

EXPERIENCIAS EN EL USO DE MÉTODOS NUMÉRICOS Y SIMULACIÓN PARA EL DISEÑO DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO EN INSTANCIAS EDUCATIVAS

EXPERIENCES IN THE USE OF NUMERICAL METHODS AND SIMULATION FOR THE DESIGN OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE IN EDUCATIONAL INSTANCES

Mauro S. Maza^a, Luis M. Soria Castro^{a,b}, Gustavo J. Krause^b y Lucas Monaldi^{a,b}

^a*Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Departamento de Estructuras. Córdoba, Argentina.*

^b*Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Departamento de Ingeniería Aeroespacial. Córdoba, Argentina.*

Palabras clave: Enseñanza en Ingeniería, Ingeniería en Sistemas, Diseño Aeronáutico, UAV.

Resumen. El diseño aeronáutico enfrenta incertidumbres y contradicciones derivadas de restricciones técnicas y no técnicas. Su proceso requiere una integración iterativa de análisis, evaluación y síntesis, con numerosas instancias de decisión sobre componentes como alas, fuselaje o sistemas. Esta organización suele seguir metodologías de ingeniería de sistemas y normas de calidad como AS9100 y NADCAP. Este trabajo aplica dicha metodología al diseño de una aeronave no tripulada para el despacho de cargas pequeñas y frágiles, dentro de un ámbito universitario. Abarca las etapas de diseño conceptual, preliminar y detallado, detallando la planificación, estructura de trabajo, herramientas empleadas y soluciones a los problemas de ingeniería encontrados durante el proyecto.

Keywords: Engineering Education, Systems Engineering, Aeronautical Design, UAV.

Abstract. Aeronautical design faces uncertainties and contradictions stemming from technical and non-technical constraints. Its process requires an iterative integration of analysis, evaluation, and synthesis, involving numerous decision points regarding components such as wings, fuselage, and systems. This organization typically follows systems engineering methodologies and quality standards such as AS9100 and NADCAP. This work applies this methodology to the design of an unmanned aerial vehicle for the delivery of small and fragile cargo, within an academic setting. It encompasses the conceptual, preliminary, and detailed design stages, detailing the planning, work structure, tools employed, and solutions to the engineering problems encountered during the project.

1. INTRODUCCIÓN

La formación de ingenieros aeronáuticos capaces de insertarse efectivamente en la industria representa un desafío constante para las universidades. Tradicionalmente, la educación en ingeniería se ha estructurado en torno a un sólido conocimiento de las matemáticas, las ciencias básicas y las ciencias de la ingeniería. Si bien esta base es fundamental, en muchas ocasiones deja un espacio limitado para abordar la complejidad integral del diseño y para desarrollar la creatividad y las competencias necesarias para resolver problemas del mundo real ([Gundlach, 2014](#); [Sadraey, 2024](#)).

El diseño aeronáutico se caracteriza por inherentes incertidumbres, ambigüedades y contradicciones, que emergen no solo de restricciones técnicas, sino también económicas, normativas y organizativas. A diferencia de la resolución de un problema matemático, rara vez existe una única respuesta correcta. Por ello, el proceso de diseño requiere un enfoque iterativo y sistemático que integre de forma recurrente el análisis, la evaluación y la síntesis de conceptos. La metodología de la Ingeniería de Sistemas (IS) se erige como el marco idóneo para organizar este complejo proceso, asegurando el cumplimiento de normativas de calidad estrictas, como la AS9100 ([AS9100D, 2020](#)), que son estándares en la industria.

Si bien la aplicación de la IS está bien documentada para aeronaves tripuladas ([Sadraey, 2020, 2024](#)), existe una notable escasez de material didáctico y casos de estudio sobre su aplicación en el diseño de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs). Esta brecha es particularmente relevante en el ámbito universitario, donde los estudiantes se benefician enormemente de experiencias prácticas que simulen los desafíos y flujos de trabajo de la industria ([Barrera Arcaya et al., 2022](#)). El presente trabajo describe una iniciativa educativa desarrollada en la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina), cuyo objetivo principal fue mejorar las competencias de los estudiantes en diseño aeronáutico mediante la aplicación práctica de la Ingeniería de Sistemas bajo el enfoque de Aprendizaje Basado en Proyectos (ABP) ([Lerzo et al., 2022](#)).

El proyecto se centró en el diseño de un VANT para transporte de carga ligera y frágil, concebido específicamente como un marco para generar una serie de Trabajos Finales de Grado (TFG) para estudiantes de carreras de Ingeniería Aeronáutica o Mecánica, en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Esta estructura permitió a los estudiantes involucrarse en un proyecto de envergadura, superando la naturaleza aislada y a veces abstracta de los proyectos académicos tradicionales. El requerimiento técnico inicial sirvió no solo como objetivo técnico, sino también como el contexto perfecto para integrar el uso de herramientas de simulación numérica, como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) y el Método de Elementos Finitos (FEM por sus siglas en inglés), de manera significativa y con un propósito definido.

Esta experiencia buscó fomentar en los estudiantes no solo habilidades técnicas profundas, sino también competencias transversales cruciales como el trabajo en equipo, la proactividad y la capacidad de adaptarse a un plan de trabajo predefinido, habilidades esenciales para el ingeniero moderno ([CONFEDI, 2018](#)). En las siguientes secciones se detalla la metodología basada en IS que guio el proyecto, la planificación educativa, los resultados alcanzados en las etapas conceptual y preliminar del diseño, y una discusión sobre los impactos formativos observados y los desafíos inherentes a implementar este tipo de iniciativas en el contexto universitario.

Se pretende a su vez que este proyecto sea un vehículo efectivo para el desarrollo integral de competencias específicas del perfil de Ingeniero Aeronáutico o Aeroespacial, tal como se establece en los estándares de acreditación de [CONFEDI \(2018\)](#). A lo largo del diseño del VANT, los estudiantes no solo ejercitaron habilidades técnicas directamente vinculadas con actividades

reservadas de la profesión, como el establecimiento de parámetros de diseño (Competencia 1.1), la aplicación de tecnologías básicas y aplicadas (aerodinámica, estructuras, propulsión, sistemas de control), y el uso de herramientas de simulación numérica (CFD, FEM), sino que también fortalecieron competencias transversales y blandas esenciales para el ejercicio profesional moderno ([Treviño Villalobos, 2023](#)). Entre estas se destacan el trabajo en equipo multidisciplinario, la comunicación efectiva, la gestión de incertidumbres, la proactividad y la capacidad de adaptación a planificaciones predefinidas. Esta experiencia práctica, articulada mediante metodologías de ingeniería de sistemas y aprendizaje basado en proyectos, no solo enriqueció su formación técnica, sino que también consolidó su capacidad para diseñar, calcular y proyectar aeronaves en un contexto realista, cerrando así la brecha entre la formación académica y las demandas integrales de la industria aeronáutica. De esta manera, el proyecto abarca tanto el *saber* técnico como el *saber hacer* y el *saber ser*, alineándose con una visión contemporánea de la formación en ingeniería.

2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO

El desarrollo de este proyecto se abordó desde una doble perspectiva: técnica y educativa. El núcleo de la metodología consistió en la aplicación de los principios de la Ingeniería de Sistemas (IS) para gestionar la complejidad del diseño del VANT, al mismo tiempo que se utilizó el ABP [Prince y Felder \(2004\)](#) como marco pedagógico para estructurar la experiencia de aprendizaje de los estudiantes. El requerimiento técnico inicial consistió en diseñar un VANT autónomo para transportar 0.5 kg a 15 km con materiales locales y económicos. Este enfoque buscó simular un entorno profesional, donde los alumnos asumieron roles específicos y fueron responsables de entregables concretos, fomentando así su autonomía y capacidad de trabajo en equipo [Kolb \(1984\)](#).

2.1. Aspectos Generales y Enfoque Educativo

El proyecto se estructuró como una secuencia de al menos 6 o 7 TFG interconectados, cada uno contribuyendo a una etapa específica del ciclo de diseño. Esta estructura permitió a los estudiantes involucrarse en un problema de ingeniería complejo y de larga duración, superando la fragmentación típica de las asignaturas tradicionales. El rol de los docentes durante estas etapas fue de guías y supervisores, facilitando el acceso a recursos y metodologías, pero promoviendo que los estudiantes tomaran la iniciativa en la resolución de problemas y en la búsqueda de soluciones.

La naturaleza multidisciplinaria del equipo docente, con especialistas en estructuras, aerodinámica, mecánica de vuelo y sistemas, fue una ventaja clave. Por un lado, permitió cubrir todas las aristas técnicas del proyecto. Por otro, modeló para los estudiantes la dinámica de un equipo de desarrollo industrial, donde la integración de conocimientos diversos es esencial para el éxito.

2.2. Planificación Global Basada en Ingeniería de Sistemas

El proceso de diseño se organizó en etapas bien definidas, con hitos de revisión que marcaban el inicio y fin de cada fase, tal como se establece en la práctica estándar de la IS [Sadraey \(2020\)](#), como se presenta en la Fig. 1. Estos hitos, las diferentes reuniones de diseño o *reviews*, sirvieron como puntos de control de calidad y como oportunidades formales de retroalimentación para los estudiantes, replicando las revisiones de diseño comunes en la industria.

Debido a restricciones presupuestarias inherentes al ámbito universitario, el alcance del pro-

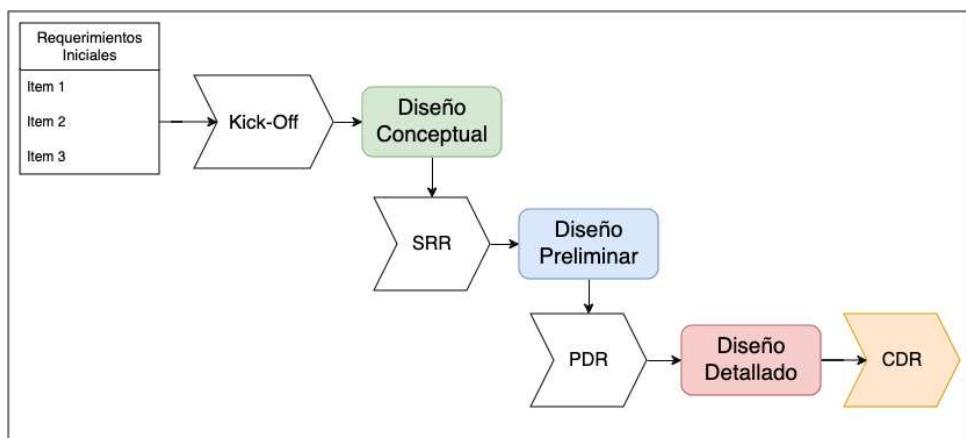


Figura 1: Esquema simplificado de las etapas de diseño basadas en Ingeniería de Sistemas.

yecto se limitó a las primeras dos etapas del ciclo de vida: **Diseño Conceptual** y **Diseño Preliminar**. Estas etapas son intensivas en análisis y simulación, pudiendo realizarse con recursos computacionales disponibles en la universidad, lo que las hace ideales para un contexto académico. En la Fig. 2 se presenta un esquema del plan trazado para estas dos primeras etapas.

Cronograma

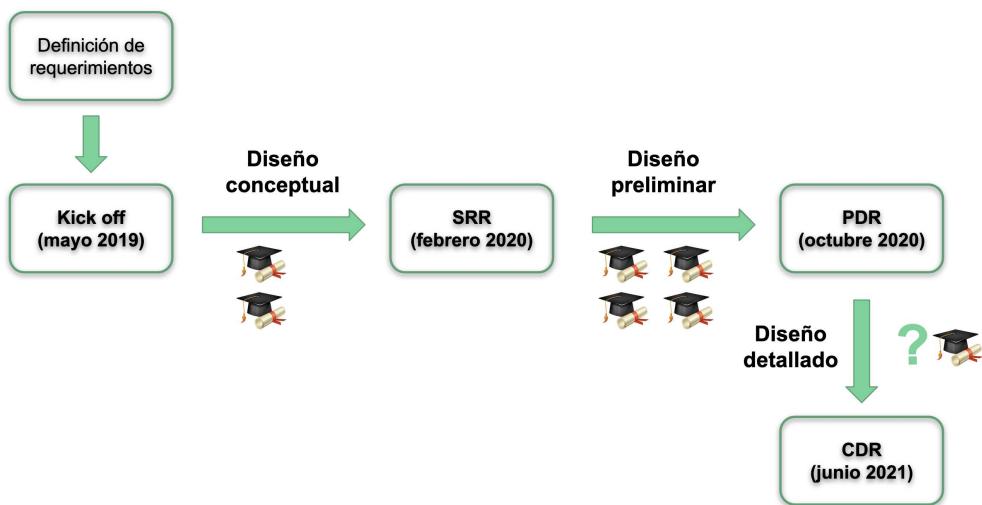


Figura 2: Plan detallado de las etapas de Diseño Conceptual y Preliminar.

La ejecución de estas etapas se llevó a cabo mediante la realización de una serie de TFG secuenciales y superpuestos. Para la etapa de Diseño Conceptual se planificaron dos TFG, mientras que para la etapa de Diseño Preliminar se planificaron cuatro. Esta distribución reflejaba la creciente complejidad y el mayor volumen de trabajo requerido a medida que el diseño avanzaba y se necesitaba un mayor nivel de detalle.

Un desafío fue la continuación del trabajo durante la etapa de confinamiento producto de la pandemia de COVID-19. El trabajo continuó de manera remota con reuniones periódicas, similar a lo que ocurría durante la presencialidad, entre los tesistas y los docentes encargados. El efecto de la pandemia no fue tan nocivo en el desarrollo del trabajo, dado que el mismo tenía casi un año de comenzado.

2.3. Implementación del Flujo de Trabajo y Roles Estudiantiles

Para simular un entorno realista¹, la primera actividad (sin participación estudiantil) consistió en la definición de los requerimientos del sistema, actuando los docentes como el cliente. Estos requerimientos se presentaron a los primeros dos estudiantes en una reunión de *Kick-off* (o lanzamiento), que marcó el inicio oficial de sus TFG y de la etapa de Diseño Conceptual.

El trabajo de estos estudiantes culminó con la *Revisión de Requerimientos del Sistema (SRR)*, un hito en el que se evaluó la adecuación de sus propuestas conceptuales a los requerimientos iniciales. En esta revisión participaron también los siguientes cuatro estudiantes, quienes se incorporaron al proyecto para iniciar la etapa de Diseño Preliminar. La finalización de su trabajo estaría marcada por la *Revisión Preliminar de Diseño (PDR)*.

Este flujo de trabajo, con hitos claros y una incorporación escalonada de estudiantes, permitió gestionar eficientemente un grupo numeroso, fomentar la transferencia de conocimiento entre pares (donde los estudiantes de etapas más avanzadas guiaban a los nuevos) y asegurar la continuidad del proyecto a pesar de la naturaleza semestral de los TFG. La bibliografía técnica fundamental para guiar el proceso de diseño fue la dedicada específicamente al diseño de UAVs [Gundlach \(2014\)](#).

3. RESULTADOS

El principal resultado de este proyecto trasciende los entregables técnicos y se materializa en la experiencia educativa integral que vivieron los estudiantes. El proceso, estructurado en torno a hitos de la Ingeniería de Sistemas, demostró ser un marco efectivo para organizar el aprendizaje y desarrollar competencias tanto técnicas como transversales. A continuación, se detallan los resultados obtenidos en cada etapa, haciendo énfasis en el progreso del diseño y, fundamentalmente, en el desarrollo de las capacidades de los estudiantes.

3.1. Compromiso Estudiantil y Adquisición del Aprendizaje

La primera actividad orientada a los estudiantes –una charla informativa para presentar el proyecto– resultó en una concurrencia numerosa y un alto nivel de interés. Esto validó la hipótesis inicial sobre la necesidad y el apetito existente entre el alumnado por participar en proyectos integradores de mayor envergadura y relevancia práctica. La posterior selección de los estudiantes se basó en su motivación y afinidad con las áreas del proyecto, priorizando el compromiso sobre el desempeño académico previo.

El compromiso observado en los estudiantes seleccionados fue excepcional. Demostraron un alto grado de profesionalismo, proactividad y capacidad para trabajar de manera colaborativa, frecuentemente extendiéndose más allá de los requisitos mínimos de sus TFG. Esta actitud fue un indicador claro del éxito del enfoque de ABP para generar motivación intrínseca y un sentido de propiedad sobre el proyecto [Prince y Felder \(2004\)](#).

3.2. Resultados de la Etapa de Diseño Conceptual

En esta etapa, dos estudiantes trabajaron de forma colaborativa bajo la dirección de especialistas en Mecánica del Vuelo. Siguiendo la metodología de IS, el primer hito fue la reunión de *Kick-off*, donde se les presentaron los requerimientos del *cliente*. Su tarea fue generar y evaluar conceptos iniciales.

¹Un entorno realista es un ámbito que replica las problemáticas y desafíos inherentes a un contexto de trabajo profesional.

Los estudiantes propusieron cuatro configuraciones iniciales, que luego de las primeras iteraciones técnicas, decantaron en solo dos configuraciones radicalmente diferentes, demostrando creatividad y comprensión de los trade-offs inherentes al diseño:

1. **Configuración Convencional:** Ala alta, cola en T, hélice tractora y tren de aterrizaje triciclo (Imagen izquierda de la Fig. 3)
2. **Configuración No Convencional:** Ala volante (*flying wing*) con hélice impulsora y sin tren de aterrizaje (Imagen derecha de la Fig. 3).

Utilizando herramientas de análisis inicial (cálculos empíricos, diagramas de diseño Gundlach (2014) y métodos de vorticidad concentrada), realizaron una primera estimación de los parámetros principales (peso, velocidad de crucero, autonomía) y una selección inicial de perfiles aerodinámicos.

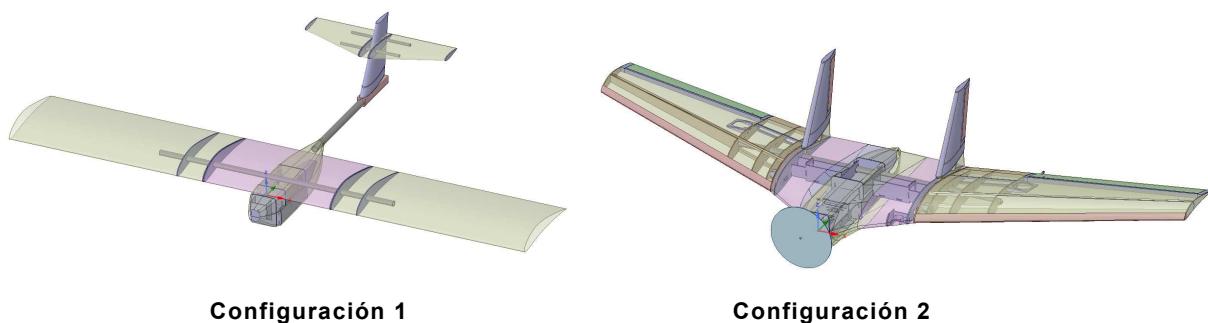


Figura 3: Diseño Conceptual: Configuración convencional de ala alta y cola en T.

Un resultado educativo significativo fue que, de manera autónoma, los estudiantes comenzaron a abordar problemas de integración de sistemas –una tarea planificada para la etapa siguiente–, como la ubicación preliminar de baterías, antenas, motor y el compartimento de carga útil. Estos problemas en general no son tratados en materias anteriores, por lo que los estudiantes se enfrentaron a estos problemas de requerimientos, en un principio de manera individual, proponiendo soluciones ingenierilmente consistentes. También seleccionaron sistemas de despegue y aterrizaje, y diseñaron un mecanismo inicial de liberación de la carga. Esta iniciativa evidenció el desarrollo de un **pensamiento sistémico** y la capacidad de anticipar problemas, competencias clave que el proyecto buscaba fomentar.

La etapa culminó con la *Revisión de Requerimientos del Sistema (SRR)*, donde se eligió la configuración convencional para su desarrollo posterior, por considerar que presentaba un menor riesgo técnico y una ruta de diseño más clara para los siguientes estudiantes.

3.3. Resultados de la Etapa de Diseño Preliminar

Para esta etapa se incorporaron tres nuevos estudiantes (en lugar de los cuatro planificados originalmente), quienes se enfocaron en tres áreas técnicas críticas: aerodinámica, estructuras e integración de sistemas. El intercambio de roles en la dirección de los TFG permitió a los docentes especialistas guiar cada área de manera más efectiva.

Aerodinámica: La estudiante a cargo refinó la selección del perfil alar mediante análisis CFD, definió la envolvente de vuelo y realizó un análisis aerodinámico completo de la aeronave utilizando ANSYS Fluent. Los resultados de presión obtenidos mostrados en la Fig. 4

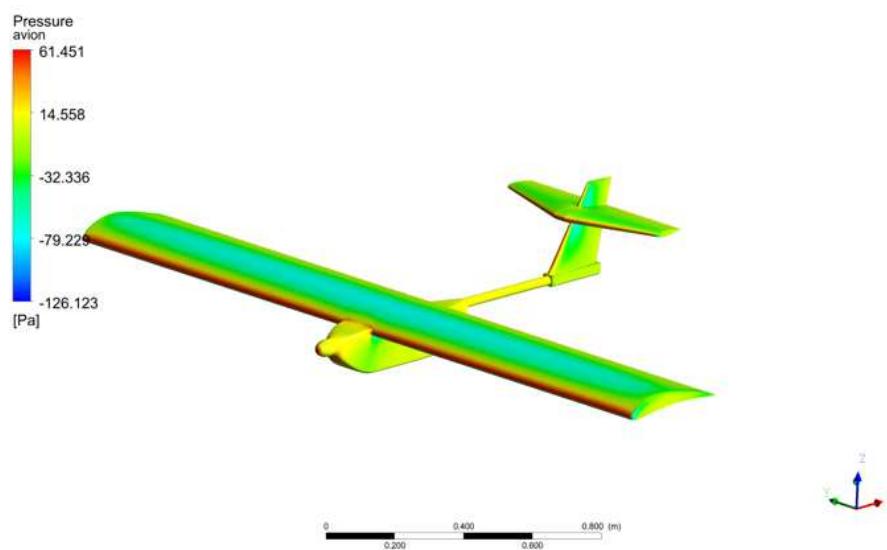


Figura 4: Distribución del coeficiente de presión sobre el modelo completo de la aeronave, obtenido por CFD.

fueron críticos para el dimensionamiento estructural, demostrando la **interdependencia** entre las disciplinas y la importancia de compartir datos en un proyecto de ingeniería.

Estructuras: El estudiante responsable realizó un análisis detallado por Elementos Finitos (FEM) de un semiala utilizando ANSYS Mechanical, utilizando las cargas aerodinámicas y másicas proporcionadas por el área de Aerodinámica. Este flujo de trabajo replicó la práctica industrial y enfatizó la importancia de la **validación cruzada** entre disciplinas.

Integración de Sistemas: El tercer estudiante se encargó de la selección e integración de los sistemas de comando, control, comunicaciones, energía y lanzamiento de la carga. Generó una lista de materiales críticos con largos lead times e inició el bosquejo del manual de mantenimiento. Un desafío educativo importante que enfrentó fue la falta de datos (como por ejemplo el consumo exacto de servomotores), lo que lo obligó a aplicar criterios conservadores y a documentar sus suposiciones, una situación muy común en el desarrollo de productos.

La interacción entre los estudiantes, ya sea presencial o virtual, fue intensa y necesaria. Por ejemplo, el rediseño del mecanismo de liberación de carga y del paracaídas de aterrizaje impactó directamente en la ubicación del centro de gravedad, requiriendo iteraciones con el área de Aerodinámica y Mecánica de Vuelo. Esta **colaboración forzada** fue una de las experiencias de aprendizaje más valiosas, simulando la dinámica de un equipo de desarrollo multidisciplinario.

4. CONCLUSIONES

El proyecto de diseño de un VANT mediante la aplicación de Ingeniería de Sistemas demostró ser una iniciativa exitosa y altamente enriquecedora tanto desde el punto de vista técnico como pedagógico. La implementación de esta metodología, articulada a través de una secuencia de Trabajos Finales de Grado, probó ser un modelo viable y efectivo para la formación integral de ingenieros en un contexto universitario con recursos limitados.

Se corroboró que un enfoque de Aprendizaje Basado en Proyectos, sustentado por el marco de la Ingeniería de Sistemas, es capaz de:

- **Motivar e involucrar profundamente a los estudiantes**, quienes demostraron un nivel de compromiso, proactividad y sentido de pertenencia del proyecto muy superior al observado en proyectos académicos tradicionales.

- **Desarrollar competencias técnicas avanzadas** en el uso de herramientas de simulación (CFD, FEM), en la aplicación de metodologías de diseño sistemático y en la comprensión de los trade-offs inherentes al diseño aeronáutico.
- **Fomentar competencias transversales (“soft skills”) cruciales** (Barrera Arcaya et al., 2022), como el trabajo en equipo multidisciplinario, la comunicación efectiva, la gestión de la incertidumbre y la capacidad para adaptarse a un plan de trabajo predefinido, simulando las condiciones de la industria aeronáutica.
- **Integrar conocimientos de manera efectiva**, permitiendo a los estudiantes conectar y aplicar conceptos teóricos aprendidos de forma aislada en diversas asignaturas para resolver un problema complejo y concreto.

El proyecto también dejó valiosas lecciones sobre su implementación. Se corroboró que la **naturaleza multidisciplinaria del equipo docente** es un pilar fundamental para el éxito, ya que no solo enriqueció el proyecto técnicamente, sino que ilustró para los estudiantes la dinámica de trabajo industrial. Asimismo, se evidenció que los **hitos formales de revisión (SRR, PDR)** son herramientas pedagógicas poderosas, adaptadas a un contexto académico, que proporcionan estructura, fomentan la retroalimentación y preparan a los estudiantes para los procesos de garantía de calidad de la industria.

Un desafío importante identificado fue la **gestión de los tiempos y plazos académicos**, que generalmente no se alinean perfectamente con las iteraciones naturales de un proyecto de diseño. Esto requiere flexibilidad y una planificación cuidadosa que anticipa posibles desfases. Además, la **disponibilidad de datos comerciales precisos** (e.g., especificaciones de componentes) surgió como una fuente de incertidumbre que los estudiantes debieron aprender a manejar con criterios conservadores y documentación exhaustiva, una valiosa lección en sí misma.

En conclusión, este proyecto sirvió como un caso de estudio que valida la utilidad de la Ingeniería de Sistemas no solo como un marco técnico, sino también como una **herramienta pedagógica** robusta para organizar proyectos de diseño complejos en el ámbito educativo. Los beneficios se extienden más allá de los estudiantes, impactando positivamente a los docentes, a través de la actualización profesional y la colaboración interdepartamental, y a la institución, al optimizar el uso de recursos y generar una experiencia educativa de alto valor y relevancia.

Como trabajo futuro, se planea continuar con las etapas de Diseño Detallado y Fabricación, sujeto a la obtención de financiamiento, y se busca institutionalizar esta metodología para aplicarla a otros proyectos de diseño en la facultad, con el objetivo de cerrar la brecha persistente entre la formación académica y las demandas de la industria.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (FCEFyN - UNC) por el apoyo brindado. Así mismo agradecemos a nuestros estudiantes por la confianza depositada y por permitirnos acompañarlos en el camino a lograr su meta de formación y egreso.

REFERENCIAS

AS9100D. Quality management systems - requirements for aviation, space, and defense organizations as9100d. En *SAE International*, página 54. 2020.

- Barrera Arcaya F., Venegas-Muggli J.I., y Ibáñez Plaza L. El efecto del aprendizaje basado en proyectos en el rendimiento académico de los estudiantes. *Revista de estudios y experiencias en educación*, 21(46):277–291, 2022.
- CONFEDI L.R. Propuesta de estándares de segunda generación para la acreditación de carreras de ingeniería en la república argentina. *Aprobado por la Asamblea del Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina, Rosario*, 1, 2018.
- Gundlach J. *Designing unmanned aircraft systems*. American Institute of Aeronautics & Astronautics Reston, VA, USA, 2014.
- Kolb D.A. *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Prentice-Hall, 1984.
- Lerzo P.E., Alcar H.L., Mielnicki D., y Britos L. Aprendizaje basado en proyectos (abp) en materias avanzadas de ingeniería: análisis de su aplicación e impacto en diferentes asignaturas en universidades de la república argentina. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería*, 2022.
- Prince M.J. y Felder R.M. Does active learning work? a review of the research. *Journal of Engineering Education*, 93(3):223–231, 2004.
- Sadraey M.H. Unmanned aerial vehicles design education; techniques and challenges. En *2020 ASEE Virtual Annual Conference Content Access*. 2020.
- Sadraey M.H. *Aircraft design: A systems engineering approach*. John Wiley & Sons, 2024.
- Treviño Villalobos M. Uso del aprendizaje basado en proyectos para la enseñanza de la calidad de software: percepción de estudiantes universitarios. *Revista Educación*, 47(2):640–666, 2023.