Agencia Nacional de Seguridad Digital y Asuntos Espaciales, que tendrá la responsabilidad de coordinar, definir y hacer seguimiento a las políticas de seguridad digital y del sector espacial.

Proyecto de Ley 373 de 2023: Establece un marco regulatorio para el desarrollo del sector espacial colombiano. El proyecto propone, entre otras cosas, la creación de zonas francas destinadas a empresas del sector espacial, el apoyo a la investigación y el desarrollo espacial, y la promoción de la apropiación social del conocimiento espacial.

En general, Colombia está dando pasos importantes para desarrollar su sector espacial, estableciendo un marco legal y político favorable para el desarrollo del sector, promoviendo medidas para incentivar la investigación, el desarrollo y la aplicación de las tecnologías espaciales. Por su parte, la creación de entidades como la Comisión Colombiana del Espacio (CCE) y la Corporación Científica del Sector Aeroespacial (COCSA) refleja el compromiso nacional creciente por el desarrollo científico y tecnológico para el beneficio del país.

- **En cuanto a la propulsión híbrida:**

El desarrollo de un programa de cohetes tipo sonda en Colombia requiere superar desafíos significativos en términos de infraestructura, aspectos socioeconómicos y normativas, especialmente en lo que respecta a la gestión de ciertos propelentes (Urrego-Peña, 2019). En este contexto, la propulsión híbrida emerge como una solución técnica y económicamente viable. Combustibles como la parafina y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), que son de fácil acceso y tienen un costo moderado en Colombia, se presentan como opciones viables para el desarrollo y la investigación de motores experimentales (Arteaga-Moreno, 2018). Además, la integración de métodos de manufactura aditiva simplifica la producción de componentes complejos y permite la creación de geometrías específicas para el diseño de combustibles.

En resumen, la propulsión híbrida no solo se perfila como una alternativa técnica adecuada para Colombia, sino también como una estrategia alineada con las particularidades y los desafíos del entorno aeroespacial colombiano. Esta tecnología podría ser el punto de partida para los estudios y desarrollos de infraestructura necesarios, impulsando así las ciencias y la industria espacial en el país.

Etapa 4: Validación experimental, desarrollo del cohete AINKAA H1

Para generar el diseño del cohete AINKAA H1, se parte del diagrama de la Figura 2 en el cual se consideran los sistemas principales que conforman un cohete:

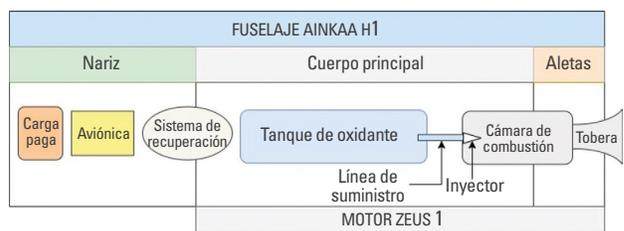


Figura 2. Esquema del diseño conceptual del AINKAA H1
Fuente: elaboración propia.

El cohete AINKAA H1 está compuesto por un fuselaje que incluye la nariz o cofia, el cuerpo principal y

las aletas. Dentro de la nariz se aloja la carga útil, junto con la aviónica encargada del control del motor y la medición de variables de interés, así como el sistema de geolocalización. Además, el cohete está equipado con un sistema de separación que permite desprender la nariz del cuerpo principal y activar el mecanismo de recuperación. Las aletas, acopladas al fuselaje, proporcionan la estabilidad necesaria durante el vuelo. En la Figura 3, se presenta el diseño propuesto para el prototipo del cohete AINKAA H1.

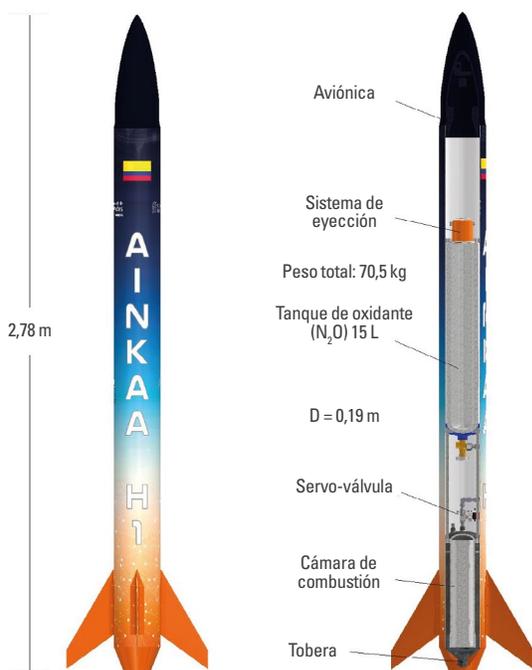


Figura 3. Diseño del cohete AINKAA H1
Fuente: elaboración propia.

A su vez, en el diseño del motor híbrido Zeus 1 se identifican dos conjuntos principales: el tanque de oxidante y la cámara de combustión, componentes que están conectados a través de la línea de suministro, la válvula reguladora y el inyector. El diseño del motor se centra en dos objetivos clave: su caracterización en pruebas de banco y el desarrollo del sistema de propulsión para el cohete AINKAA H1, con el fin de desarrollar una misión aeroespacial buscando alcanzar la estratosfera, alrededor de 7 km de altitud (Prada-Conde, 2023).

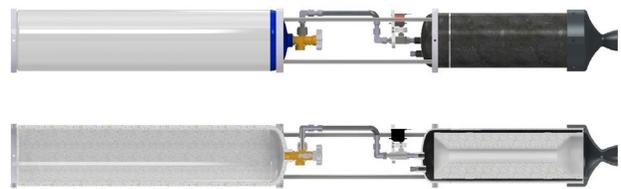


Figura 4. Modelo del motor Zeus 1
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4, es posible observar el diseño general del motor Zeus 1. De izquierda a derecha se tiene: el tanque de oxidante, la línea de suministro con la electroválvula diseñada para controlar la apertura y el cierre del paso de oxidante, el inyector, la cámara de combustión y la tobera. Se diseñó una unión conformada por mamparos y barras de acero para mantener alineado el tanque de oxidante y la cámara de combustión. Para la mezcla de propelente híbrido, se eligió ABS como combustible y óxido nitroso (N_2O) como oxidante. En el corte de sección transversal del motor, es posible observar el grano de combustible ubicado dentro de la cámara de combustión.

Tabla 9.
Características principales del AINKAA H1

Balística teórica	
Número de etapas del cohete	1
Empuje [N]	2000
Tiempo de quemado [s]	10
Peso total del cohete [kg]	70,5
Apogeo total [msnm]	7000
Tiempo total de vuelo [s]	220
Diámetro [m]	0,19
Longitud total [m]	2,8
Oxidante	N_2O
Combustible	ABS

Fuente: elaboración propia.

El diseño conceptual del AINKAA H1 se establece como un cohete de una única etapa, con un empuje teórico de 2 kN y un tiempo de quemado de 10 segundos. El peso total estimado es de 70,5 kg, con el objetivo de alcanzar un apogeo de 7 km de altitud. A pesar de sus dimensiones compactas, con un diámetro de

0,19 metros y una longitud de 2,8 metros, el cohete mantiene un rendimiento significativo, tal como se resume en la Tabla 9, que presenta las características principales del cohete AINKAA H1.

- **Prototipado:**

En la Tabla 10, se presenta la descripción detallada del desarrollo y las pruebas de los prototipos del cohete AINKAA H1 y el motor Zeus 1:

Tabla 10.
Descripción de los componentes del fuselaje del AINKAA H1

Fuselaje	
Componente	Descripción
Cofia	Elaborada mediante manufactura aditiva, la nariz o cofia incluye un soporte para ubicar la cámara de grabación de vuelo con la cual se hará registro de la misión desde el cohete.
Cuerpo principal	Para la fabricación del cuerpo principal del fuselaje, se tiene una lámina de aluminio 1100 comercial que fue rolada a un diámetro de 197 mm por 2200 mm de longitud.
Aletas	Cuatro piezas elaboradas mediante manufactura aditiva. Cada una de las aletas presenta seis agujeros para ensamblar mediante tornillos al fuselaje. Estas aletas se diseñaron buscando un área mayor en la base y generando una disminución gradual hasta la punta, con el fin de soportar las cargas aerodinámicas durante el vuelo.
Boattail	Pieza elaborada a partir de una lámina de aluminio rolada en forma de cono. Esta pieza se acopla directamente al cuerpo de fuselaje mediante soldadura.

Fuente: elaboración propia.

El fuselaje del cohete ha sido diseñado con un enfoque tanto funcional como estructural, teniendo en cuenta las demandas de vuelo y la eficiencia en el montaje. La nariz y las aletas están fabricadas mediante manufactura aditiva, lo cual demuestra una gran adaptabilidad en el diseño y la producción. Esto permite la integración de componentes adicionales, como la cámara para el registro del vuelo, además de proporcionar un espacio de 1,7 litros para la aviónica y la carga útil del cohete, así como la instrumentación necesaria para la documentación de la misión.

El cuerpo principal, fabricado con una lámina de aluminio comercial, combina robustez, resistencia y un peso ligero, ideal para el vuelo. El diseño de las aletas garantiza la estabilidad aerodinámica del cohete durante el vuelo, actuando como superficie de control

que asegura una trayectoria recta y previene movimientos indeseados o giros. Finalmente, el *boattail*, una sección cónica en la parte posterior del fuselaje, está diseñado para mejorar la aerodinámica, reduciendo la resistencia del aire y optimizando el flujo de gases de escape, lo cual mejora la eficiencia del vuelo, especialmente durante el ascenso a alta velocidad. En conjunto, el diseño del fuselaje resulta en una combinación de diferentes técnicas de manufactura con un enfoque práctico de ingeniería, buscando un costo accesible y la reducción de los tiempos de fabricación.

Tabla 11.
Descripción componentes del motor Zeus 1

Motor Zeus 1	
Componente	Descripción
Tanque de oxidante	Cilindro fabricado con aleación de aluminio 6061-T6 de alta resistencia con capacidad para 15,7 litros que soporta hasta 2216 PSI (15,3 MPa). Este material garantiza la integridad estructural del motor y proporciona un bajo peso para el cohete, lo que permite llegar a un mayor apogeo.
Válvulas de suministro	Este diseño se compone de una válvula de diafragma que soporta 3500 PSI accionado por un servomotor de alto torque con engranaje de metal de alta precisión y caja de aluminio.
Cámara de combustión	Una sección de 400 mm de tubo petrolero tri-norma A53/A106 - API 5L7GR B SCH 40 por diámetro de 6 pulgadas.
Tobera	Tobera en forma acampanada que se obtuvo mediante el mecanizado de una pieza de fundición en hierro nodular perlítica-ferrítica.

Fuente: elaboración propia.

El prototipo del motor Zeus 1 se destaca por su construcción cuidadosa, enfocada en la resistencia y la confiabilidad. El tanque de oxidante, fabricado con aleación de aluminio 6061-T6, ofrece no solo ligereza, sino también la capacidad de soportar presiones extremadamente altas, con un límite máximo de 2216 PSI. Las válvulas de suministro son especialmente robustas, integrando una válvula de diafragma apta para 3500 PSI, operada por un servomotor con engranajes metálicos precisos en una carcasa de aluminio. La cámara de combustión está fabricada a partir de un segmento de tubo petrolero tri-norma, lo cual asegura su resistencia tanto al calor como a la presión. Por último, la tobera, mecanizada a partir de hierro nodular perlítico-ferrítico, garantiza una alta resistencia a las

temperaturas extremas y previene la erosión causada por la expulsión de gases.

- **Experimentación en banco estático:**

El motor Zeus 1 fue sometido a tres pruebas en banco estático, en las cuales demostró un comportamiento sólido y confiable. En cada prueba, el motor exhibió un desempeño consistente, cumpliendo con los objetivos establecidos. Estos resultados positivos refuerzan la confiabilidad y la calidad del diseño del motor híbrido, proporcionando una base sólida para validar la metodología propuesta (Prada-Conde, 2023).

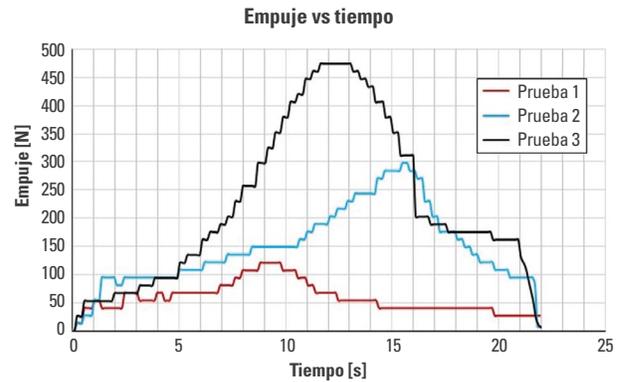


Figura 5. Montaje experimental del motor Zeus 1
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5, se presenta el montaje experimental utilizado para la caracterización del prototipo del motor Zeus 1. Las pruebas experimentales incluyeron tres encendidos, con una duración total de 20 segundos cada uno. El objetivo de estas pruebas fue caracterizar el empuje generado por el motor, así como medir las presiones y temperaturas alcanzadas en la cámara de combustión y la tobera (Prada-Conde, 2023). A continuación, se presentan los resultados experimentales obtenidos.

En la Gráfica 1, se muestran las curvas de la fuerza generada por el motor a lo largo del tiempo durante las tres pruebas de encendido. Como se puede observar, el empuje sigue una tendencia característica: incrementa durante los primeros 15 segundos de operación y luego disminuye gradualmente hasta llegar a cero. Es importante destacar que los primeros 5 segundos representados en la gráfica corresponden al tiempo de activación del ignitor, lo cual explica un leve aumento

inicial del empuje, seguido por un incremento acelerado y, finalmente, una disminución del empuje debido al exceso de oxidante en la cámara de combustión (Prada-Conde, 2023).

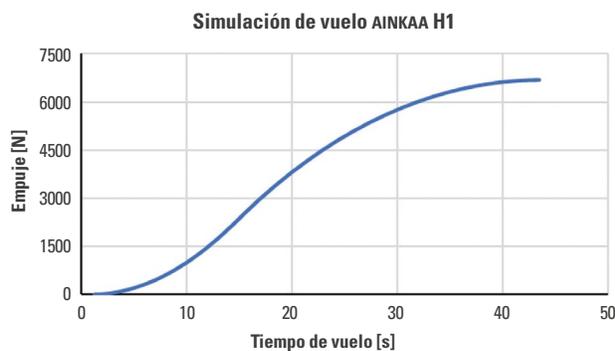


Gráfica 1. Curva de empuje contra tiempo de tres encendidos del motor Zeus 1
Fuente: Prada-Conde (2023).

- **Simulaciones de vuelo:**

Las simulaciones de vuelo del cohete AINKAA H1 se llevaron a cabo utilizando el *software* Rocksim, una herramienta que permite diseñar un cohete y simular su vuelo para evaluar parámetros como la altitud máxima, la velocidad alcanzada y la duración del vuelo. Este *software* facilita la manufactura del cohete al evitar la adquisición de piezas innecesarias y proporciona una estimación de la estabilidad y seguridad del diseño. Con el tiempo, se ha observado que los datos calculados con Rocksim se acercan considerablemente a los datos experimentales reales, lo cual respalda su alta confiabilidad.

Como se muestra en la Gráfica 2, el cohete diseñado presenta una trayectoria de vuelo segura y un comportamiento balístico deseado, alcanzando una altitud máxima de 7000 metros y un tiempo de vuelo hasta el apogeo de aproximadamente 42 segundos. Las condiciones de simulación se ajustaron de acuerdo con el reporte meteorológico de un día soleado en la Base Aérea Coronel Luis Arturo Rodríguez Meneses, en Marandúa, Vichada, con vientos entre 9 km/h y ráfagas de hasta 14 km/h, una temperatura media de 27 °C (máxima de 33 °C y mínima de 21 °C), y una elevación de la zona de lanzamiento de 87 msnm.



Gráfica 2. Curva de altitud contra tiempo de la simulación de vuelo del cohete AINKAA H1

Fuente: elaboración propia.

Discusión

El desarrollo del cohete AINKAA H1 y del motor híbrido Zeus 1 representa un hito significativo en la capacidad técnica de Colombia y subraya las oportunidades que el país tiene para innovar en el sector aeroespacial. La implementación de técnicas avanzadas de manufactura, como la manufactura aditiva, no solo presenta una notable adaptabilidad en el diseño y la producción de componentes aeroespaciales, sino que también refleja un enfoque estratégico en la optimización de costos y la reducción de los tiempos de fabricación. Este enfoque es crucial en un sector donde la eficiencia y la capacidad de adaptación a las necesidades específicas de cada misión son factores determinantes.

El motor Zeus 1 se destaca por su construcción robusta, diseñada específicamente para garantizar resistencia y confiabilidad bajo condiciones extremas. Las pruebas en banco estático han demostrado que el diseño del motor no solo cumple con los parámetros de rendimiento deseados, sino que también ofrece un margen de seguridad considerable, lo cual es esencial para operaciones de alta confiabilidad. Estas pruebas validan el enfoque de diseño adoptado y proporcionan una base sólida para futuras iteraciones y mejoras en el motor. Es necesario resaltar que el Zeus 1 fue una primera iteración de un diseño de motor que tiene un amplio margen de mejora y que seguramente se podrá obtener un mejor rendimiento con la inversión de más recursos para su desarrollo.

A nivel internacional, el cohete AINKAA H1 puede ser comparado con otros proyectos similares desarrollados por grupos universitarios, como el cohete Compass. Aunque el Compass es un vehículo de menor tamaño y capacidad en comparación con el AINKAA H1, su apogeo máximo de 3 km es significativamente menor que el apogeo teórico de 7 km del AINKAA H1. Esta comparación subraya el rendimiento superior del cohete colombiano y destaca la efectividad del diseño y los materiales seleccionados. Lo que realmente distingue al proyecto AINKAA H1 es su enfoque en la adaptabilidad y la versatilidad durante el proceso de fabricación, que no solo permite una reducción de costos, sino que también asegura una operación confiable, lo cual es crucial en misiones que demandan precisión y seguridad.

Además, es importante destacar el papel fundamental que ha jugado la formación de redes estratégicas en el éxito del proyecto. Estas redes, que incluyen la colaboración entre universidades, industria y entidades del Estado colombiano, han facilitado el intercambio de conocimientos, recursos y capacidades técnicas necesarias para llevar a cabo un proyecto de esta envergadura. La sinergia creada a través de estas colaboraciones ha sido un elemento clave para superar los desafíos inherentes al desarrollo de tecnología aeroespacial avanzada en un contexto nacional con recursos limitados.

En resumen, el cohete AINKAA H1 y el motor Zeus 1 no solo son demostraciones de la capacidad técnica alcanzada, sino que también representan un modelo a seguir para futuros desarrollos en el sector aeroespacial colombiano. La combinación de innovación en diseño, adaptabilidad en producción y colaboración estratégica posiciona a estos proyectos como referentes en la industria, y sienta las bases para el crecimiento y la consolidación de la capacidad aeroespacial en Colombia.

Conclusiones

El desarrollo del cohete AINKAA H1 y del motor híbrido Zeus 1 representa un avance significativo en la

capacidad tecnológica de Colombia, demostrando el potencial del país para innovar en la industria aeroespacial. Tales logros subrayan la importancia de aprovechar la ventaja geográfica de Colombia, situada cerca del ecuador, una ubicación que históricamente ha sido clave en proyectos de lanzamientos espaciales en otros países, como el caso del Centro Espacial de Kourou en la Guayana Francesa. Colombia, al igual que otras naciones con una posición geográfica estratégica, tiene la oportunidad de utilizar esta ventaja para reducir costos y mejorar la eficiencia de los lanzamientos, con lo cual abre nuevas posibilidades para el desarrollo espacial.

Es esencial que el país invierta en el desarrollo de infraestructuras críticas que respalden estos avances tecnológicos. Ejemplos específicos incluyen la creación de centros de lanzamiento especializados, como lo es la Base Aérea de Marandúa que ya se perfila como un sitio con un potencial significativo para convertirse en un puerto espacial. Además, es necesario establecer laboratorios de investigación equipados con tecnología de punta para la fabricación y prueba de componentes aeroespaciales como el Centro de Operaciones Espaciales de la FAC (SpOC), situado en las instalaciones de la Escuela Militar de Aviación, en la ciudad de Cali. Nuevas infraestructuras no solo permitirían el crecimiento de la industria aeroespacial en Colombia, sino que también servirían como catalizadores para atraer inversiones y fomentar la investigación avanzada en el país.

El impacto positivo del crecimiento del sector aeroespacial en otras naciones proporciona un modelo a seguir para Colombia. En países como India y Brasil, el desarrollo de sus programas espaciales ha generado un aumento significativo en la creación de empleos tanto directos como indirectos, ha impulsado la educación técnica y científica, y ha fomentado el avance tecnológico en múltiples sectores. Colombia tiene la oportunidad de replicar estos beneficios, impulsando el empleo de alta calificación, fortaleciendo la educación en STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) y promoviendo la transferencia de tecnología en la industria nacional.

Finalmente, el éxito del cohete AINCAA H1 y del motor Zeus 1 refuerza la necesidad de continuar invirtiendo en investigación y desarrollo dentro del campo aeroespacial. Es crucial que se implementen políticas públicas que apoyen la creación de un ecosistema robusto para la investigación y la innovación, además de fomentar la colaboración entre el Gobierno, la academia y la industria. Este proyecto establece un precedente que debe ser aprovechado para asegurar que Colombia no solo participe, sino que también se posicione como un líder en el ámbito aeroespacial en América Latina.

Referencias

- Aerospace Systems Research Institute (ASRI). (s. f.). *Phoenix-1B Mk II*. University of KwaZulu-Natal [en línea]. <https://aerospace.ukzn.ac.za/rocket-projects/phoenix/phoenix-1b-mk-ii/>
- Álvarez-Calderón, C. E. (2020). *El cielo no es el límite: el futuro estelar de Colombia*. Editorial Universidad Católica.
- Andøya Space. (2023). *Sounding rocket launch services* [en línea]. <https://andoyaspace.no/what-we-do/sub-orbital/sounding-rockets/>
- Arteaga-Moreno, L. A. (2018). *Design, Construction and Tests of a Rocket Propulsion Motor with Hybrid Propellant in a Static Bank* [tesis doctoral, Universidad de los Andes].
- Barrero-Barrero, D. (2021). Fuerza Aérea Colombiana: motor propulsor hacia el espacio ultraterrestre del país hacia un triple desarrollo. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 87-101. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8475676>
- Chiaverini, M. y Kuo, K. (2007). *Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion*. Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica.
- Congreso de la República. (2023, 12 de julio). *Ley 2302 de 2023. Por medio de la cual se adoptan medidas para garantizar la defensa e integridad territorial en el ámbito espacial y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial 52.454.
- Da Motta-Silva, F. y Perondi, L. F. (2020). A Proposal of a Life-Cycle for the Development of Sounding Rockets Missions. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 13. <https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1193>

- European Space Agency (ESA). (2014). *ESA User Guide to Low Gravity Platforms* [en línea]. <http://wsn.spaceflight.esa.int/docs/EUG2LGPr3/EUG2LGPr3-0-Start.pdf>
- European Space Agency (ESA). (2014). (2023). *Sounding Rockets* [en línea]. https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Sounding_rockets
- Fuerza Aérea Colombiana (FAC). (2023, 22 de junio). Agencia Espacial Europea y Fuerza Aérea Colombiana fortalecen cooperación en el ámbito espacial. Sala de Prensa Fuerza Aérea Colombiana [en línea]. <https://www.fac.mil.co/es/noticias/agencia-espacial-europea-y-fuerza-aerea-colombiana-fortalecen-cooperacion-en-el-ambito>
- Fuerza Aérea Colombiana (FAC). (s. f.). FACSAT-2 *Chiribiquete* [en línea]. <https://poderespacial.fac.mil.co/facsat-2>
- Geneviève, B. (2013). *Development of a Hybrid Sounding Rocket Motor* [tesis de maestría, University of KwaZulu-Natal]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/10413/8973>
- HyEnD. (2023). *Pushing the Limits of Hybrid Propulsion. Student Rocketry Team of the University of Stuttgart* [en línea]. <https://hyend.de/>
- HyImpulse. (2021). *Sounding Rocket* [en línea]. <https://www.hyimpulse.de/en/products/4-project-2-sounding-rocket>
- IHI Aerospace. (2018). *Sounding Rocket* [en línea]. <https://www.ihj.co.jp/ia/en/products/space/s/index.html>
- Indian Space Research Organization (ISRO). (2023). *Sounding Rockets* [en línea]. <https://www.isro.gov.in/sounding-Rockets.html>
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). (2020). *Sounding Rockets* [en línea]. https://www.isas.jaxa.jp/en/missions/sounding_rockets/
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). (2020). *What is ISAS?* [en línea]. <https://www.isas.jaxa.jp/en/about/outline/>
- Joya Olarte, R. A. (2007). Libertad 1. Primer satélite colombiano en el espacio. Observatorio Astronómico Universidad Sergio Arboleda [en línea]. <https://www.usergioarboleda.edu.co/satelite-libertad-1/>
- Knowledge at Wharton. (2019, 4 de junio). Why Big Business is Making a Giant Leap into Space [en línea]. <https://knowledge.wharton.upenn.edu/article/commercial-space-economy/#:~:text=The%20global%20space%20industry%20is,recent%20report%20by%20the%20firm>
- Kobald, M., Fischer, U., Tomilin, K., Petrarolo, A. y Schmierer, C. (2017). Hybrid Experimental Rocket Stuttgart: A Low-Cost Technology Demonstrator. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 55(2), 484-500. <https://doi.org/10.2514/1.A34035>.
- Larsen, M. (2003). Observation Platforms. Rockets. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (G. R. North, J. Pyle y F. Zhang, eds.; pp. 1449-1454). Clemson University.
- Morante-Granobles, D. F. (Comp.). (2021). *Clústeres aeroespaciales. Polo de desarrollo en Colombia*. Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez.
- Nammo. (2018). *Nucleus Sounding Rocket* [en línea]. <https://www.nammo.com/product/nucleus-sounding-rocket/>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (s. f.). *About Sounding Rockets* [en línea]. https://www.nasa.gov/mission_pages/sounding-rockets/missions/index.html
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2013). *It is Rocket Science. Remarkable Discoveries from NASA's Sounding Rocket Program*. Scientific Colloquium, Goddard Space Flight Center, noviembre de 2013.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2021). *NASA Sounding Rockets Annual Report 2021*. https://sites.wff.nasa.gov/code810/files/Annual_Report_2021.pdf
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2023). *NASA Sounding Rockets User Handbook* [en línea]. <https://sites.wff.nasa.gov/code810/files/SRHB.pdf>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2022, 10 de mayo). *Colombia firma los Acuerdos Artemis* [en línea]. <https://www.nasa.gov/humans-in-space/colombia-firma-los-acuerdos-artemis/>
- Oechsle, M., Dobusch, J., Gritzka, M. y Jochum, P. (2022). *Design and Launch of the Hybrid Rocket Demonstrator Compass*. 2nd International Conference on Flight Vehicles, Aerothermodynamics and Re-entry Missions & Engineering. Heilbronn, Alemania.
- Osorio-Tovar, J. (2022). *Computational Study of Hybrid Propulsion with Beeswax as Solid Propellant* [trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional Uniandes. <http://hdl.handle.net/1992/55603>
- Parra, S. (2023). India hace historia y ya es el cuarto país que llega a la Luna. *National Geographic* [en línea]. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/india-hace-historia-ya-es-cuarto-pais-que-llega-luna_20606
- Poveda-Zamora, G. A. (2020). Revisión teórica y aplicación práctica de las ciencias del espacio para reducir el consumo de combustibles en cohetes y vehículos espaciales. *Revista Ciencia y Poder Aéreo*, 15(1), 152-160. <https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/657/943>

- Prada-Conde, S. (2023). *Desarrollo e implementación del software Hybmotor para el diseño de motores híbridos tipo cohete* [tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional Uniandes. <http://hdl.handle.net/1992/69356>
- Revista Contacto. (2022). Las hélices claves para potenciar la cadena aeroespacial [en línea]. <https://revistacontacto.uniandes.edu.co/contacto-25-cadena-aeroespacial/las-helices-claves-para-potenciar-la-cadena-aeroespacial/>
- Robayo-Salazar, R., Meneses-Suta, J., Pinto-Álvarez, C., Guzmán-Grajales, C., Rey-González, N. y Bazurdo-Castañeda, J. (2020). *Proyectos en cohetería experimental en la EMAVI-FAC como un pilar para fomentar el desarrollo aeroespacial de la región* [ponencia]. Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2020. <https://doi.org/10.26507/ponencia.861>
- Robledo-Ascencio, J. C. (2012). Importancia del diseño y construcción de cohetes sonda en Latinoamérica, Brasil y Argentina. *TecnoESUFA: Revista de Tecnología Aero-náutica*, 18. <https://publicacionesfac.com/index.php/TecnoESUFA/article/view/376?articlesBySameAuthorPage=2>
- Schmierer, C., Kobald, M., Tomilin, K., Fischer, U., Rehberger, M. y Schlechtriem, S. (2015). *HEROS - Sounding Rocket Development by the HyEnD Project* [ponencia]. 6th European Conference for Aeronautics and Space Sciences. Cracovia, Polonia.
- Schmierer, C., Kobald, M., Fischer, U., Tomilin, K., Petrarolo, A. y Hertel, F. (2019). *Advancing Europe's Hybrid Rocket Engine Technology with Paraffin and LOX* [ponencia]. 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences. Madrid, España.
- Seibert, G. (2006). *The History of Sounding Rockets and Their Contribution to European Space Research*. ESA Publications Division.
- Space Foundation. (2022). *Space Industry Growth: Where Are the Opportunities in 2022?* CI&E News [en línea]. <https://cie.spacefoundation.org/space-industry-growth-where-are-the-opportunities-in-2022/#:~:text=The%20global%20space%20economy%20hit,global%20space%20ecosystem%20is%20vast>
- Swedish Space Corporation (ssc). (2023). *Espace Space Center* [en línea]. <https://ssc.space.com/esrange/>
- Sutton, G. P. y Biblarz, O. (2016). *Rocket Propulsion Elements* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Urrego-Peña, J. A. (2019). *Research in Experimental Rocketry: Study of Influence of Geometric and Manufacture Parameters in Combustion of Polymeric Hybrid Rocket Fuel Grains* [tesis de maestría, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional Uniandes. <http://hdl.handle.net/1992/41265>