

Del modelo digital al túnel de viento: análisis experimental de una aeronave de ala fija

Leonardo David Capponi-Pinto

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

✉ lcapponi@outlook.com

Javier López-Solís

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

Fabrizio Coto-Vílchez

Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

Fecha de recepción: 4 de abril del 2025 | Fecha de aprobación: 13 de agosto del 2025

Resumen

Este artículo presenta los resultados del proyecto de investigación estudiantil titulado “Análisis de sustentación, resistencia y empuje aerodinámico de una aeronave no tripulada de ala fija pequeña en el túnel de viento de la Universidad de Costa Rica”, inscrito en la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica. La investigación se centró en una aeronave no tripulada de ala fija diseñado en Costa Rica, con el objetivo de comparar resultados teóricos, obtenidos mediante simulaciones por computadora, con datos experimentales medidos en un túnel de viento. Para ello, se fabricó un modelo a escala utilizando impresión 3D y se sometió a pruebas para analizar tres fuerzas clave: sustentación, resistencia aerodinámica y empuje. Esta comparación permitió validar el desempeño de la aeronave antes de construirla a escala real. Además, se evaluaron distintas configuraciones de hélice, y se encontró que las de tres palas ofrecieron mejor rendimiento. El estudio marca un avance pionero en la validación experimental de drones en Costa Rica y resalta el valor del uso de túneles de viento para optimizar su diseño y desempeño.

Palabras clave: Dron, aeronave no tripulada, túnel de viento, sustentación, resistencia, empuje, simulación, validación experimental, impresión 3D, diseño aerodinámico.

Abstract

This article presents the results of the student research project titled “Analysis of lift, drag, and thrust of a small, fixed wing unmanned aerial vehicle in the wind tunnel of the University of Costa Rica”, registered with the Vice-Rectorate for Research and Outreach of the Costa Rica Institute of Technology. The research focused on a fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV) designed in Costa Rica, with the objective of comparing theoretical results—obtained through computer simulations—with experimental data measured in a wind tunnel. To achieve this, a scaled model was fabricated using 3D printing and tested

to analyze three key aerodynamic forces: lift, drag, and thrust. This comparison allowed for performance validation of the UAV prior to constructing it at full scale. Additionally, various propeller configurations were evaluated, and it was found that three-blade propellers delivered better performance. The study represents a pioneering step in the experimental validation of drones in Costa Rica and highlights the value of wind tunnel testing to optimize their design and performance.

Keywords: Drone, unmanned aerial vehicle, wind tunnel, lift, drag, thrust, simulation, experimental validation, 3D printing, aerodynamic design.

Introducción

Históricamente, Costa Rica ha dependido de la importación de tecnología aeronáutica. No obstante, el impulso de certificaciones como AS9100 ha permitido que empresas nacionales se integren en la manufactura global de componentes aeroespaciales [1]. Paralelamente, avances en diseño digital, impresión 3D y laboratorios de simulación han fortalecido un ecosistema tecnológico que combina capacidades en software embebido, IoT y manufactura aditiva [2] [3]. Hoy, investigadores tienen nuevas herramientas para crear y probar sus propios prototipos, tal como se muestra en este proyecto.

Un equipo de investigadores del Instituto Tecnológico de Costa Rica comparó simulaciones por computadora con pruebas reales en un túnel de viento (Figura 1. Proceso de toma de datos para validación experimental, llevado a cabo por los investigadores, en el túnel de viento de las instalaciones de la Universidad de Costa Rica.

Fuente: Laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica.). La aeronave no tripulada de ala fija, previamente diseñada por Leonardo Capponi como parte de su proyecto de graduación [4], fue el centro del estudio de este trabajo, enfocado en tres fuerzas clave del vuelo: sustentación, resistencia aerodinámica y empuje.

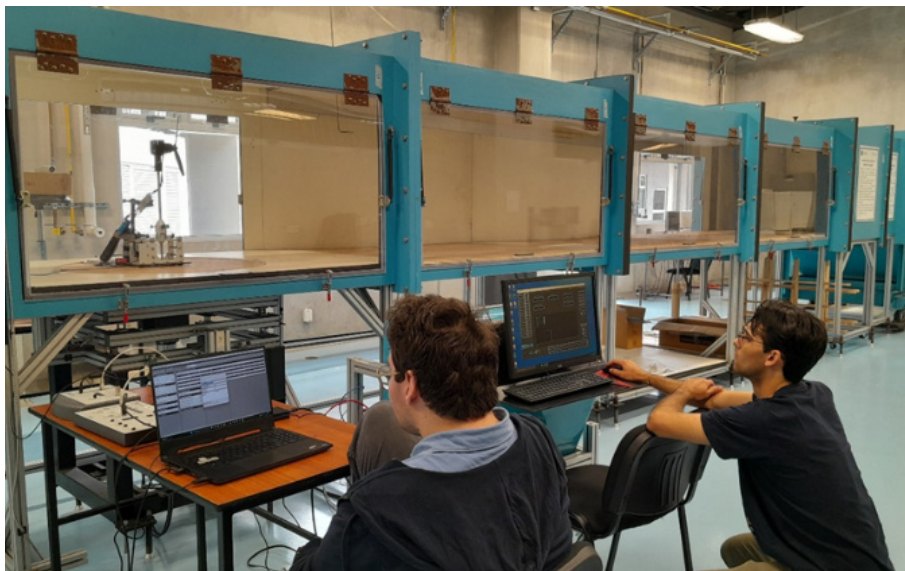


Figura 1. Proceso de toma de datos para validación experimental, llevado a cabo por los investigadores, en el túnel de viento de las instalaciones de la Universidad de Costa Rica.

Fuente: Laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica.

Este proyecto es una de las primeras iniciativas formales en el país que, valida el diseño teórico de una aeronave (Fig.2) mediante análisis en túnel de viento, marcando un paso importante hacia el desarrollo de talento local en ingeniería aeroespacial.



Figura 2. Configuración de estudio de la aeronave.

Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo de la aeronave

La sustentación, la resistencia y el empuje son tres fuerzas fundamentales que determinan si una aeronave puede volar de forma eficiente [5]. En esta investigación, se propuso comprender cómo actúan estas fuerzas en una aeronave no tripulada de ala fija diseñada localmente (Figs 3 y 4). y evaluar si los cálculos obtenidos por simulación computacional coincidían con los datos reales medidos en laboratorio. [6]

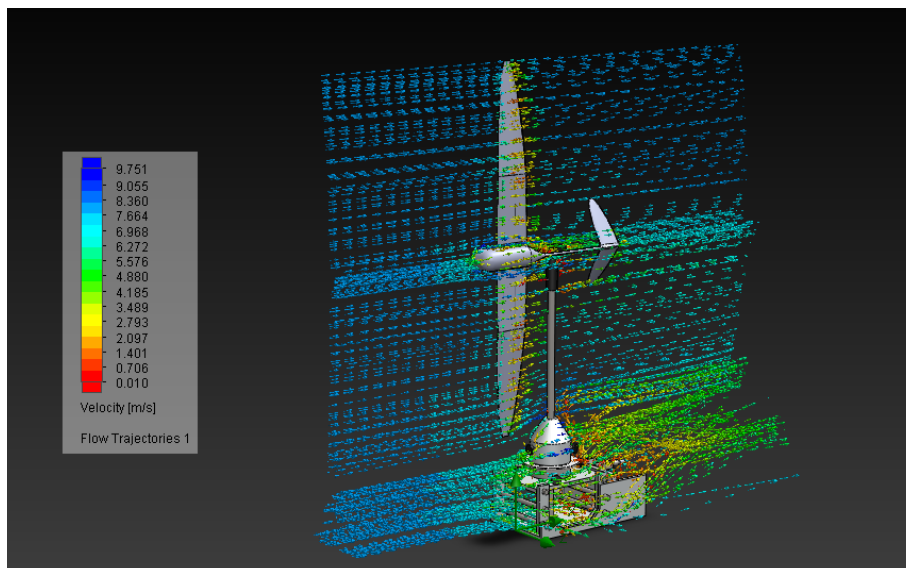


Figura 3. Visualización de velocidad del flujo.

Fuente: Elaboración propia por medio de SolidWorks Flow Simulation.

Para ello, se emplearon dos programas especializados de simulación aerodinámica: SolidWorks Flow Simulation y Flow5. Estos softwares permiten observar cómo se comporta el aire al moverse alrededor del avión, estimando así las fuerzas generadas sobre sus alas, estabilizadores y fuselaje, bajo diferentes condiciones de vuelo [7], [8].

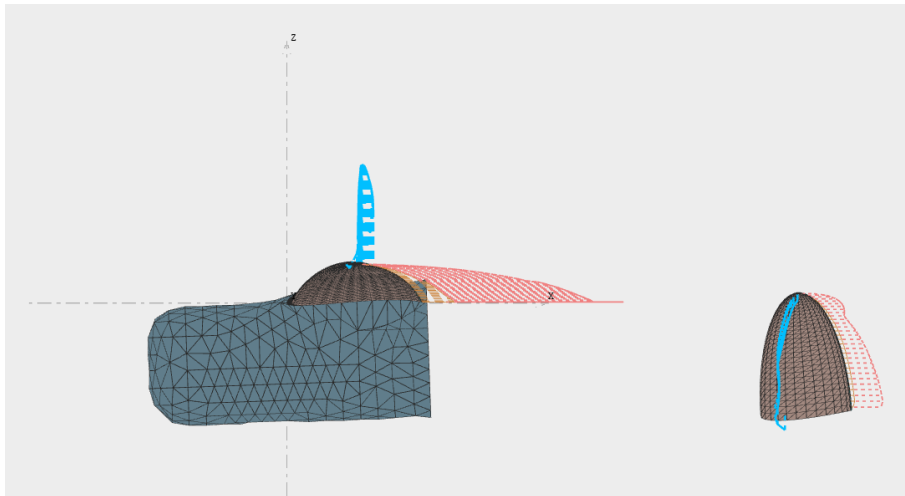


Figura 4. Visualización de fuerzas de sustentación y resistencia.

Fuente: Elaboración propia por medio de Flow5.

Estas simulaciones se realizaron en condiciones controladas, variando el ángulo de ataque y la velocidad, con el objetivo de predecir el comportamiento del modelo en vuelo. La simulación fue clave para optimizar el diseño antes de fabricar el modelo físico. En particular, se utilizaron modelos de flujo estacionario, comparando fuerzas netas de sustentación (Fig. 4) y resistencia con datos teóricos [9].

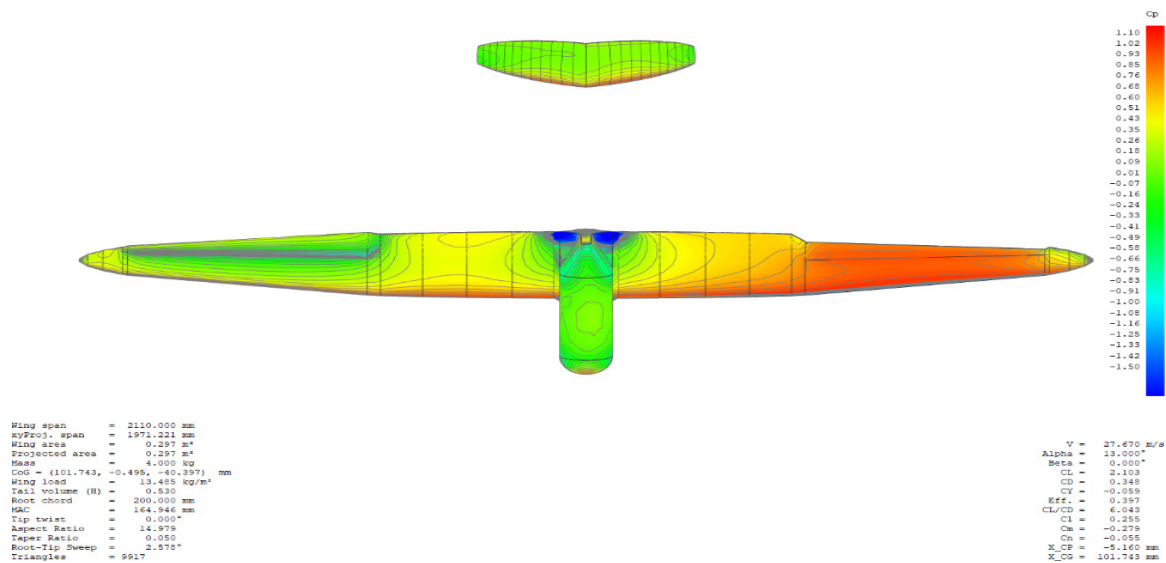


Figura 5. Visualización de resultantes de fuerzas sobre la superficie de la aeronave.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los resultados teóricos, se construyó un modelo físico a escala 1:3 utilizando impresión 3D, permitiendo replicar el diseño con precisión (Fig. 6). Las piezas fueron impresas por secciones, ensambladas y reforzadas para resistir las pruebas experimentales. Esta metodología es respaldada por estudios recientes que demuestran la viabilidad de usar modelos impresos en pruebas aerodinámicas [10].

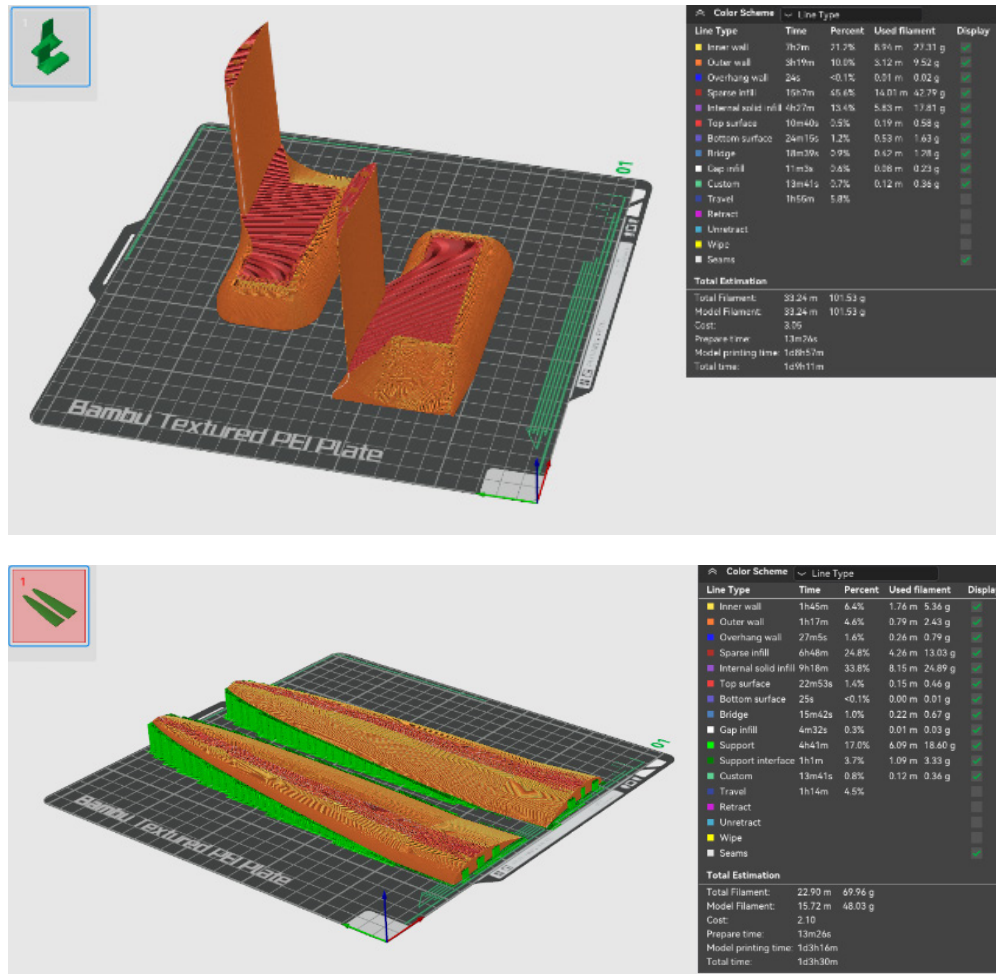


Figura 6. Preparación para impresión 3D de las piezas del modelo a escala

Fuente: Elaboración propia

La fase de ensamblaje se realizó con lijado, masilla y pintura aplicados previamente, para minimizar imperfecciones que pudieran afectar la aerodinámica. También se instalaron puntos de fijación para su montaje en el túnel de viento (Fig. 7).

Listo el modelo, se llevó al túnel de viento de la Universidad de Costa Rica, donde se realizaron las pruebas experimentales (Figs. 8 y 9). Este túnel permitió recrear condiciones reales de vuelo sin tener que elevar físicamente la aeronave. La infraestructura fue desarrollada para uso académico y tiene registros anteriores de pruebas similares, elaboradas por el Laboratorio de Investigación en Energía Eólica (LIENE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica el cual es dirigido por el investigador Dr. Gustavo Richmond Navarro. [11] [12]



Figura 7. Modelo físico de la aeronave a escala.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 8. Montaje del modelo dentro del túnel de viento en el Laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica.



Figura 9. Ajuste de la balanza durante el experimento

Durante las pruebas se modificaron variables como la velocidad del flujo y el ángulo de ataque, obteniendo así curvas experimentales de sustentación y resistencia. Estos datos fueron luego comparados con los obtenidos por simulación, verificando si el comportamiento real seguía las predicciones (Fig. 10).

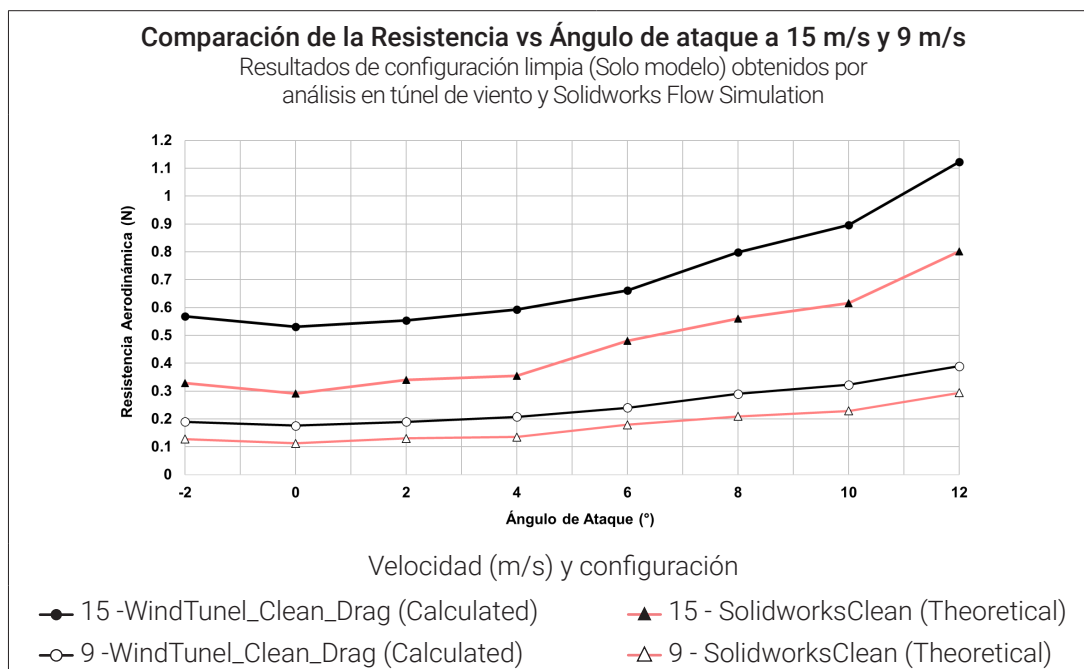


Figura 10. Comparación de resistencia vs ángulo de ataque a 15m/s y 9m/s de los resultados de configuración limpia obtenidos por análisis en túnel de viento y SolidWorks Flow Simulation.

Fuente: Elaboración propia.

Para cuantificar la similitud entre los datos teóricos y experimentales, se utilizó la diferencia relativa simétrica (RPD), una fórmula estadística recomendada en validaciones técnicas por su neutralidad. Este método evidenció una buena concordancia en la mayoría de los casos, confirmando que las simulaciones fueron confiables para predecir el comportamiento real del modelo (Fig.11) (Cuadro 1).

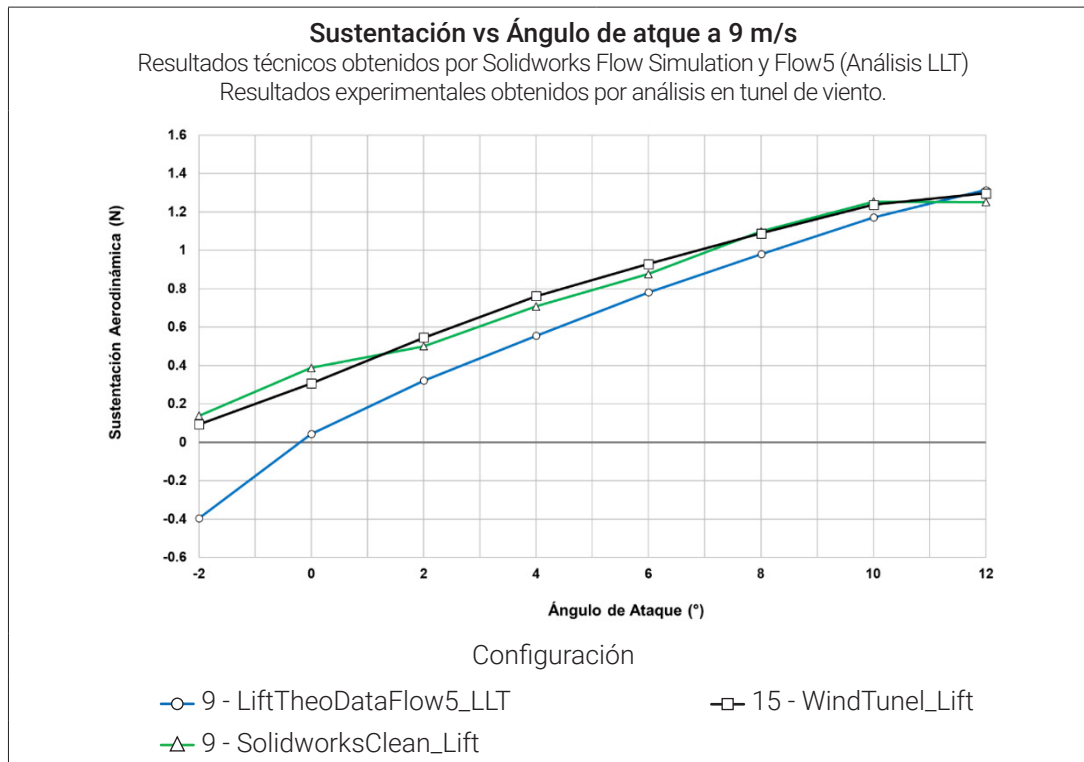


Figura 11. Comparación de Sustentación vs Ángulo de ataque a 9 m/s de resultados teóricos y experimentales.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 1. Resumen de diferencias relativas promedio para las comparaciones de sustentación vs ángulo de ataque a diferentes velocidades.

Velocidad	Método Comparado	Diferencia Relativa Promedio	Observaciones
9 m/s	SolidWorks Flow Simulation	11%	Buena concordancia con datos experimentales.
	Flow5 (LLT)	21%	Mayor diferencia relativa, especialmente a -2° y 0° de ángulo de ataque.
15 m/s	SolidWorks Flow Simulation	11%	Tendencia muy similar a la experimental.
	Flow5 (LLT)	21%	Diferencia relativa disminuye conforme aumenta el ángulo de ataque.

Fuente: Elaboración propia.

Además del análisis de sustentación, se realizaron ensayos al sistema moto propulsor, midiendo el empuje generado por el motor eléctrico utilizando hélices tres palas (Fig. 12). Comparando los resultados experimentales con teóricos conocidos de hélices de dos palas.

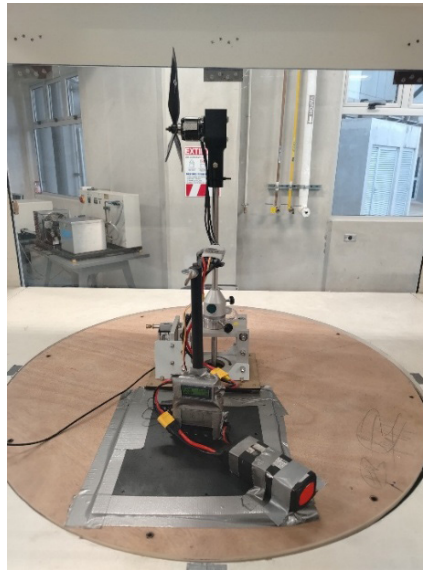


Figura 12. Montaje Balanza-Motor-Hélice para pruebas de empuje dentro del túnel.

Fuente: Laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica.

Para la aplicación y configuración propuesta, las hélices de tres palas superaron las expectativas en empuje dinámico [13]. En la comparación de empuje para diferentes propelas (fig.13) se observa cómo la propela se aproxima más al empuje requerido, para las velocidades más altas del viento, en comparación con las demás. La toma de datos se hizo por medio de dos investigadores, con la configuración mostrada (fig.14), de forma que se pudiera proceder con el cambio de propelas, cambio de velocidad en el túnel y toma de datos para la obtención de la información deseada

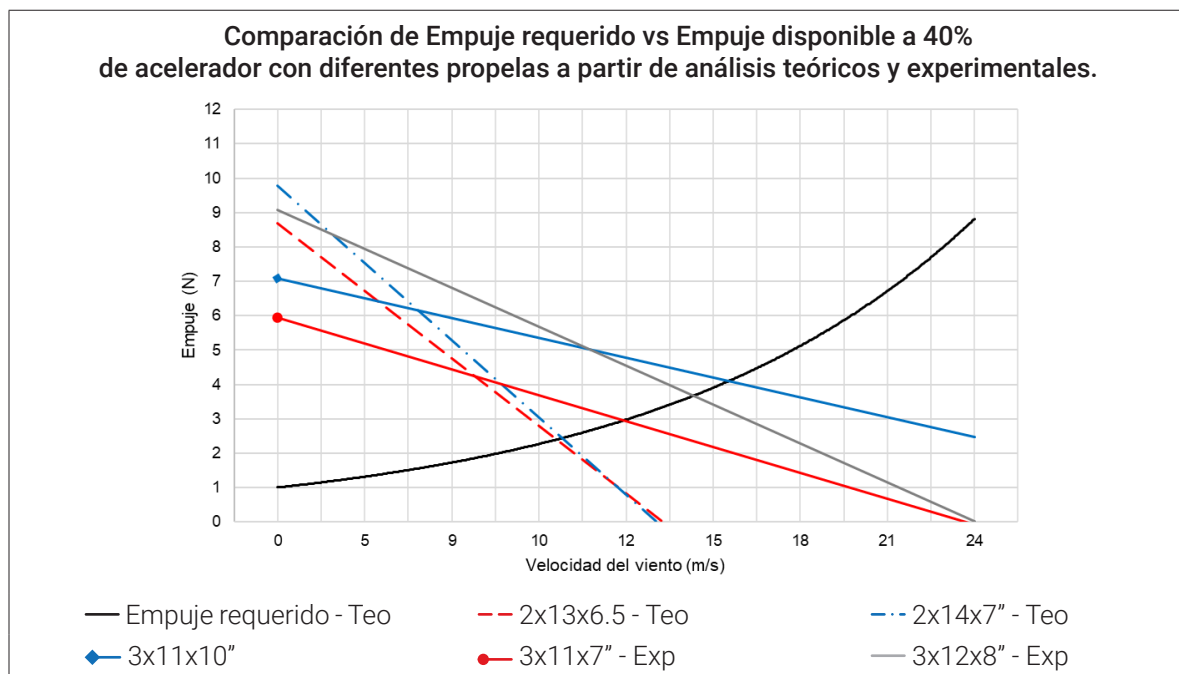


Figura 13. Comparación de empuje requerido vs empuje disponible a 40% de acelerador con diferentes propelas a partir de análisis teóricos y experimentales.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 14. Toma de datos de empuje en el túnel de viento.

Fuente: Laboratorio de Transferencia de Calor de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica.

Durante el proceso surgieron varios retos. La balanza original del túnel presentó discrepancias, por lo que se requirió adaptar una solución alternativa con apoyo del Laboratorio de Energía del TEC. Sin duda, este tipo de experiencias demuestra cómo la colaboración entre instituciones y departamentos fortalece la investigación aplicada.

Además de los resultados técnicos, el proyecto dejó como legado una metodología experimental para validar diseños aeronáuticos en el país. También permitió el desarrollo de habilidades prácticas en diseño, manufactura, simulación, análisis de datos y resolución de problemas técnicos.

Este estudio marca un paso importante en el desarrollo de capacidades nacionales para la ingeniería aeronáutica. Más allá de evaluar un modelo específico, el proyecto demostró que es posible realizar investigación experimental aeroespacial desde entornos universitarios, combinando talento local, infraestructura local y pasión por la ciencia.

Conclusión

La investigación demostró que las simulaciones computacionales pueden predecir con bastante precisión el comportamiento real de una aeronave de ala fija, siempre que se validen con pruebas físicas. Además, mostró que el túnel de viento es una herramienta valiosa para el desarrollo aeronáutico en el país.

El uso de herramientas accesibles como la impresión 3D y software especializado, permite que los ingenieros realicen investigaciones de alto nivel con recursos limitados. Este enfoque promueve una formación práctica y robusta en ingeniería aplicada.

A futuro, se espera que esta metodología sea replicada por otros proyectos, extendiendo su uso a diferentes tipos de aeronaves y condiciones operativas. Así se fortalece la capacidad local para diseñar, evaluar y optimizar aeronaves desde sus primeras etapas.

Este proyecto representa un avance para Costa Rica en materia de ingeniería aeroespacial, al ser uno de los primeros estudios experimentales de este tipo realizados en el país. Además, contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7, 9 y 13 [14], al promover tecnologías limpias con propulsión 100% eléctrica.

Agradecimientos especiales

Los autores desean expresar su especial agradecimiento a los profesores asesores que hicieron posible esta investigación:

Dr. Gustavo Richmond Navarro

Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica

<https://orcid.org/0000-0001-5147-5952>

Profesor e investigador en el área de energía eólica, integrante de la iniciativa LIENE. Obtuvo en 2014 el título de Máster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica en la Universidad de Chile. Sus intereses se centran en la simulación numérica y las energías renovables. Ha presentado ponencias en congresos de ingeniería en Costa Rica, Chile y Emiratos Árabes Unidos, y ha publicado en revistas científicas, entre ellas *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. Actualmente cursa estudios de doctorado en ingeniería.

M.Sc. Víctor Julio Hernández González

Escuela de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica

<https://orcid.org/0009-0006-2841-7360>

Profesor e investigador del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Es Ingeniero Mecánico Aeronáutico, egresado del Instituto de Kiev de los Ingenieros de Aviación Civil (KIIGA), y cuenta con una maestría en ingeniería con especialidad en Explotación Técnica de Aviones y Motores. Es fundador y coordinador del Programa AeronauTEC, vicepresidente del Comité Técnico Nacional Aeroespacial, miembro de la Comisión Paritaria Aeroespacial del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica, y miembro de la Junta Directiva del *Costa Rica Aerospace Cluster*.

Referencias

- [1] Tecnológico de Costa Rica, «Sector aeroespacial espera crecer y consolidarse como pilar del desarrollo del país,» 19 Setiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.tec.ac.cr/sector-aeroespacial-espera-crecer-consolidarse-pilar-desarrollo-pais?utm.com>.
- [2] Costa Rica Aerospace Cluster, «Why Costa Rica? Stability, innovation and a proven international competitiveness provide the right climate for success,» 2025. [En línea]. Available: <https://costaricaaerospace.com/costa-rica/?utm.com>.
- [3] CINDE, «Tecnología Exponencial,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.cinde.org/es/tecnologias/impresion-3d?utm.com>.
- [4] L. D. Capponi Pinto, Diseño de una aeronave no tripulada de ala fija para vigilancia, Cartago: documento interno, 2023.
- [5] Science Learning Hub Pokapū Akoranga Pūtaiao, 13 Setiembre 2011. [En línea]. Available: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/299-principles-of-flight>.
- [6] P. a. G. T. Fahlstrom, Introduction to UAV Systems, Wiley, 2012.
- [7] Dassault Systems, «Conceptos básicos del análisis,» 2021. [En línea]. Available: <https://pdf.sciencedirectassets.com/308315/1-s2.0-S2352146520X0010X/1-s2.0-S2352146520308668/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEDUaCXVzLWVhc3QtMSJGMEQCIDD1o%2FM4R1QxYQqdoMFpSzlxUWiKaCDev7ydVScRV2fIAiB52woOBJOy7CIsIwPnoITjPIqURtd5Os%2Bulv%2ByFN>.
- [8] A. Deperrois, «Triangle-based Galerkin panel methods,» Flow5, 2019.
- [9] C. De Castro, Dinámica básica de aviones para ingenieros - Con un ejemplo de diseño conceptual, 2014.

- [10] K. Szwedziak, T. Łusiak, R. Bąbel, P. Winiarski, S. Podsędek, P. Doležal y G. Niedbała, «Wind Tunnel Experiments on an Aircraft Model Fabricated Using a 3D Printing Technique,» *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 6, n° 12, p. 21, 2022.
- [11] J. G. Monge Gapper, «Dimensionado y construcción de un túnel de viento de baja velocidad,» *Ingeniería Revista de la Universidad de Costa Rica*, vol. 2, pp. 45 - 54, 2006.
- [12] G. R. Navarro, *Reporte de Laboratorio*, 2020.
- [13] M. Airscrew, «Master Airscrew,» Master Airscrew, [En línea]. Available: <https://www.masterairscrew.com/>. [Último acceso: 02 12 2024].
- [14] United nations, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

Sobre los Autores:

Leonardo David Capponi-Pinto

Coordinador del proyecto, Ingeniero en Mantenimiento Industrial, énfasis profesional en las ciencias aeronáuticas y aeroespaciales. En 2020 fundó la rama de Research and Design del grupo AeronauTEC en el ITCR, impulsando la participación de estudiantes en competencias internacionales de diseño aeronáutico. En 2023 realizó un intercambio académico en la Universidad Técnica de Múnich (TUM), Alemania, donde cursó materias avanzadas en ingeniería aeronáutica. Este artículo representa su segunda investigación formal y su objetivo profesional es continuar desarrollándose en proyectos de innovación e investigación en el ámbito aeroespacial, con énfasis en aerodinámica experimental y validación de prototipos mediante túneles de viento. <https://orcid.org/0009-0009-9481-1499>

Javier López-Solís

Estudiante avanzado de Ingeniería en Mantenimiento Industrial. Desde 2020 ha participado activamente en proyectos académicos vinculados al diseño y análisis de aeronaves no tripuladas. Fue líder del área de estabilidad y control en el equipo AeronauTEC Research and Design. Esta investigación representa su segunda experiencia formal en el área, y tiene como objetivo profesional especializarse en el estudio de baterías de litio y su aplicación en sistemas de propulsión eléctrica para drones y otras aeronaves no tripuladas. <https://orcid.org/0009-0002-5985-7669>

Fabrizio Coto-Vílchez

Estudiante de Ingeniería Física, próximo a graduarse. Ha trabajado como asistente e investigador en el Laboratorio de Plasmas del ITCR, adquiriendo experiencia en caracterización experimental de fenómenos físicos. Su interés se centra en la aplicación de la física y la ingeniería al desarrollo de nuevas tecnologías, especialmente en áreas como la simulación computacional, la dinámica de fluidos y los sistemas de propulsión. Su participación en este proyecto marca su incursión formal en el campo de la ingeniería aeronáutica. <https://orcid.org/0000-0002-8700-6637>