



LA FORMACIÓN DE INGENIEROS:  
UN COMPROMISO PARA EL  
DESARROLLO Y LA SOSTENIBILIDAD

15 al 18  
DE SEPTIEMBRE

20  
20

[www.acofi.edu.co/eiei2020](http://www.acofi.edu.co/eiei2020)

# PROYECTOS EN COHETERÍA EXPERIMENTAL EN LA EMAVI-FAC COMO UN PILAR PARA FOMENTAR EL DESARROLLO AEROSPAACIAL DE LA REGIÓN

**Rafael Robayo Salazar, Juan Meneses Suta, Carlos Pinto Álvarez, Cristian Guzmán Grajales, Nicolás Rey González, Juan Bazurdo Castañeda**

**Escuela Militar de Aviación (EMAVI)  
Cali, Colombia**

## Resumen

El desarrollo de proyectos de investigación en cohetería experimental se reconoce como la base para consolidar la escuela de conocimiento e infraestructura necesaria para que países emergentes como Colombia inicien y logren el desarrollo de misiones aeroespaciales en el futuro previsible. En este sentido, la Escuela Militar de Aviación (EMAVI) de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) ha venido concatenando esfuerzos con diversos sectores (academia, industria y estado) para impulsar el desarrollo de proyectos de investigación enfocados en sistemas de propulsión y cohetes experimentales, entre otras áreas relacionadas. Recientemente, el Programa de Ingeniería Mecánica (PIMEC) de la EMAVI-FAC ha obtenido resultados promisorios en la síntesis de combustibles sólidos (propelentes), diseño y caracterización de motores cohete y diseño de prototipos de cohetes experimentales. Los resultados derivados han promovido la formulación y ejecución de nuevos proyectos de investigación que son complementarios e involucran un número importante de cadetes (estudiantes de pregrado), acompañados y dirigidos por oficiales, docentes e investigadores del Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA) de la FAC y otras instituciones a nivel regional y nacional. La articulación de todos estos actores y el fortalecimiento de sus labores investigativas se consideran un motor para impulsar, desde la academia, el sector aeroespacial de la región. Este trabajo integra los resultados y hallazgos más importantes obtenidos por los estudiantes de pregrado del PIMEC-EMAVI relacionados con sus proyectos y trabajos de grado, y define los retos y oportunidades que han sido identificadas hasta la fecha.

**Palabras clave:** cohete experimental; sistemas de propulsión; vehículos espaciales

## Abstract

*The development of research projects in experimental rocketry is recognized as the basis for consolidating the knowledge and infrastructure necessary for countries like Colombia to initiate and achieve the development of aerospace missions in the foreseeable future. In this sense, the “Escuela Militar de Aviación” (EMAVI) of the Colombian Air Force (FAC, “Fuerza Aérea Colombiana”) has been articulating with various sectors (academia, industry and government) to promote the development of research projects focused on propulsion systems and experimental rockets, among other related areas. Recently, the EMAVI-FAC's Mechanical Engineering Program (PIMEC) has obtained promising results in the synthesis of solid propellants, the design and characterization of rocket engines, and the design of prototypes of experimental rockets. The results obtained have promoted the formulation and execution of new research projects that are complementary and involve a significant number of members of the Research Group on Aerospace Studies (GIEA, “Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales”) of the FAC and other institutions at the regional and national level. The articulation of all these developments, from the academy, promote the region's aerospace sector. This manuscript integrates the most important results and findings obtained by PIMEC-EMAVI undergraduate students related to their projects and thesis, and defines the challenges and opportunities that have been identified to date.*

**Keywords:** *experimental rocketry, propulsion systems, aerospace sector*

## 1. Introducción

La Fuerza Aérea Colombiana (FAC) se enfrenta constantemente a la necesidad de desarrollar aplicaciones tecnológicas con un alto nivel de novedad en los ámbitos aéreo, espacial militar y de defensa, en cumplimiento de su misión institucional: “Volar, entrenar y combatir para vencer y dominar en el aire, el espacio y el ciberespacio, en defensa de la soberanía, la independencia, la integridad territorial, el orden constitucional y contribuir a los fines del Estado”. Al respecto, el proyectar estrategias que le permitan lograr una autonomía y ventaja operacional, desarrollando capacidades propias y dinámicas a través de la investigación, en áreas del conocimiento tales como la cohetería experimental, le permitirán enfrentar las necesidades institucionales y liderar el poder aeroespacial con poca dependencia tecnológica externa, aportando al desarrollo y posicionamiento del país como un referente de este campo a nivel regional. En efecto, el desarrollo de capacidades que permitan diseñar y construir cohetes de sondeo ofrecen ciertas ventajas operacionales en la FAC, debido a que pueden ser lanzados desde sitios temporales en todo el territorio nacional, pueden utilizarse para estudios de campo remotos, asimismo, se los puede emplear con el fin de desarrollar y poner a prueba nuevos instrumentos científicos (cargas útiles) de medición y observación (R. A. Robayo-Salazar, 2019).

Los cohetes experimentales son considerados por la NASA como una herramienta única para llevar a cabo investigaciones científicas en regiones importantes del espacio que son demasiado bajas para ser muestreadas por satélites (NASA, 2019). En este sentido, los cohetes experimentales son empleados para el transporte, a bajo costo, de instrumentos científicos de medición y observación (cargas útiles), los cuales incluyen un sistema de recuperación. Entre los campos de aplicación se

han reportado la bio-meteorología, fotobiología atmosférica preventiva, monitoreo de contaminación, telecomunicaciones, observación de territorios y toma de imágenes aéreas, entre otras (Marcado et al., 2009). Además del aporte a la ciencia y la tecnología, las misiones de cohetería experimental también proporcionan herramientas invaluable para la formación académica y científica (Acosta Vasquez, Marin, & Jaimes, 2011), promoviendo, a través del desarrollo de proyectos de investigación, el surgimiento de escuelas de conocimiento necesarias para avanzar hacia misiones más costosas y de mayor duración (Bandedcchi, Melton, & Ongaro, 1999), como el lanzamiento de cohetes tipo sonda y la colocación en posiciones suborbitales y orbitales de nano y pico-satélites al servicio del país (Álvarez Calderón & Corredor Gutiérrez, 2019).

Con base en lo anterior, la Escuela Militar de Aviación (EMAVI) de la FAC propone el desarrollo de proyectos de investigación relacionados con el diseño, construcción y lanzamiento de cohetes de sondeo con fines militares, científicos y experimentales. Cabe anotar que este tipo de cohetes sonda se desarrollaría por primera vez en Colombia. Estas iniciativas se enmarcan dentro de un macro-proyecto de investigación, denominado FACSON, que surgió en la EMAVI con la participación de cadetes, oficiales, docentes e investigadores de los diversos programas académicos, especialmente el de Ingeniería Mecánica (PIMEC), y del Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA). Este macro-proyecto de investigación se enmarca dentro de los Programas Estratégicos de Ciencia, Tecnología e Innovación del Modelo de Investigación (MAINV) de la FAC, específicamente el PROGRAMA ESPACIAL FAC. En el marco de este programa, el macro-proyecto FACSON se relaciona con el sub-programa PROYECTOS DE DESARROLLO AEROESPACIAL y sus líneas de investigación: i) Plataformas y vehículos espaciales, ii) Sistemas de carga espacial y iii) Sistemas de misión espacial. Recientemente, el PIMEC de la EMAVI-FAC ha obtenido resultados promisorios en la síntesis de combustibles sólidos (propelentes), diseño y caracterización de motores cohete y diseño de prototipos de cohetes experimentales.

## **2. Metodología**

La metodología utilizada para el desarrollo de los proyectos en cohetería en la EMAVI-FAC se enmarca en un macro-proyecto denominado "FACSON". Este macro-proyecto tiene como propósito el diseño, construcción y lanzamiento de un prototipo a escala de cohete sonda. En este sentido, FACSON da origen a diversos micro-proyectos e investigaciones específicas relacionadas con el desarrollo de cada uno de los componentes y/o sub-sistemas que integran el FACSON. Al respecto, la figura 1 resume las fases y/o etapas que integran los desarrollos en cohetería experimental en la EMAVI. A la fecha, la EMAVI-FAC ha concentrado sus esfuerzos en el diseño, construcción y caracterización de motores cohete y diseños del fuselaje (ojiva, cuerpo y aletas) de prototipos de cohetes experimentales.

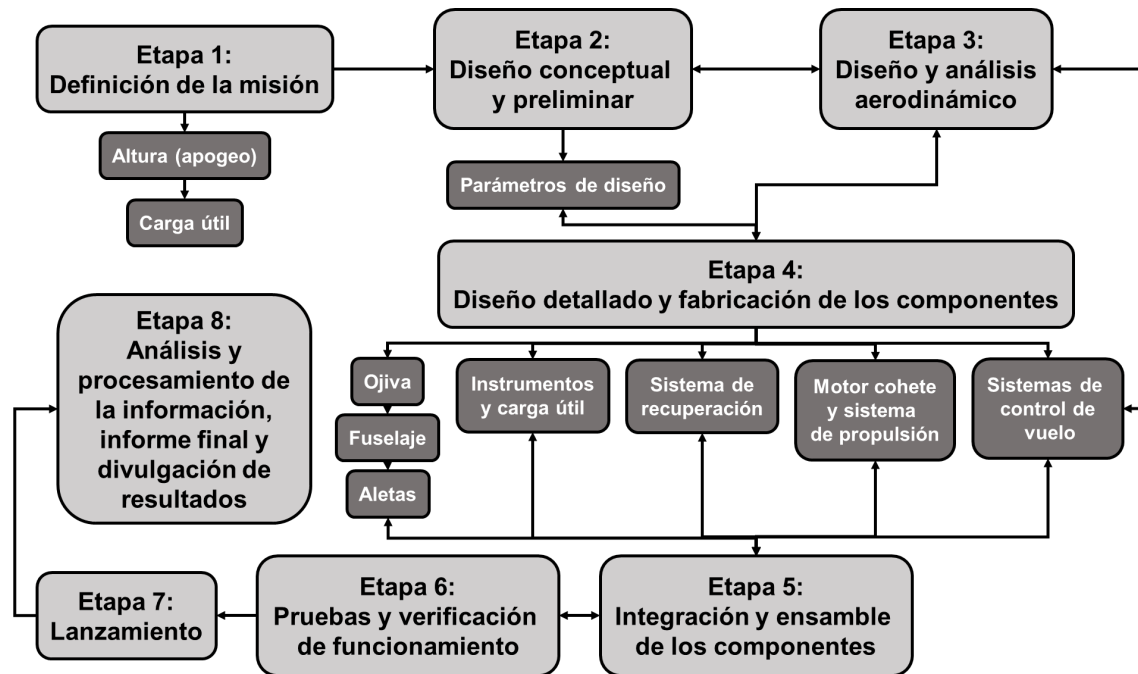


Figura 1. Fases y/o etapas metodológicas asociadas al macroproyecto FACSON desarrollado en la EMAVI-FAC.  
Fuente: Autores.

### 3. Resultados

En cuanto al diseño, construcción y prueba estática de motores cohete, los resultados están relacionados con prototipos basados en combustibles (propelentes) sólidos tipo Candy. Los diseños de los motores se han basado en la metodología SRM (Solid Rocket Motor Design). Un primer prototipo de motor cohete incluyó el sistema ignitor, la cámara de combustión, el combustible sólido y la tobera. El diámetro interno de la cámara de combustión y la longitud total del motor cohete fueron de 27,67 mm y 230 mm, respectivamente. La tobera del motor cohete fue de tipo Laval convergente-divergente. El combustible sólido se basó en la mezcla de nitrato de potasio ( $KNO_3$ ) (oxidante) y azúcar de alta pureza (o sucrosa:  $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) (combustible), cuya síntesis se logró a través de un proceso de fusión térmica (150-170°C durante 20-25 min). El desempeño del motor cohete fue evaluado mediante una prueba estática de combustión; arrojando como resultados una fuerza de empuje máxima (carga) de 227 N, un impulso total de 98.69 N-s y un impulso específico de 65.8 s, permitiendo así, su clasificación como un motor cohete clase G (figura 2). Los resultados obtenidos son considerados de gran importancia en el desarrollo y caracterización de motores cohete de combustible sólido, necesarios para impulsar el campo de la cohetería experimental en Colombia.



Figura 2. Diseño, construcción y prueba estática de motores cohete en la EMAVI-FAC. Fuente: Autores.

Debido a que los componentes del motor cohete deben diseñarse para soportar temperaturas de trabajo superiores a los 1600-2000 °C en un ambiente ablativo severo, la EMAVI-FAC ha desarrollado sistemas de protección térmica y materiales compuestos de alta temperatura para la fabricación de componentes de propulsión de bajo peso. Los materiales compuestos desarrollados han sido caracterizados físico-mecánicamente y sometidos a ensayos ablativos de llama directa (~1600-2000 °C, 120 segundos), reportando niveles de aislamiento térmico de hasta el 92.9% y pérdidas de peso posteriores al ensayo ablativo inferiores al 13.2%. Estos resultados han permitido su aplicación en la fabricación de cámaras de combustión y toberas de motor cohete y la validación de su desempeño mediante pruebas de combustión reales (figura 3). Los resultados obtenidos demostraron la posibilidad de producir estos componentes a partir de materiales compuestos ablativos de fácil adquisición y altos contenidos de subproductos industriales; aplicaciones que se consideran de suma importancia en la búsqueda de disminuir el peso de los vehículos espaciales y aumentar su apogeo con relación a una propulsión específica (R. Robayo-Salazar, Portocarrero-Hermann, Díaz-Padrón, & Patiño-Castrillón, 2020).



Figura 3. Desarrollo y prueba de componentes de propulsión a partir de materiales compuestos ablativos. Fuente: Autores.



Como integración de todos estos desarrollos, la EMAVI-FAC ha avanzado en el diseño de prototipos de cohetes experimentales con el propósito de ser pionero en el lanzamiento de este tipo de vehículos espaciales en la región. En principio, la investigación de cohetes de combustible sólido le permitirá a la institución adquirir toda la escuela de conocimientos necesaria para lograr incursionar en combustibles de mayor capacidad de empuje (mayor apogeo en las misiones aeroespaciales). Los diseños de prototipos de cohetes experimentales en la EMAVI-FAC se han basado en el manejo del software OpenRocket-15. Una muestra de la labor investigativa en este campo se representa en la figura 4, la cual corresponde al diseño de un cohete que a su vez está basado un motor clase G, también desarrollado y caracterizado en la EMAVI-FAC. Se espera que este cohete, denominado FACSON-0, sea lanzado en el futuro cercano, destacando que sería el primer prototipo 100% diseñado y fabricado en la institución.

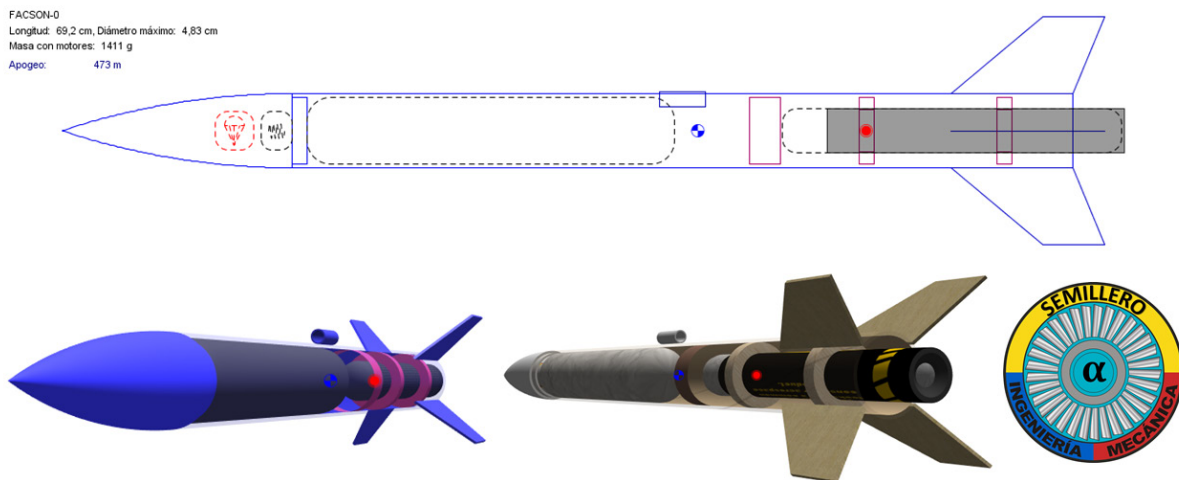


Figura 4. Diseño del primer prototipo de cohete experimental que será lanzado por la EMAVI-FAC. Cohete denominado FACSON-0. Fuente: Autores.

#### 4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la EMAVI-FAC, relacionados con la síntesis de combustibles sólidos (propelentes), diseño y caracterización de motores cohete y diseño de prototipos de cohetes experimentales, son promisorios y han fomentado la formulación y ejecución de nuevos proyectos de investigación, que son complementarios entre sí e involucran un número importante de cadetes (estudiantes de pregrado), oficiales, docentes e investigadores del Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA) y otras instituciones a nivel regional y nacional. La articulación de todos estos actores y el fortalecimiento de sus labores investigativas se consideran un motor para impulsar, desde la academia, el sector aeroespacial del país y la región.

#### 5. Referencias

- Acosta Vasquez, E. A., Marin, L. E., & Jaimes, O. (2011). Cohetes hidráulicos. Diseño, construcción y experimentación, una experiencia integradora. *5° Congreso Nacional de*

- Enseñanza de La Física*, 229–231. Bogotá D.C.
- Álvarez Calderón, C. E., & Corredor Gutiérrez, C. G. (2019). *El espacio exterior: una oportunidad infinita para Colombia*. Bogotá D.C.: Fuerza Aérea Colombiana.
  - Bandecchi, M., Melton, B., & Ongaro, F. (1999). Concurrent engineering applied to space mission assessment and design. *Esa Bulletin European Space Agency*, 99, 34–40.
  - Mercado, V., Benítez, P., La Rosa, C., La Cruz, L., Parco, M., Ferrerira, J., ... Rojas, J. J. (2009). Progresos alcanzados en el proyecto universitario cohete sonda ULA. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 13(53), 305–316. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3286.5120>
  - NASA. (2019). Descripción general del programa Rocket de sondeo de la NASA: Oportunidades únicas para investigación científica enfocada, de bajo costo y rápida. Retrieved from NASA Rocking Science Rocking website: <https://rscience.gsfc.nasa.gov/srrov.html>
  - Robayo-Salazar, R. A. (2019). Cohetes tipo sonda con fines científicos, tecnológicos y militares: una oportunidad para su desarrollo en la EMAVI-FAC. In *Ciencia, Gestión e Ingeniería en el Desarrollo Aeroespacial* (pp. 49–72). Cali, Colombia: Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suarez.”
  - Robayo-Salazar, R., Portocarrero-Hermann, J., Díaz-Padrón, U., & Patiño-Castrillón, O. (2020). Polymeric Ablative Composite Materials and their Application in the Manufacture of Aerospace Propulsion Components. *Revista Facultad de Ingeniería*, 29(54), e10662. <https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10662>

## Sobre los Autores

- **Rafael Robayo-Salazar**; Ingeniero de materiales, Doctor en Ingeniería de la Universidad del Valle. Docente Investigador del Programa de Ingeniería Mecánica de la Escuela Militar de Aviación (EMAVI)-Fuerza Aérea Colombiana (FAC). [rafael.robayo@emavi.edu.co](mailto:rafael.robayo@emavi.edu.co)
- **Juan Meneses-Suta**; Cadete de tercer año (CD3) del Programa de Ingeniería Mecánica de la Escuela Militar de Aviación (EMAVI)-Fuerza Aérea Colombiana (FAC). [jdmenesess@emavi.edu.co](mailto:jdmenesess@emavi.edu.co)
- **Carlos Pinto-Álvarez**; Cadete de tercer año (CD3) del Programa de Ingeniería Mecánica de la Escuela Militar de Aviación (EMAVI)-Fuerza Aérea Colombiana (FAC). [capintoa@emavi.edu.co](mailto:capintoa@emavi.edu.co)
- **Cristian Guzmán-Grajales**; Cadete de tercer año (CD3) del Programa de Ingeniería Mecánica de la Escuela Militar de Aviación (EMAVI)-Fuerza Aérea Colombiana (FAC). [cgguzmang@emavi.edu.co](mailto:cgguzmang@emavi.edu.co)
- **Nicolás Rey-González**; Cadete de tercer año (CD3) del Programa de Ingeniería Mecánica de la Escuela Militar de Aviación (EMAVI)-Fuerza Aérea Colombiana (FAC). [ndreyg@emavi.edu.co](mailto:ndreyg@emavi.edu.co)
- **Juan Bazurdo-Castañeda**; Cadete de tercer año (CD3) del Programa de Ingeniería Mecánica de la Escuela Militar de Aviación (EMAVI)-Fuerza Aérea Colombiana (FAC). [jdbazurdoc@emavi.edu.co](mailto:jdbazurdoc@emavi.edu.co)

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2020 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)