



**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

**ICAI**

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**COMPARACIÓN, VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE  
VARIAS HERRAMIENTAS DE DISEÑO Y  
SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS EN EL  
ÁMBITO AERONÁUTICO (CAD-FEM)**

Autor: Sara Nieto Balmori

Director: Juan Sánchez-Guerrero Rubio

Madrid

Julio de 2025



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Comparación, ventajas y desventajas de varias herramientas de diseño y simulación por  
elementos finitos en el ámbito aeronáutico (CAD-FEM)  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido  
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Sara Nieto Balmori                  Fecha: 14/ 07/ 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Juan Sánchez-Guerrero Rubio                  Fecha: 14/ 07/ 2025





**COMILLAS**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

**ICAI**

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**COMPARACIÓN, VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE  
VARIAS HERRAMIENTAS DE DISEÑO Y  
SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS EN EL  
ÁMBITO AERONÁUTICO (CAD-FEM)**

Autor: Sara Nieto Balmori

Director: Juan Sánchez-Guerrero Rubio

Madrid

Julio de 2025



# **COMPARACIÓN, VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE VARIAS HERRAMIENTAS DE DISEÑO Y SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS EN EL ÁMBITO AERONÁUTICO (CAD-FEM)**

**Autor:** Nieto Balmori, Sara.

Director: Sánchez-Guerrero Rubio, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Este proyecto realiza una revisión de las herramientas de diseño y simulación CAD-FEM con mayor presencia en la industria aeronáutica, eligiendo cuatro de ellas (SolidWorks, Solid Edge, CATIA V5 y Ansys) para evaluar sus ventajas y desventajas y establecer sus costes de operación. Los resultados señalan a Solid Edge como la herramienta con mejor relación calidad-precio en diseño CAD, pero se muestra algo más débil en análisis FEM. Se concluye que Solid Edge es la mejor opción si el análisis FEM avanzado no es prioritario, y se recomienda Ansys a empresas de mayor tamaño que puedan asumir su elevado coste.

**Palabras clave:** CAD, FEM, comparación, aeronáutica

### **1. Introducción**

Las herramientas de diseño CAD (*Computer-Aided Design*) son una tecnología fundamental en el ámbito del diseño mecánico que permiten crear y modificar piezas en 2D o 3D, reduciendo el número de errores gracias a su alta precisión. La introducción del diseño CAD, combinado con el análisis FEM (*Finite Element Method*) que simula mediante computación flujos, fuerzas y otras condiciones del mundo real, supone un ahorro muy significativo en el mundo profesional tanto en dinero como seguridad, y evita la innecesaria construcción de prototipos antes de llegar al producto final.

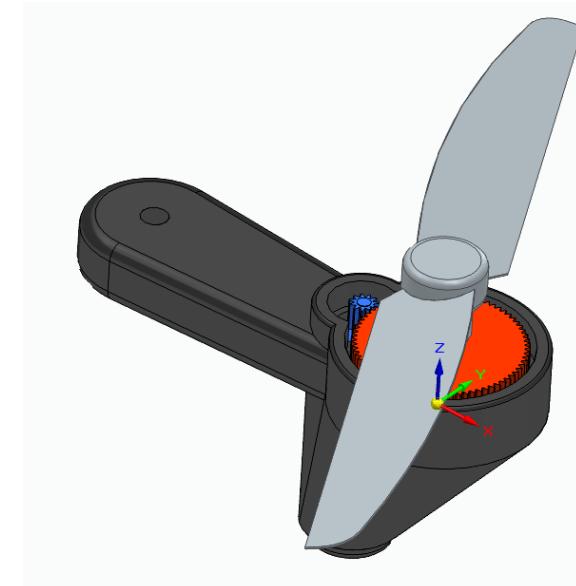
El desarrollo acelerado de esta tecnología durante la segunda mitad del s. XX provoca que hoy en día existan en el mercado un sinfín de herramientas CAD-FEM. Cada herramienta tiene sus fortalezas y debilidades, y su utilización supone alrededor del 80% del tiempo de trabajo en ingeniería mecánica. Por ello, conocerlas en profundidad es vital para optimizar este tiempo y reconocer la más idónea según los objetivos profesionales.

### **2. Definición del proyecto**

El objetivo principal del proyecto es realizar una comparación de las cuatro herramientas elegidas desde dos perspectivas: el diseño CAD y el análisis FEM. Posteriormente, se realiza un estudio económico, donde también se incluye la herramienta Femap, que no se incluye en la comparación inicial por dificultades con el software. El estudio económico determina el coste total anual de operación de cada herramienta, para finalmente realizar una comparativa global basada en todos los aspectos estudiados, destacar las ventajas y desventajas de cada herramienta y exponer las conclusiones finales.

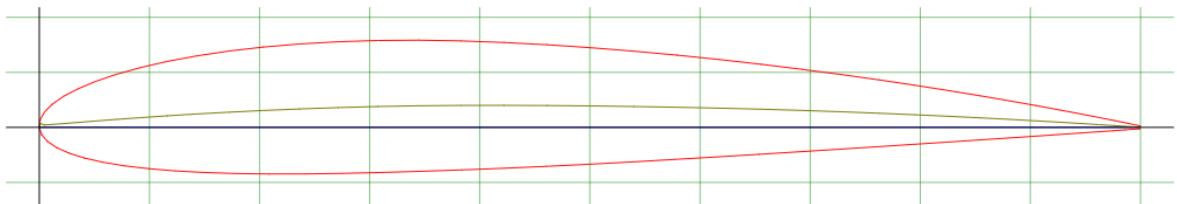
### **3. Descripción del modelo/sistema/herramienta**

La comparación de diseño CAD se realizó entre SolidWorks, Solid Edge y CATIA V5, y para ello se eligió modelar con cada herramienta un conjunto de piezas de la hélice de un dron cuadricóptero, tal y como se muestra en la Ilustración 1. Los datos que se registraron para esta comparación fueron el tiempo de formación inicial, tiempo empleado en completar el modelo, y errores o retrocesos cometidos.



*Ilustración 1: Geometría elegida para la comparación de herramientas de diseño CAD*

La comparación de análisis FEM se realizó entre Solid Edge y Ansys, siendo la primera un entorno integrado en una herramienta de diseño CAD y la última un programa especializado en análisis estructural. Para esta comparación se extruyó un perfil alar NACA 2412, como el que se muestra en la Ilustración 2, se le asignó como material el Aluminio 7075-T6, y se le aplicó como condiciones de contorno un empotramiento en un extremo y una presión uniforme de 5000 Pa sobre la superficie.



*Ilustración 2: Perfil aerodinámico NACA 2412 [1]*

Los datos de cada software que se registraron para esta comparación fueron el tiempo de formación inicial, el tiempo de resolución del análisis FEM, y los valores máximos de desplazamiento y tensión de Von Mises.

#### 4. Resultados

Los resultados de la comparativa de herramientas de diseño CAD son los siguientes:

	SolidWorks	Solid Edge	CATIA V5
<b>Tiempo de formación [h]</b>	22	3,5	5,5
<b>Tiempo empleado [h:min:s]</b>	2:14:51	2:09:57	2:24:24
<b>Errores/retrocesos</b>	29	21	15

Tabla 1: Resultados diseños CAD

Los resultados de la comparación de softwares de análisis FEM se muestran en la siguiente tabla:

	Solid Edge	Ansys
<b>Tiempo de formación [h]</b>	1,5	2,5
<b>Tiempo de resolución [s]</b>	18,71	6,62
<b>Desplazamiento máx. [mm]</b>	4,35E-03	8,07E-03
<b>Tensión máx. Von Mises [MPa]</b>	0,277	0,45485

Tabla 3: Resultados análisis FEM

La siguiente tabla muestra el coste total anual calculado para cada una de las herramientas trabajadas:

Herramienta	Coste de operación [€]	Amortización de la inversión [€]	Coste total anual [€]
<b>SolidWorks</b>	8624	1130	9754
<b>Solid Edge</b>	4701,10	1130	5831,1
<b>CATIA</b>	10300	1130	11430
<b>Ansys</b>	32235,95	1130	33365,95
<b>*Femap</b>	7773,60	1130	8903,60

Tabla 5: Coste total anual para cada herramienta

\*Femap ha sido incluida en el estudio económico, pero no se han podido evaluar exhaustivamente sus capacidades técnicas como software, por lo que se requerirán estudios adicionales.

## 5. Conclusiones

Solid Edge es una herramienta potente especialmente en diseño CAD. Su modelo híbrido que integra diseño CAD y análisis FEM, sumado a su bajo coste total anual, la convierte en la herramienta idónea para empresas de menor tamaño que priorizan los costes reducidos y la rapidez de formación, y no una simulación FEM avanzada. Ansys es la mejor herramienta de simulación FEM en cuanto a precisión y fiabilidad, si bien su alto coste hace que solo sea accesible para empresas de mayor tamaño y asentadas en el sector. Femap, pese a ser menos popular que Ansys, cuenta con un precio muy competitivo que la convierte en una gran opción como herramienta especializada en

análisis FEM. SolidWorks y CATIA V5 resultan útiles para empresas que cuentan con profesionales ya formados y que priorizan una interfaz de diseño robusta.

## 6. Referencias

- [1] «NACA 4 digit airfoil generator (NACA 2412 AIRFOIL)». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>

# **COMPARISON, ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF SEVERAL DESIGN AND FINITE ELEMENT SIMULATION TOOLS IN THE AERONAUTICAL FIELD (CAD-FEM)**

**Author:** Nieto Balmori, Sara.

Supervisor: Sánchez-Guerrero Rubio, Juan.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **ABSTRACT**

This project reviews some of the most widely used CAD-FEM design and simulation tools in the aeronautical industry, selecting four of them (SolidWorks, Solid Edge, CATIA V5 and Ansys) to evaluate their advantages and disadvantages and establish their operating costs. The results indicate that Solid Edge offers the best quality-price ratio, but this system appears weaker in FEM analysis. It is concluded that Solid Edge is the best option if advanced FEM analysis is not a priority, and Ansys is recommended for larger companies that can afford its high license cost.

**Keywords:** CAD, FEM, comparison, aeronautic

## **1. Introduction**

Computer-Aided Design (CAD) tools constitute a fundamental technology in the field of mechanical design. They allow the creation and modification of 2D or 3D parts, reducing the number of errors thanks to their high precision. The introduction of CAD design, combined with Finite Element Method (FEM) analysis, which computer-simulates flows, forces, and other real-world conditions, translates into significant savings, money and safety wise, for the professional world, and avoids the need to manufacture unnecessary prototypes before reaching the final product.

The accelerated development of this technology during the second half of the 20th century means that today there are countless CAD-FEM tools on the market. Each tool has its strengths and weaknesses, and their use represents approximately 80% of work time in mechanical engineering. Therefore, a thorough understanding of each tool is vital to optimize this time and identify the most suitable one according to professional objectives.

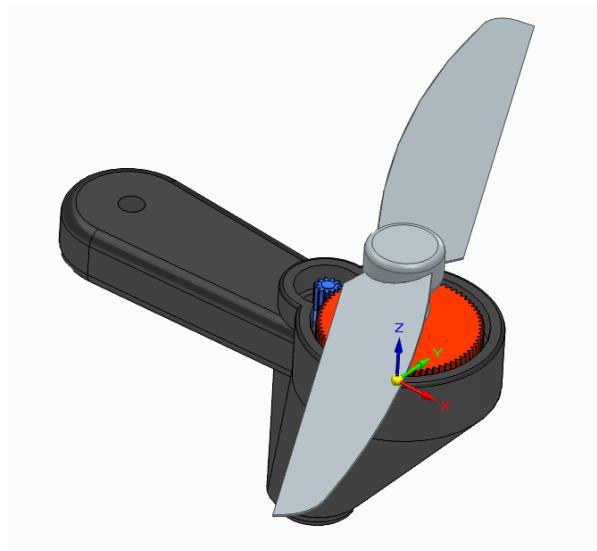
## **2. Project definition**

The main objective of this project is to compare the four selected tools from two different perspectives: CAD design and FEM analysis. Subsequently, an economic study is conducted, which also includes the Femap tool. Femap was not included in the initial comparison due to difficulties with the software. The economic study determines the total annual operating cost of each tool. Finally, a global comparison is made based on all the aspects studied, highlighting the advantages and disadvantages of each tool and presenting the final conclusions.

## **3. Model/system/tool description**

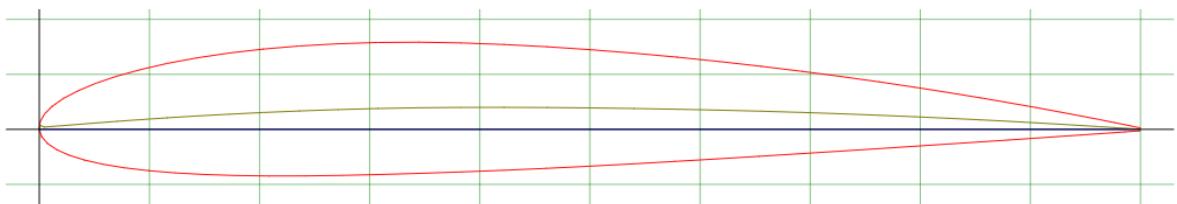
The CAD design comparison was performed using SolidWorks, Solid Edge and CATIA V5. For this purpose, it was decided to model a set of parts of the propeller of a

quadcopter drone with each tool, as shown in Illustration 1. The recorded data for this comparison were the initial training time, the time spent completing the model, and the number errors or setbacks made.



*Illustration 1: Chosen geometry for the comparison of CAD design tools*

The FEM analysis comparison was performed using Solid Edge and Ansys, the former being an integrated environment within a CAD design tool, and the latter a program specialized in structural analysis. For this comparison, a NACA 2412 airfoil, as shown in Illustration 2, was extruded. The assigned material was Aluminium 7075-T6, and a fixed constraint on one end and a uniform pressure of 5000 Pa on the surface were applied as boundary conditions.



*Illustration 2: Aerodynamic profile NACA 2412 [1]*

The recorded data from each software for the purpose of this comparison were the initial training time, the FEM analysis resolution time, and the maximum displacement and Von Mises stress values.

#### 4. Results

The results from the CAD design tool comparison are as follows:

	<b>SolidWorks</b>	<b>Solid Edge</b>	<b>CATIA V5</b>
<b>Tiempo de formación [h]</b>	22	3,5	5,5
<b>Tiempo empleado [h:min:s]</b>	2:14:51	2:09:57	2:24:24
<b>Errores/retrocesos</b>	29	21	15

*Table 1: CAD design results*

The results from the FEM analysis software comparison are shown in the following table:

	<b>Solid Edge</b>	<b>Ansys</b>
<b>Tiempo de formación [h]</b>	1,5	2,5
<b>Tiempo de resolución [s]</b>	18,71	6,62
<b>Desplazamiento máx. [mm]</b>	4,35E-03	8,07E-03
<b>Tensión máx. Von Mises [MPa]</b>	0,277	0,45485

*Table 3: FEM analysis results*

The following table shows the total annual cost calculated for each of the tools:

<b>Herramienta</b>	<b>Coste de operación [€]</b>	<b>Amortización de la inversión [€]</b>	<b>Coste total anual [€]</b>
<b>SolidWorks</b>	8624	1130	9754
<b>Solid Edge</b>	4701,10	1130	5831,1
<b>CATIA</b>	10300	1130	11430
<b>Ansys</b>	32235,95	1130	33365,95
<b>*Femap</b>	7773,60	1130	8903,60

*Table 5: Total anual cost of each tool*

\*Femap has been included in the economic study, but its technical capabilities as a software have not been fully evaluated. Therefore, additional studies will be required.

## 5. Conclusions

Solid Edge is a powerful tool, especially for CAD design. Its hybrid model, which integrates CAD design and FEM analysis, combined with its low total annual cost, makes it the ideal tool for smaller companies that prioritize reduced costs and rapid training over advanced FEM simulation. Ansys is the best FEM simulation tool in terms of precision and reliability, although its high cost means it is only accessible to larger, established companies. Femap, despite being less popular than Ansys, has a very competitive price that makes it a great option as a specialized FEM analysis tool. SolidWorks and CATIA V5 are useful for companies with already trained professionals that prioritize a robust design interface.

## 6. References

- [1] «NACA 4 digit airfoil generator (NACA 2412 AIRFOIL)». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>5</b>
1.1 Objetivos .....	8
1.2 Herramientas y recursos.....	9
<b>Capítulo 2. Estado de la cuestión.....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo 3. Metodología .....</b>	<b>14</b>
3.1 Geometrías elegidas.....	14
3.2 Diseño CAD .....	17
3.3 Análisis por elementos finitos (FEM).....	18
<b>Capítulo 4. Resultados.....</b>	<b>22</b>
4.1 Diseño CAD .....	22
4.1.1 SolidWorks .....	24
4.1.2 Solid Edge .....	27
4.1.3 CATIA V5.....	30
4.2 Análisis por elementos finitos (FEM).....	32
4.2.1 Mallado.....	35
4.2.2 Resultados numéricos.....	36
<b>Capítulo 5. Estudio económico.....</b>	<b>40</b>
<b>Capítulo 6. Conclusiones.....</b>	<b>44</b>
6.1 Comparativa global .....	44
6.2 Ventajas y desventajas .....	45
6.3 Consideraciones y recomendaciones futuras.....	46
<b>Capítulo 7. Bibliografía.....</b>	<b>48</b>
<b>ANEXO I. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....</b>	<b>51</b>

## *Índice de figuras*

Figura 1: Fases de la evolución del diseño mecánico.....	5
Figura 2: Pasos del análisis FEM .....	7
Figura 3: Perfil aerodinámico NACA 2412 [8] .....	15
Figura 4: Vista del perfil alar NACA 2412 extruido 200 mm en SolidWorks .....	15
Figura 5: Modelo CAD del ensamblaje para la hélice de dron realizado en Solid Edge ....	16
Figura 6: Propiedades mecánicas del Aluminio 7075-T6 [11].....	19
Figura 7: Partes del perfil alar [12].....	20
Figura 8: Gráficas del análisis de convergencia de malla .....	20
Figura 9: Hélice del dron, realizada con SolidWorks.....	24
Figura 10: Piñón del motor, realizado con SolidWorks .....	24
Figura 11: Engranaje reductor con eje hexagonal, realizado con SolidWorks.....	25
Figura 12: Carcasa de la hélice del dron, realizada con SolidWorks .....	25
Figura 13:Ensamblaje del sistema de la hélice del dron, realizado con SolidWorks .....	26
Figura 14: Hélice del dron, realizada con Solid Edge .....	27
Figura 15: Piñón del motor, realizado con Solid Edge.....	28
Figura 16: Engranaje reductor con eje hexagonal, realizado con Solid Edge .....	28
Figura 17: Carcasa de la hélice del dron, realizada con Solid Edge.....	28
Figura 18: Ensamblaje del sistema de la hélice del dron, realizado con Solid Edge.....	29
Figura 19: Hélice del dron, realizada con CATIA V5 .....	30
Figura 20: Piñón del motor, realizado con CATIA V5 .....	30
Figura 21: Engranaje reductor con eje hexagonal, realizado con CATIA V5 .....	31
Figura 22: Carcasa de la hélice del dron, realizada con CATIA V5 .....	31
Figura 23: Ensamblaje del sistema de la hélice del dron, realizado con CATIA V5 .....	32
Figura 24: Mallado realizado con Solid Edge .....	35
Figura 25: Vista ampliada de la geometría de mallado creada por Solid Edge.....	35
Figura 26: Mallado realizado con Ansys.....	36

Figura 27: Vista lateral del desplazamiento máximo en Solid Edge.....	37
Figura 28: Diagrama de desplazamiento total realizado con Solid Edge.....	37
Figura 29: Diagrama de desplazamiento total realizado con Ansys.....	38
Figura 30: Diagrama de tensión equivalente de Von Mises, realizado con Solid Edge.....	38
Figura 31: Localización de la tensión máxima de Von Mises por Solid Edge.....	39
Figura 32: Diagrama de tensión equivalente de Von Mises, realizado con Ansys.....	39
Figura 33: Especificaciones técnicas recomendadas para ordenador de uso CAD-FEM [13]	
.....	40

## *Índice de tablas*

Tabla 1: Resultados diseños CAD .....	22
Tabla 2: Tiempo de formación dedicado a cada herramienta de diseño CAD .....	23
Tabla 3: Resultados análisis FEM .....	33
Tabla 4: Coste de operación anual para cada herramienta .....	42
Tabla 5: Coste total anual para cada herramienta.....	42
Tabla 6: Gráfico de barras del coste total anual por herramienta .....	42

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El diseño asistido por ordenador (CAD, por sus siglas en inglés: *Computer-Aided Design*) se ha consolidado como una tecnología fundamental en el ámbito de la ingeniería y el diseño mecánico. Estas herramientas permiten crear, modificar y analizar todo tipo de piezas, ya sea en 2D o 3D, logrando así una mayor eficacia y productividad para los profesionales, y reduciendo el número de errores gracias a su gran precisión, lo que resulta crucial en el desarrollo de proyectos más complejos. Además, el uso de softwares de CAD reduce considerablemente los costes para las empresas, ya que permiten trabajar con diferentes diseños y enmendar posibles errores sin la necesidad de crear múltiples prototipos físicos hasta llegar al producto final, lo que también agiliza los procesos.

Mientras los primeros sistemas CAD eran herramientas relativamente simples que imitaban el proceso de dibujo técnico manual con mayor agilidad y precisión, los avances tecnológicos del último siglo han permitido, entre otros, el modelado tridimensional, el diseño colaborativo en entornos integrados, y la ejecución de análisis estructurales y simulaciones avanzadas, abriendo las posibilidades del diseño mecánico a límites inimaginables hace menos de cien años. Esta evolución se refleja en la Figura 1, que muestra las fases más significativas en la evolución del dibujo técnico hasta los sistemas CAD de hoy en día.

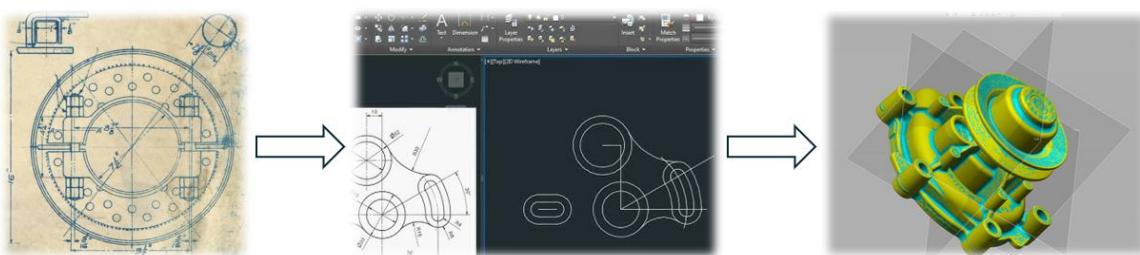


Figura 1: Fases de la evolución del diseño mecánico

La semilla del CAD fue implantada en 1861, cuando el químico francés Alphonse Louis Poitevin descubrió, mediante una combinación de luz solar y una sustancia encontrada en chicles, la forma de reproducir planos de dibujo técnico. De esta manera, los planos podían ser distribuidos para que todos trabajaran exactamente sobre el mismo diseño, sin miedo a errores entre copias. En 1936, el científico británico Alan Turing inventó la máquina de Turing, que supuso la base de los ordenadores modernos [2]. El desarrollo continúa, y en la década de 1950 el Lincoln Laboratory del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) desarrolla para las Fuerzas Aéreas Norteamericanas el primer software CAD: el sistema gráfico SAGE (*Semi-Automatic Ground Environment*). Este sistema, lanzado en 1955 con la intención de ser utilizado durante la Guerra Fría, procesaba datos de radar y otras formas de localización de objetos, mostrándolos a través de una pantalla mediante tubo de rayos catódicos [3]. Así, el espacio aéreo de una zona determinada quedaba representado con puntos y vectores, lo que supuso la introducción de gráficos computacionales en el ámbito del dibujo técnico.

Este campo ha ido evolucionando desde su origen hasta lo que se conoce hoy en día, donde el CAD es una herramienta fundamental para cualquier ingeniero mecánico, arquitecto, o diseñador industrial, y la piedra angular del diseño y la construcción. Este trabajo pretende, desde el punto de vista de la ingeniería mecánica y centrándose en el ámbito aeronáutico, hacer un análisis de los principales programas utilizados en la industria y descubrir sus fortalezas y debilidades, sirviendo así como referente para ingenieros que quieren conocer las ventajas y desventajas de ciertos softwares para elegir el que mejor se alinea con sus objetivos profesionales.

Por otro lado, el Método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés: *Finite Element Method*) es la herramienta más comúnmente utilizada por ingenieros para la resolución de problemas de alta complejidad y geometrías complicadas. Este método constituye una técnica numérica de aproximación de soluciones en ecuaciones diferenciales parciales, con aplicaciones en dinámica de fluidos, vibración, o problemas térmicos, entre otros, pero durante este proyecto se centrará el foco en la solución estructural. El FEM no es la única herramienta de análisis numérico disponible. Otros ejemplos de métodos aplicables incluyen

el Método de los estados límites o el Método de diferencias finitas. Sin embargo, el FEM domina en el mercado debido a su versatilidad y alta eficiencia numérica [4].

Desde el punto de vista de la programación FEM, la ejecución de cualquier análisis FEM consiste en tres pasos fundamentales a seguir. Estos pasos son los mismos para cualquier proyecto, independientemente del fin, y son los que se muestran en la Figura 2.



*Figura 2: Pasos del análisis FEM*

- **Preprocesado:** engloba la definición de la geometría y del tipo de análisis a realizar, la asignación de las propiedades del material, la aplicación de las condiciones de contorno (incluyendo restricciones y cargas), y la generación de la malla.
- **Resolución:** el resultado del preprocesado, es la etapa en la que el software resuelve las ecuaciones del modelo FEM creado para proporcionar resultados numéricos.
- **Postprocesado:** comprende el análisis e interpretación de resultados. Es aquí de donde se extraen los datos relevantes y donde se visualizan las tensiones y deformaciones.

Desde la primera etapa de preprocesado se puede encontrar el significado de la relación CAD-FEM. A la hora de realizar el análisis FEM, en algunos casos se podrá generar la geometría desde el propio programa de simulación, y en otros habrá que importar la geometría creada con un programa de CAD externo. En cualquier caso, no tiene sentido hablar de FEM sin hablar de CAD. Dada la relevancia del método de simulación por

elementos finitos en el ámbito del diseño mecánico, hoy en día la mayor parte de softwares de CAD tienen integrado un entorno de análisis estructural FEM.

En la industria aeronáutica, las herramientas CAD-FEM se utilizan para el diseño de piezas que a menudo son de un grado de complejidad alto, tanto en su geometría como en las condiciones del entorno sobre el que se realiza el análisis. Por tanto, la introducción de los programas CAD-FEM supone un ahorro muy significativo en dinero y seguridad a la hora de simular fuerzas, flujos de fluidos y otros efectos del mundo real sin la necesidad de construir prototipos físicos. Esta evolución tecnológica, que sigue avanzando actualmente a pasos agigantados, se ha dado en su mayor parte durante la segunda mitad del siglo XX, provocando la existencia de un sinfín de herramientas CAD-FEM.

Gracias a esta amplia oferta de programas de diseño CAD y análisis y simulación por elementos finitos nace el propósito de este TFG. Cada herramienta en el mercado tiene sus ventajas y sus limitaciones, y su utilización supone aproximadamente el 80% del tiempo de trabajo en ingeniería mecánica. Por ello, conocerlas en profundidad resulta de vital importancia tanto para elegir la aplicación más idónea según el proyecto como para optimizar el tiempo de trabajo.

El presente trabajo pretende servir como punto de referencia a empresas de la industria aeronáutica, ya que el elevado coste de las licencias de estos programas hace imposible tener todas las opciones a su alcance, por lo que se deben tomar decisiones sobre en qué herramientas invertir para sus trabajadores, teniendo en cuenta las necesidades de la empresa y la inversión a realizar por cada programa.

## **1.1 *OBJETIVOS***

La finalidad principal de este proyecto es elegir cuatro de las herramientas CAD-FEM más utilizadas en el ámbito aeronáutico y realizar una comparación objetiva de las mismas, buscando sus ventajas e inconvenientes y calculando sus costes de operación.

Para ello, ha sido necesario un tiempo de aprendizaje previo para cada herramienta, el cual se ha tenido en cuenta para asegurar una comparación justa y sistemática. Mientras algunas de las herramientas elegidas se han dedicado exclusivamente al diseño CAD o al análisis FEM, en otras se han utilizado los dos entornos (diseño CAD y simulación por análisis FEM) con una misma herramienta.

Para realizar la comparativa, se han modelado dos diseños diferentes: un conjunto de piezas que ensambladas forman la hélice de un dron cuadricóptero, y el perfil extruido del ala de un avión. La razón principal de generar dos modelos distintos es que el ala de avión resulta idónea para realizar un análisis FEM y visualizar las deformaciones y tensiones. El diseño del ala ha sido simplificado ya que no se busca representarla fielmente, sino realizar una geometría común en el ámbito aeronáutico y que se pueda reproducir en todos los programas para realizar una buena comparativa, que es el verdadero objetivo. Sin embargo, esta simplificación hace que el modelo del ala no sirva como representativo de las funcionalidades de las herramientas CAD. Por ello, se ha elegido crear un conjunto de piezas de una hélice de dron. El modelado de estas piezas utiliza más comandos que para el ala de avión, además de unirse en un ensamblaje, por lo que es la mejor opción para realizar una comparativa adecuada de las funcionalidades de los distintos programas de CAD, sin entrar a la simulación FEM de este conjunto de piezas, que tendría mayor complejidad al aplicar cargas rotacionales.

La comparativa de las distintas herramientas se ejecutará contemplando aspectos cuantitativos, tales como el tiempo de ejecución o el número de errores cometidos para los diseños CAD, y el tiempo de resolución para los análisis FEM, todo ello para asegurar que la comparación es objetiva. Finalmente, se evaluarán las distintas herramientas por sus ventajas y desventajas, y se calcularán los costes de operación.

## **1.2 HERRAMIENTAS Y RECURSOS**

Las herramientas elegidas para desarrollar el proyecto son SolidWorks [5], Solid Edge [6], CATIA V5 [7] y Ansys [8]. Esta elección responde a dos objetivos principales. Por un lado,

se busca realizar la comparación de programas de diseño CAD en términos de usabilidad, funcionalidad y capacidades de modelado. Las herramientas empleadas a este objetivo son SolidWorks, Solid Edge y CATIA V5. Por otro lado, se pretende comparar herramientas de análisis por elementos finitos (FEM) para evaluar su precisión y rendimiento computacional en procesos de simulación. Para este fin se han seleccionado Solid Edge y Ansys.

Durante este capítulo y los capítulos 5 y 6, se hará una mención especial a la herramienta Femap [9], ya que inicialmente se pretendía utilizar en la comparación de análisis FEM. Aunque finalmente no se pudo trabajar con ella, supone una adición valiosa a la comparativa, por lo que se incluirá con un asterisco en los apartados donde resulte relevante su inclusión. A continuación, se detallan características generales de cada herramienta y la justificación de su elección.

- **SolidWorks** (Dassault Systèmes): uno de los programas CAD más populares en entornos educativos e industriales. Cuenta con una interfaz gráfica intuitiva y de fácil aprendizaje, con amplias bibliotecas de componentes y herramientas de modelado paramétrico 3D robustas. Su extensa comunidad facilita el acceso a documentación y soporte técnico, y es una referencia clave para este trabajo comparativo por su uso generalizado y su presencia en empresas industriales de menor tamaño.
- **Solid Edge** (Siemens): su característica diferenciadora principal es la tecnología de modelado síncrono desarrollado por la propia compañía. Esta opción de modelado difiere del método tradicional en que permite diseñar sin árbol de operaciones, con el objetivo de lograr una edición más rápida y flexible. No obstante, también permite el modo de diseño tradicional, o incluso combinar ambos modos en un mismo diseño. Su módulo de estudios de simulación FEM integrado permite realizar análisis estructurales básicos. Todo esto, sumado a su compatibilidad con otros programas y entornos industriales, lo convierte en una opción idónea para ser considerada a las comparaciones desde ambas perspectivas: diseño CAD y análisis FEM.
- **CATIA V5** (Dassault Systèmes): posee un entorno de diseño paramétrico muy potente, y tiene una fuerte presencia en el sector aeronáutico. Las capacidades del software permiten manejar modelos de alta complejidad con un gran nivel de detalle,

propios de entornos industriales exigentes. Pese a provenir del mismo desarrollador que SolidWorks, presenta una interfaz muy distinta, por lo que no interfiere con la variabilidad que se busca en esta elección de herramientas. Su relevancia en la industria aeronáutica la convierte en una candidata esencial para esta comparativa, además de servir de contraste frente a herramientas más accesibles como SolidWorks o Solid Edge.

- **Ansys** (Ansys Inc.): software dedicado a la simulación profesional, con altas capacidades en la realización de análisis estructurales, térmicos o dinámicos. Posee un entorno versátil y de alta precisión numérica, y es un referente mundial en simulación avanzada. Es ampliamente utilizado tanto en industria como en investigación, lo que deriva en su gran comunidad, documentación técnica y soporte profesional. Su inclusión en este trabajo permite tener una base sólida de comparación frente a herramientas integradas como Solid Edge, y herramientas especializadas como Femap.
- **\*Femap** (Siemens): herramienta dedicada exclusivamente al análisis FEM, hace uso de un solucionador fiable y preciso llamado NX Nastran. Con un entorno modular, Femap se especializa en las etapas de preprocesado y postprocesado de las simulaciones, y se valora en este estudio por suponer un balance entre herramientas potentes especializadas y herramientas integradas en entornos CAD.

Esta selección de herramientas cubre los diferentes enfoques de diseño CAD y análisis FEM de forma equilibrada, basándose en factores como la variabilidad en cuanto a interfaz y desarrolladores, su popularidad actual en la industria aeronáutica, y el balance entre herramientas principalmente de CAD (aunque incluyan entorno de análisis FEM) y herramientas de simulación FEM. Esto permite ejecutar una comparación completa y abarcar tanto soluciones integradas como especializadas.

## Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En la actualidad no existe ningún trabajo de investigación que aporte los resultados que se persiguen en este proyecto. Esto no es de extrañar ya que nos encontramos en plena etapa de evolución de las tecnologías que se tratan en este TFG, con la implementación de la IA, entre otros. No obstante, esta es una investigación necesaria hoy por hoy, pese a que en un futuro sea necesario actualizarla con las funcionalidades disponibles del momento. Para entender cómo se ha llegado a este estado de oferta de programas de diseño y simulación en el mercado tan amplia, es preciso mirar a la historia reciente del CAD.

En 1963, mientras trabajaba en su tesis doctoral, Ivan Sutherland desarrolla Sketchpad, el primer programa interactivo de dibujo vectorial. Este hito fue pionero en el desarrollo de la computación gráfica en general, y establece las bases de la interacción entre persona y ordenador, cuestionando por primera vez el concepto de utilizar un ordenador como una extensión del ser humano tanto en lo técnico como en lo artístico. Mediante el uso del programa, Sutherland implementó por primera vez el uso de un teclado y un lápiz óptico para dibujar la imagen representada en pantalla, por lo que es considerado como el predecesor al diseño asistido por ordenador [10].

Desde sus inicios, las grandes empresas vieron el enorme potencial del CAD y apostaron fuerte por su desarrollo. Prueba de ello es que en los mismos años 60 Sketchpad se utilizaba en las universidades más punteras, y tan sólo dos años más tarde, en 1965, sale al mercado el primer software CAD por un precio de 500.000 USD. En 1969, Computervision lanza el primer plotter y digitalizador, y ese mismo año el grupo de ingeniería Sener ya lo comienza a aplicar para su diseño de buques. Durante los años 70, los avances tecnológicos en ordenadores centrales favorecieron que los sistemas CAD pudieran manejar cálculos complejos y que surgiera el modelado de objetos en 3D por primera vez mediante *wireframe* (líneas alámbricas), algo de lo que la industria aeroespacial sacó un gran partido [11].

En la década de 1980, John Walker, junto a otros doce socios fundadores, crea AutoCAD [11]. El objetivo era lanzar un programa de CAD con un coste inferior a los 1.000 USD. Esto supuso un gran avance para lograr que el CAD se volviera más económicamente accesible para empresas de menor tamaño e incluso estudiantes.

A lo largo de la última década del siglo XX, el CAD se combinó con la fabricación asistida por ordenador (CAM, por sus siglas en inglés: *Computer-Aided Manufacturing*) y con el análisis por elementos finitos (FEA/FEM). Este hito fue revolucionario tanto para el diseño de producto, que ahora permitía simular diferentes estados de la pieza, como para la industria de la manufactura. Finalmente, la introducción de Internet en los últimos años ha permitido compartir trabajo entre creadores, el diseño colaborativo, y unos diseños más inteligentes y dinámicos gracias también a la introducción de la IA, que logra los diseños más óptimos con unas directrices específicas, o incluso analizar el impacto medioambiental.

El CAD ha tenido una rápida evolución desde sus inicios alrededor de 1950, pasando de ser una simple herramienta de procesamiento de datos hasta convertirse en una tecnología altamente avanzada impulsada por IA y fundamental para el diseño de productos y la ingeniería. Con cada avance tecnológico, han ido surgiendo nuevos softwares, ampliando sus capacidades para lograr adaptarse a las necesidades de las industrias y los usuarios. Hoy en día, existen infinidad de herramientas en el mercado, cada una con sus características, ventajas y limitaciones únicas. Por ello, resulta esencial conocer en profundidad las más utilizadas en cada sector, en este caso el aeronáutico, para poder elegir la que mejor se ajuste a los objetivos de cada proyecto. La elección no solo debe depender de las propias funciones del programa, sino también de elegir la que optimice los resultados en términos de costes y sostenibilidad.

## Capítulo 3. METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto se estructura en diferentes apartados, ya que con la variedad de programas con las que se trabajan son muchos los pasos a realizar. No obstante, cada uno de ellos está pensado para asegurar una comparación sistemática. A continuación se describe el proceso seguido.

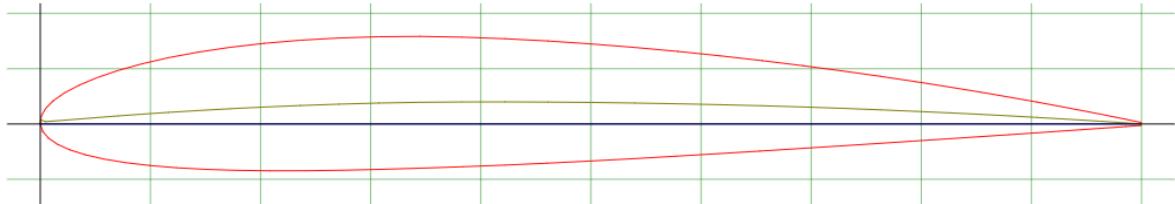
### 3.1 GEOMETRÍAS ELEGIDAS

En primer lugar, se eligieron dos geometrías distintas a modelar: una para realizar la comparación de los programas de diseño CAD, y otra para la ejecución de una comparativa de las herramientas de análisis FEM. Las pautas que se impusieron para esta búsqueda fueron:

- Las piezas debían ser representativas del sector aeronáutico, ya que el enfoque que se está dando a este proyecto es desde el campo aeroespacial.
- Las geometrías debían ser relativamente sencillas de modelar y mallar, puesto que no se busca que la complejidad del diseño sea el factor más llamativo del trabajo, sino la comparación realizada. Esto también implica que las piezas fuesen reproducibles en interfaces variadas, para poder ser realizables en todas las herramientas empleadas en este proyecto.
- La geometría elegida para el análisis FEM debía ser comparable en cuanto a los resultados de dicho análisis, por lo que se realizó un análisis estructural de manera que se obtuviesen la deformación total y las tensiones equivalentes de Von Mises, valores numéricos que se pueden contrastar entre programas.

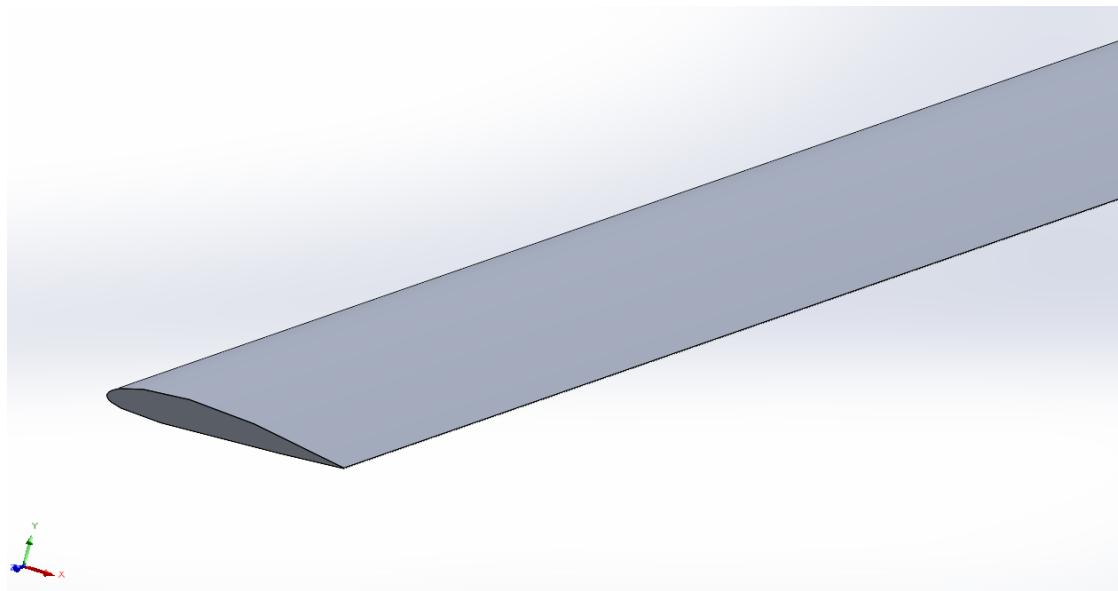
Con estas condiciones en mente, se eligió en primer lugar realizar un ala de avión, extruyendo un perfil alar una longitud de 200 mm. Esta simplificación de un ala de avión a un perfil alar extruido es necesaria para no generar una geometría demasiado compleja que dé problemas en el mallado, encontrando así el equilibrio entre realismo y simplicidad que

se busca. El perfil aerodinámico escogido es el NACA 2412, el cual se muestra en la Figura 3.



*Figura 3: Perfil aerodinámico NACA 2412 [1]*

El perfil NACA 2412 es un perfil aerodinámico de baja velocidad, seleccionado por ser ampliamente utilizado en aeronáutica en aviones monomotores, y por ser un perfil comúnmente utilizado en estudios académicos como este. Para modelarlo se usaron las coordenadas del perfil proporcionadas por Airfoil Tools [1]. Este perfil fue extruido 200 mm para poder realizar un análisis estructural volumétrico y no solo superficial, y visualizar los esfuerzos de flexión, compresión y tracción a los que se vería sometido.



*Figura 4: Vista del perfil alar NACA 2412 extruido 200 mm en SolidWorks*

Aunque inicialmente se pretendía usar esta geometría tanto para la comparación de diseño CAD como para la de simulación FEM, finalmente se decidió separarlo en dos diseños

diferentes ya que el ala de avión no tenía una geometría lo suficientemente compleja como para representar fielmente las distintas funcionalidades de los programas CAD. Por ello, se escogió una nueva geometría a realizar, que fue un conjunto de piezas de la hélice de un dron cuadricóptero. Esta elección se debe a que, manteniendo la pauta de que la pieza sea representativa del sector aeronáutico al igual que el ala de avión lo es, realizar este conjunto de piezas implica la utilización de muchos comandos básicos del modelado CAD entre los que destacan extrusión, creación de planos, matrices, cortes, redondeos y comandos de relacionado, además de la realización de un ensamblaje para acoplar las piezas. Esto permite evaluar una amplia gama de funcionalidades sin que la geometría resulte excesivamente compleja.

Para realizar las geometrías de los diseños de CAD, se tomaron como referencia dos modelos provenientes de la plataforma colaborativa GrabCAD [12] [13], los cuales fueron adaptados con el objetivo de utilizar una mayor variedad de comandos, manteniendo la operatividad de los diseños originales. El ensamblaje final de todas las piezas que se realizó con cada uno de los programas CAD es el que se muestra en la Figura 5, donde el extremo de la base iría acoplado al chasis del dron para un funcionamiento completo.



*Figura 5: Modelo CAD del ensamblaje para la hélice de dron realizado en Solid Edge*

### **3.2 DISEÑO CAD**

Uno de los objetivos principales de este trabajo es comparar la capacidad, usabilidad y eficiencia de tres herramientas de diseño CAD: SolidWorks, Solid Edge y CATIA V5. Para asegurar que la comparación realizada es científica y sistemática, se ha diseñado una metodología limitada a aspectos cuantitativos.

Antes de comenzar la evaluación, se realizó una revisión documental sobre cada herramienta, limitada a un máximo de 6 horas por herramienta, para aprender a manejar cada entorno y familiarizarse con los conceptos básicos y la terminología propia de cada software. Esta decisión se ha tomado para simular el contexto de un usuario que comienza a utilizar la herramienta con un nivel de conocimiento previo similar. Sin embargo, este límite de 6 horas no ha sido posible en el caso de SolidWorks, ya que esta herramienta se ha trabajado durante una asignatura semestral de este último curso, por lo que se parte de un aprendizaje más avanzado de esta herramienta.

Para evaluar tanto la curva de aprendizaje como la eficiencia de uso de cada programa, se establecieron las siguientes normas:

- Se estableció un máximo de 8 horas (una jornada laboral) a trabajar en el modelaje con cada herramienta, en días separados.
- Para cada jornada, se intentó modelar el conjunto completo, piezas y ensamblaje, desde cero.
- No se utilizaron geometrías importadas, sino que todo el diseño se realizó íntegramente en cada software para valorar la experiencia completa.

Las razones para acotar el tiempo dedicado a cada software son, por un lado, observar lo rápido que un usuario novel es capaz de familiarizarse con la herramienta y comenzar a utilizarla en sus propios proyectos, y por otro, simular una realidad del mundo profesional en la que un ingeniero dispone de un tiempo limitado para adoptar un nuevo software CAD y usarlo de forma efectiva.

Los aspectos cuantitativos que se usarán para realizar la posterior comparación se basan en el registro de los siguientes datos para cada herramienta:

- Tiempo dedicado a la formación para modelar el conjunto.
- Tiempo total empleado en completar el conjunto, o grado de avance si no se consiguió terminar.
- En caso de no haber terminado el conjunto en la primera jornada de trabajo, tiempo total empleado para completar el modelo.
- Número de retrocesos o errores cometidos durante el desarrollo de las piezas.

### **3.3 ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEM)**

Tras haber visto ya la geometría y dimensiones del ala de avión sobre el que se va a realizar el análisis FEM, se procede a desarrollar las especificaciones de la simulación.

En primer lugar, se importó la geometría realizada desde entornos CAD. En el caso de Ansys, la pieza se modeló en Ansys SpaceClaim, una herramienta de modelado 3D desarrollada por Ansys específicamente para preparar las geometrías para simulaciones. No obstante, este programa también admite la importación de geometrías en formatos neutros como STEP, IGES o Parasolid, y la lectura de archivos de los sistemas CAD más populares, como SolidWorks o CATIA.

Una vez dentro del análisis se especificó el tipo de análisis, el cual fue “Estático lineal”. Este tipo de análisis se alinea a la perfección con los resultados numéricos que se buscan obtener, y con las condiciones de contorno que se aplicarán, resulta en un análisis completo pero sin una complejidad tan alta como otros tipos de análisis FEM.

Como material se eligió el Aluminio 7075-T6, seleccionada por ser una aleación muy común en la industria aeronáutica debido a su elevada resistencia, lo que la hace idónea para aplicaciones estructurales de alto rendimiento. Esta aleación se puede encontrar en las bibliotecas de materiales integradas en muchos de los programas utilizados. Para los

softwares como Ansys que no incluían este material por defecto en su biblioteca se creó el material aplicando las propiedades del fabricante que figuran en la Figura 6.

Propiedades	Métrica
Dureza, Brinell	150
Dureza, Knoop	191
Dureza, Rockwell A	53.5
Dureza, Rockwell B	87
Dureza, Vickers	175
Resistencia a la tracción	572 MPa
Resistencia a la tracción	503 MPa
Alargamiento a la rotura	11%
Módulo de elasticidad	71,7 GPa

*Figura 6: Propiedades mecánicas del Aluminio 7075-T6 [14]*

Una vez aplicado el material, se procedió a imponer las condiciones de contorno. Como restricciones, se aplicó un empotramiento en un lateral del ala. De esta forma, se simula la conexión del ala al fuselaje de la aeronave. Esta condición es clásica para estudios estáticos como este, y es suficiente para provocar las deformaciones y tensiones internas que se persiguen, sin la necesidad de modelar la unión real, que complicaría el diseño completo al precisar tornillos o un montaje articulado.

Por otro lado, a modo de cargas, se aplicó una presión uniforme de 5000 Pa. Inicialmente, se pretendía aplicar esta presión únicamente sobre el extradós para simular la fuerza de sustentación (*lift*) ejercida sobre el ala, pero la naturaleza del perfil alar NACA 2412 provoca que el ala sea una única superficie curva continua alrededor del perfil, sin aristas marcadas que separan el extradós e intradós. Por tanto, se aplicó la presión a toda la superficie exterior. Esta decisión, pese a provocar un comportamiento menos preciso aerodinámicamente, no afecta el objetivo de comparar las distintas herramientas de análisis FEM, ya que esta

condición se aplicó de forma idéntica en todos los programas, manteniendo la coherencia de la comparativa.

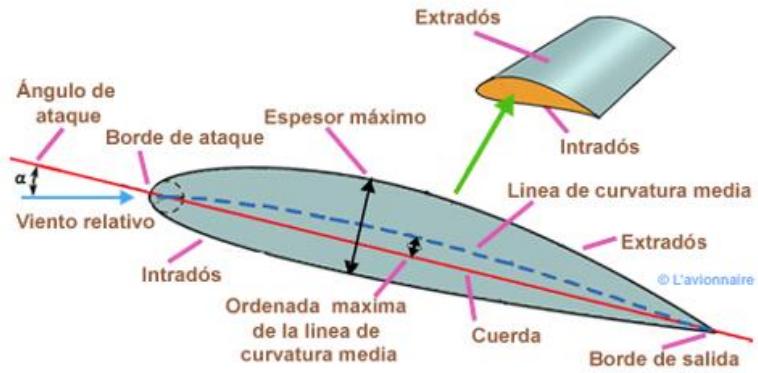


Figura 7: Partes del perfil alar [15]

Finalmente, se estableció un tamaño de malla, que sería el mismo para todas las simulaciones. Para lograr los mejores resultados y equilibrar el tiempo de cálculo y la estabilidad numérica, se llevó a cabo un análisis de convergencia de malla en Ansys. A partir de un tamaño de malla de 2 mm, las variaciones fueron inferiores al 5% en el caso de las tensiones e inferiores al 0,005% en el caso de las deformaciones, por lo que dicho tamaño fue considerado como el tamaño óptimo para el resto de simulaciones. Los resultados de dicho análisis se muestran en la Figura 8, donde se resalta en amarillo el tamaño de malla elegido.

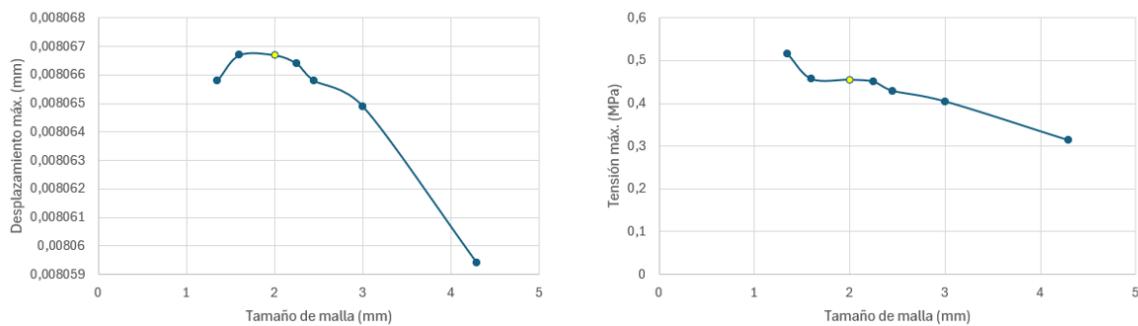


Figura 8: Gráficas del análisis de convergencia de malla

Finalizadas todas las especificaciones, se cierra la etapa de Preprocesado y se pudo continuar a las fases de Resolución y Postprocesado. Es en estas fases donde se realiza el registro de datos que servirán como pilar en el que fundamentar la comparación entre herramientas. Los datos registrados fueron:

- Tiempo de formación para poder realizar los análisis FEM.
- Tiempo de resolución del sistema, a partir de las especificaciones proporcionadas.
- Desplazamiento total máximo.
- Tensión equivalente de Von Mises máxima.

## Capítulo 4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras aplicar la metodología mencionada. Posteriormente se realizará una comparativa analizando estos resultados, además de un estudio económico que también proporcionará datos relevantes para las conclusiones.

### 4.1 DISEÑO CAD

Una vez realizados todos los conjuntos de piezas, se obtiene la siguiente tabla con los datos registrados de cada programa:

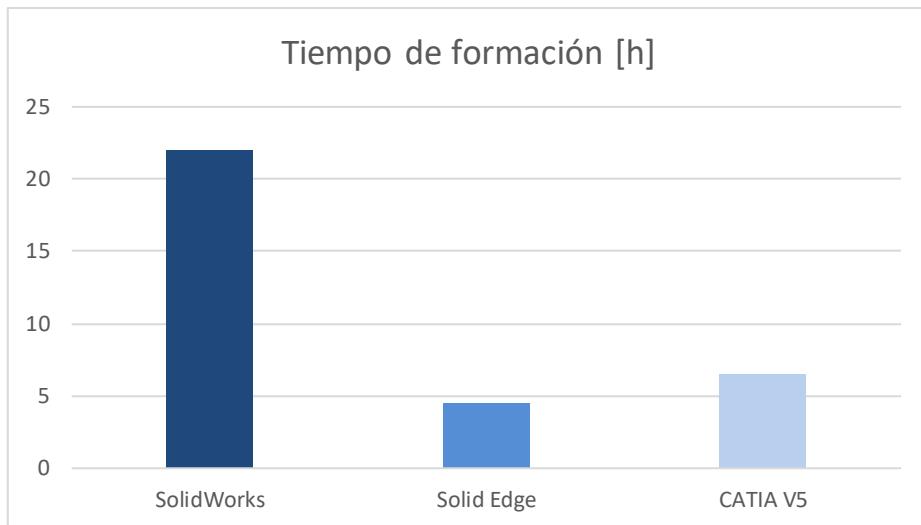
	SolidWorks	Solid Edge	CATIA V5
<b>Tiempo de formación [h]</b>	22	3,5	5,5
<b>Tiempo empleado [h:min:s]</b>	2:14:51	2:09:57	2:24:24
<b>Errores/retrocesos</b>	29	21	15

*Tabla 1: Resultados diseños CAD*

Destaca el tiempo de formación en SolidWorks, el cual no ha sido posible limitar a un máximo de 6 horas ya que ese tiempo ocurrió durante clases universitarias, por lo que se ha sumado el número de horas dedicadas al programa durante el semestre y se anota que esta herramienta parte de un nivel de aprendizaje más profundo que las restantes.

Por otro lado, también resalta que en todos los casos se terminó el conjunto en un tiempo menor a una jornada laboral, por debajo de las 2 h 30 min. Solid Edge ha sido la herramienta que menor tiempo ha requerido para completar el modelo y menor tiempo de formación, empleando tan sólo un 15,9% del tiempo de aprendizaje de SolidWorks, y un 63,6% del de CATIA V5. Por el contrario, CATIA V5 ha sido la herramienta para la que más tiempo se ha empleado en realizar los modelos, a pesar de haber hecho un uso casi total del tiempo de formación permitido. Esto se debe a que la interfaz de CATIA V5 es menos intuitiva que las de las otras herramientas, lo que ralentizó el avance en el modelado de piezas.

La Tabla 2 muestra gráficamente la diferencia en tiempo de formación de cada herramienta.

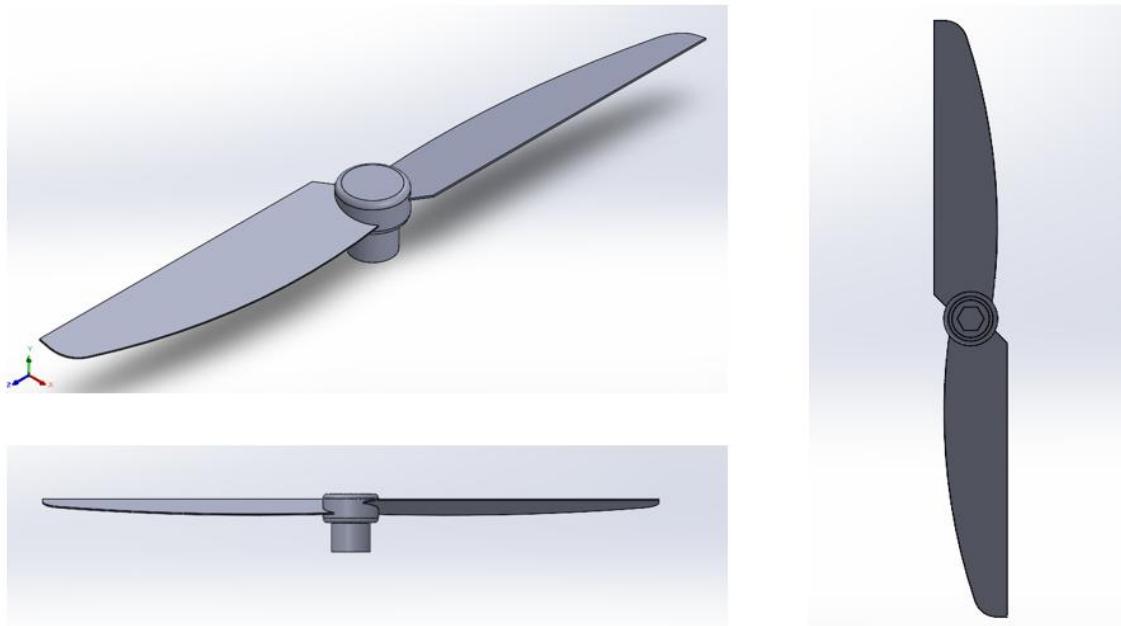


*Tabla 2: Tiempo de formación dedicado a cada herramienta de diseño CAD*

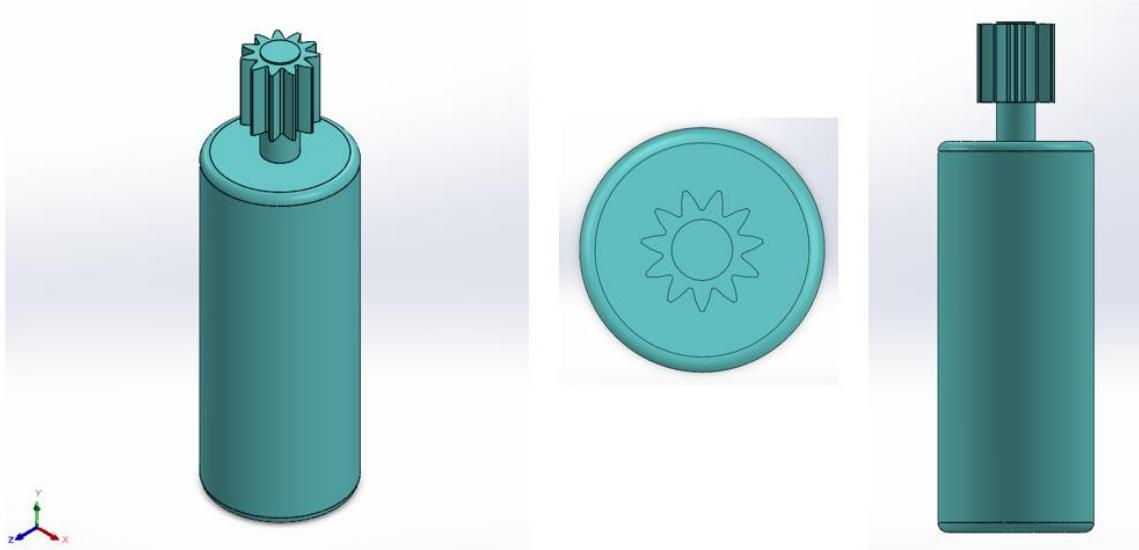
La Tabla 2 ilustra más claramente las diferencias en los tiempos de formación por cada herramienta. Si bien el tiempo empleado en SolidWorks sobrepasa las pautas establecidas para este estudio, el modelo realizado con Solid Edge ha requerido menor tiempo, y las piezas realizadas tanto con Solid Edge como CATIA V5 tienen menos errores o retrocesos en su ejecución.

A continuación, se muestran vistas de las piezas y ensamblajes realizados con cada uno de los programas.

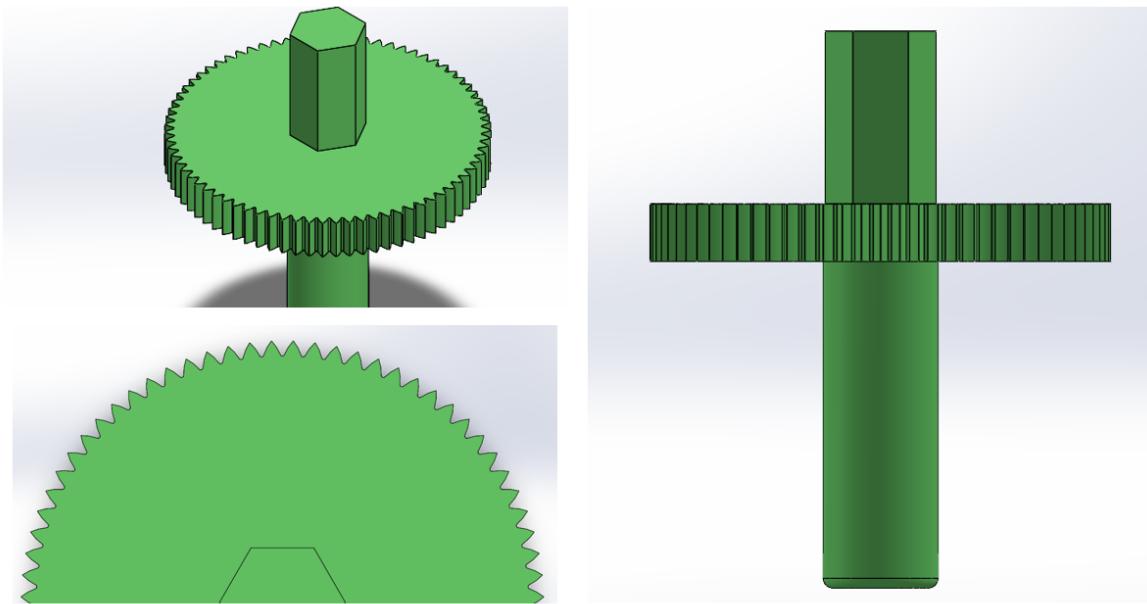
#### 4.1.1 SOLIDWORKS



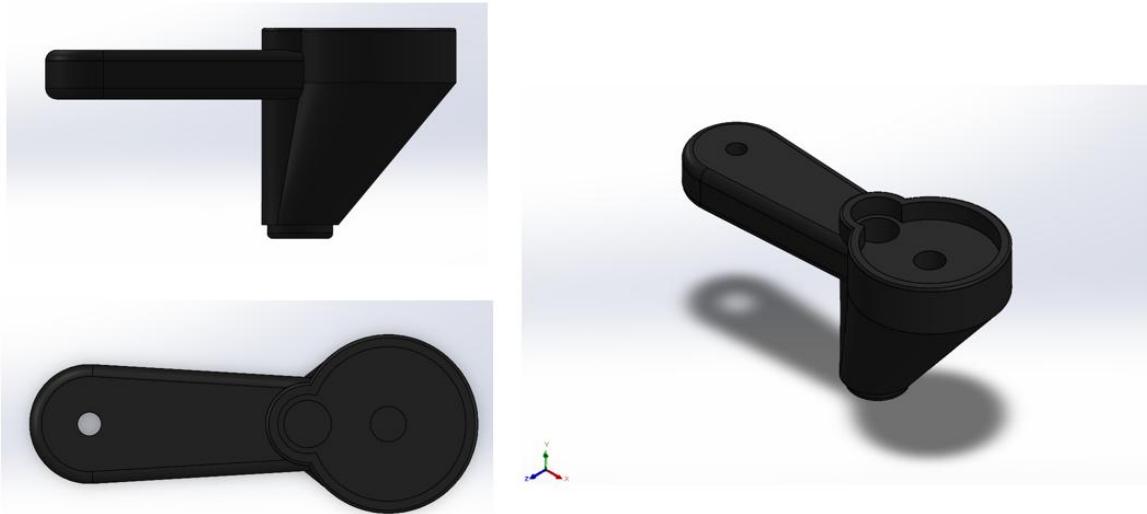
*Figura 9: Hélice del dron, realizada con SolidWorks*



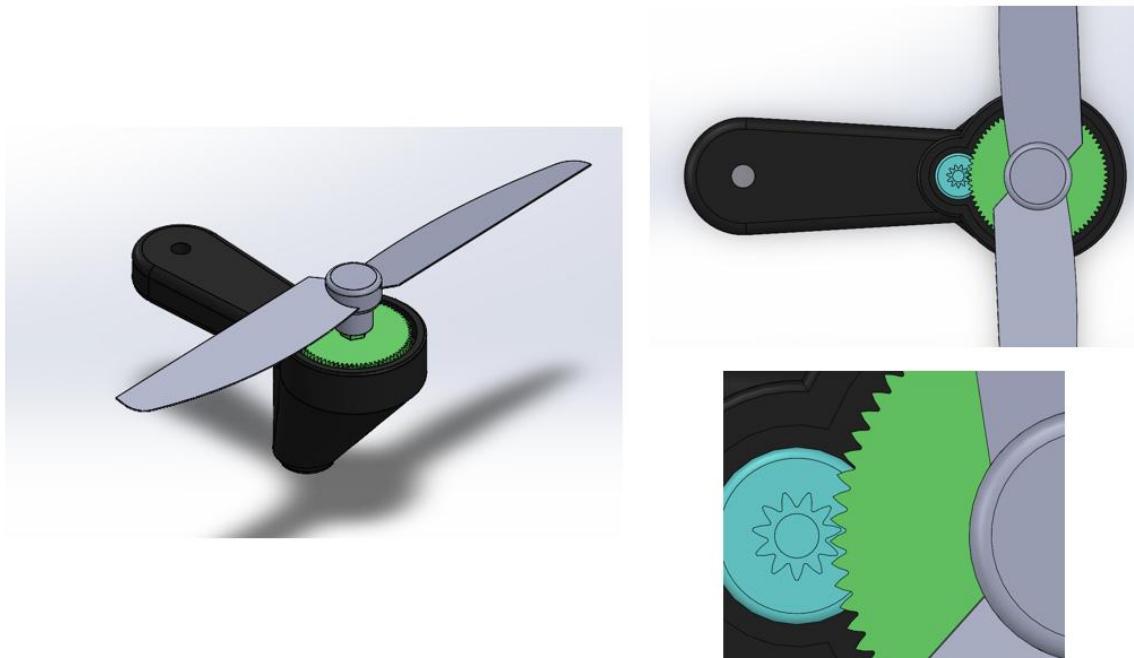
*Figura 10: Piñón del motor, realizado con SolidWorks*



*Figura 11: Engranaje reductor con eje hexagonal, realizado con SolidWorks*



*Figura 12: Carcasa de la hélice del dron, realizada con SolidWorks*



*Figura 13:Ensamblaje del sistema de la hélice del dron, realizado con SolidWorks*

SolidWorks posee una interfaz clara y sencilla, y presenta resultados muy buenos en conjuntos de complejidad baja o media como el realizado. Pese a haber invertido en su formación una cantidad de horas considerablemente mayor que para los otros programas, cuenta con el mayor número de errores o retrocesos. No obstante, esto tiene sentido ya que esta fue la primera herramienta con la que se intentó modelar el conjunto. A pesar de realizar el modelo con cada herramienta en días separados, influyó el hecho de que fuese la primera vez que se realizaba el conjunto. Por otro lado, el tiempo total de modelado se vio influenciado por el modo de ejecución de comandos, que requiere más pasos que otros programas presentes en este estudio para realizar operaciones sencillas.

#### 4.1.2 SOLID EDGE

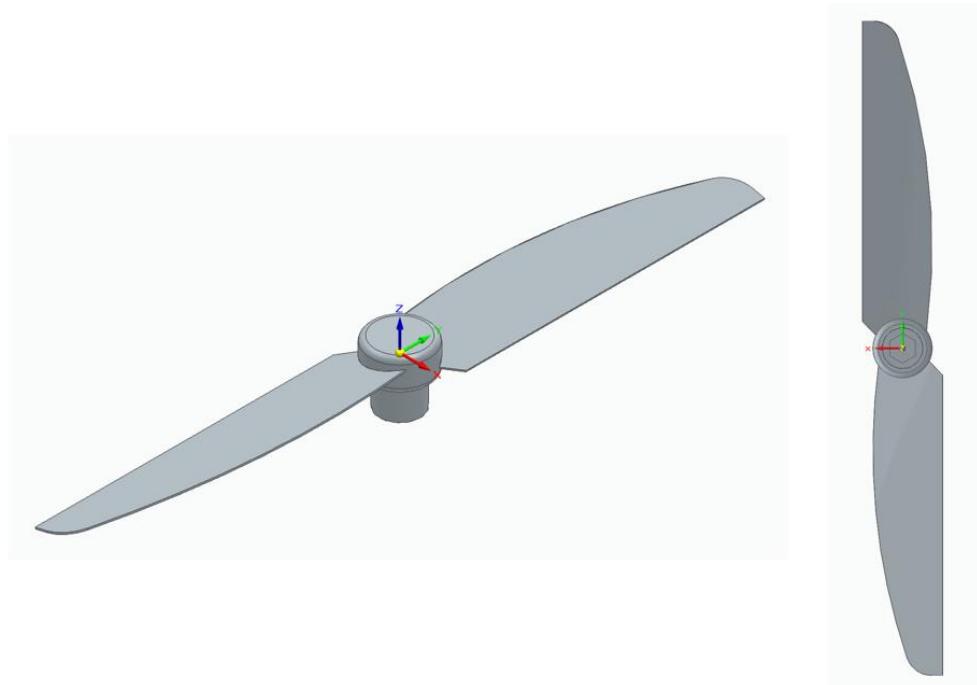
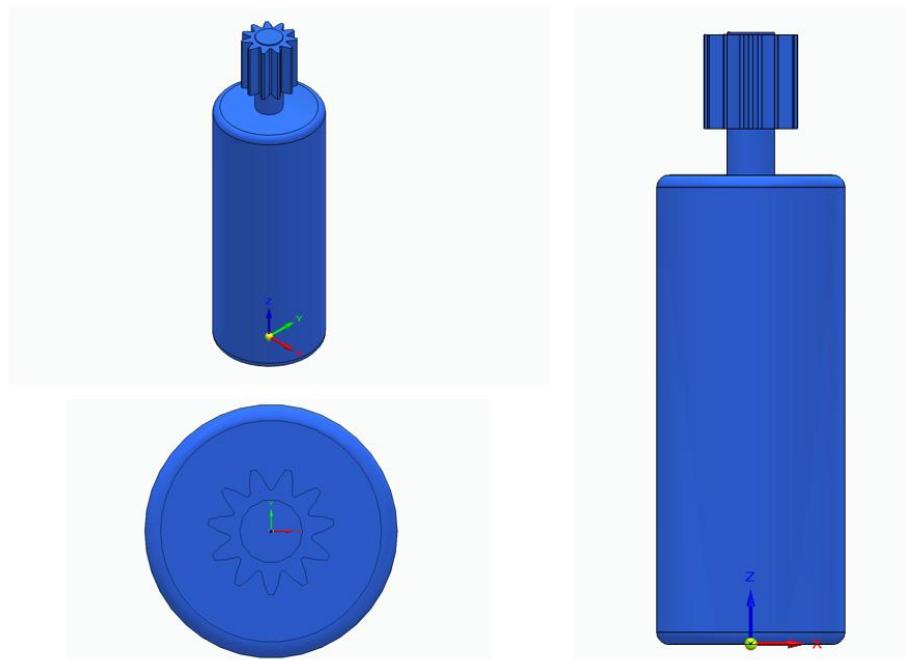
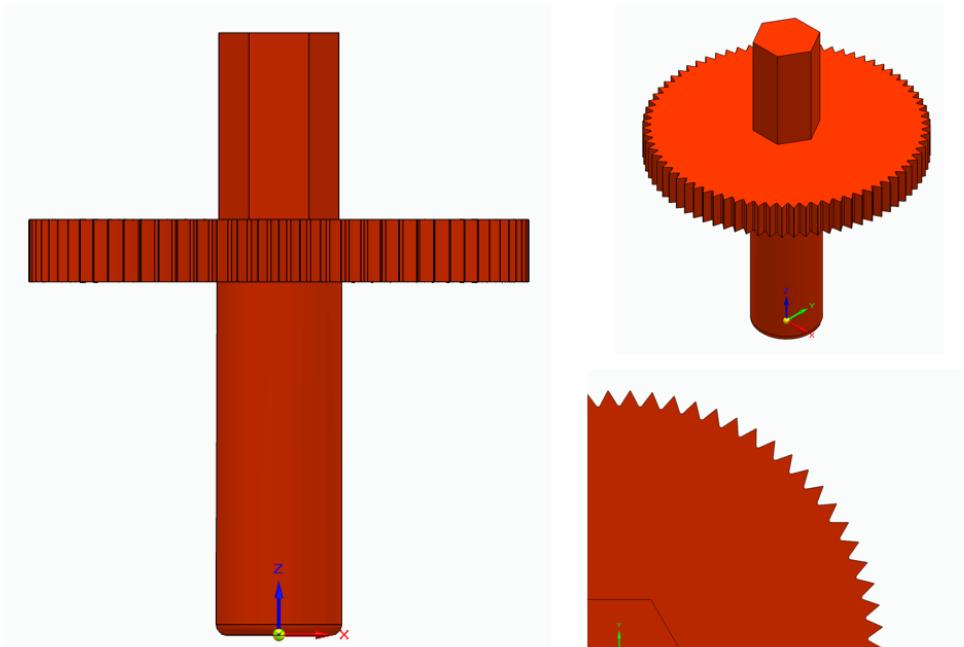


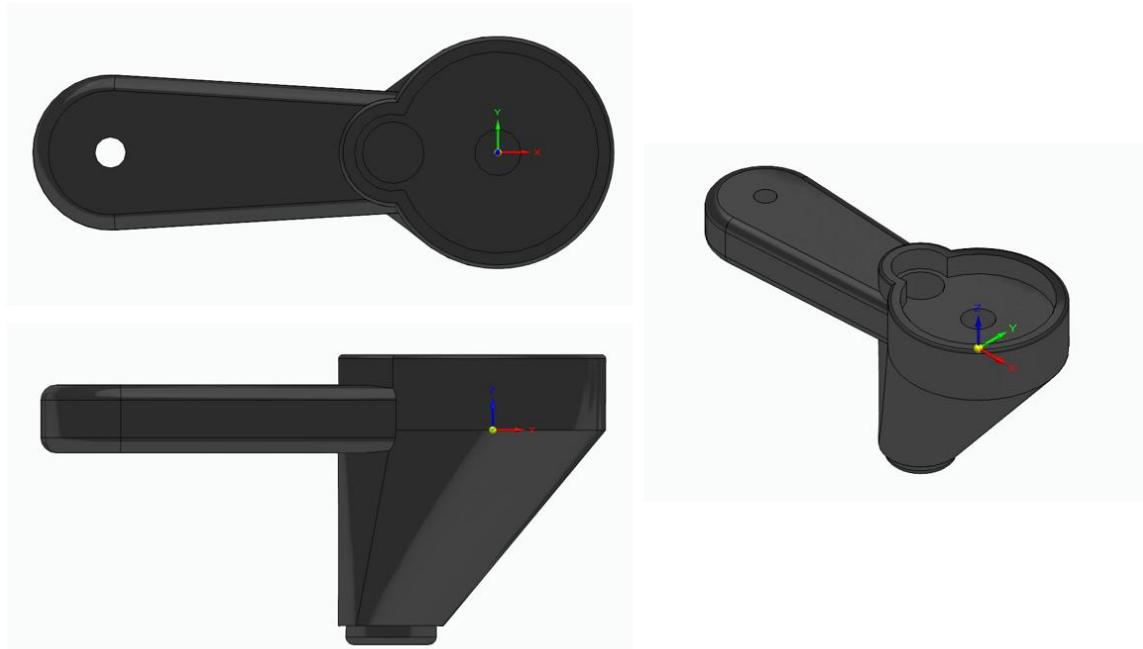
Figura 14: Hélice del dron, realizada con Solid Edge



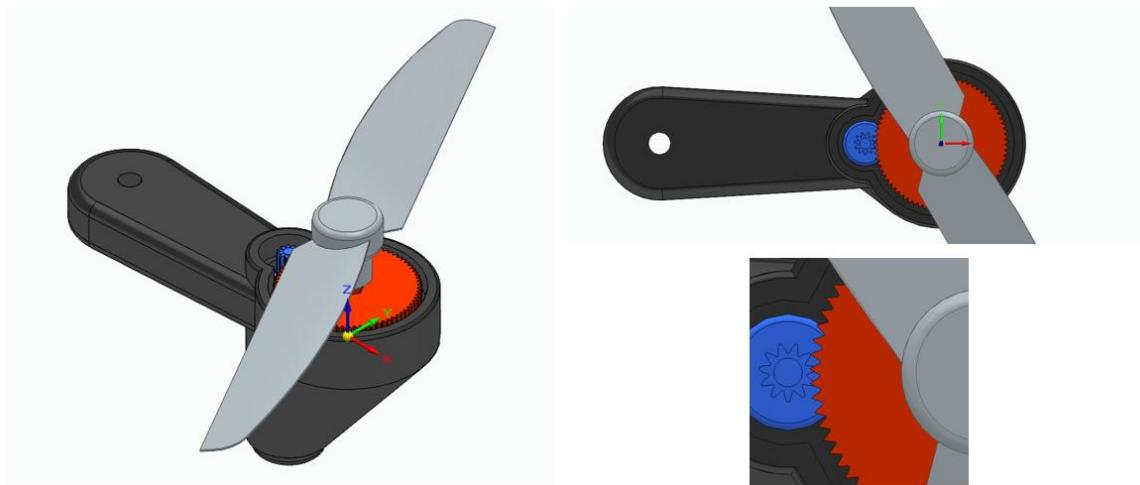
*Figura 15: Piñón del motor, realizado con Solid Edge*



*Figura 16: Engranaje reductor con eje hexagonal, realizado con Solid Edge*



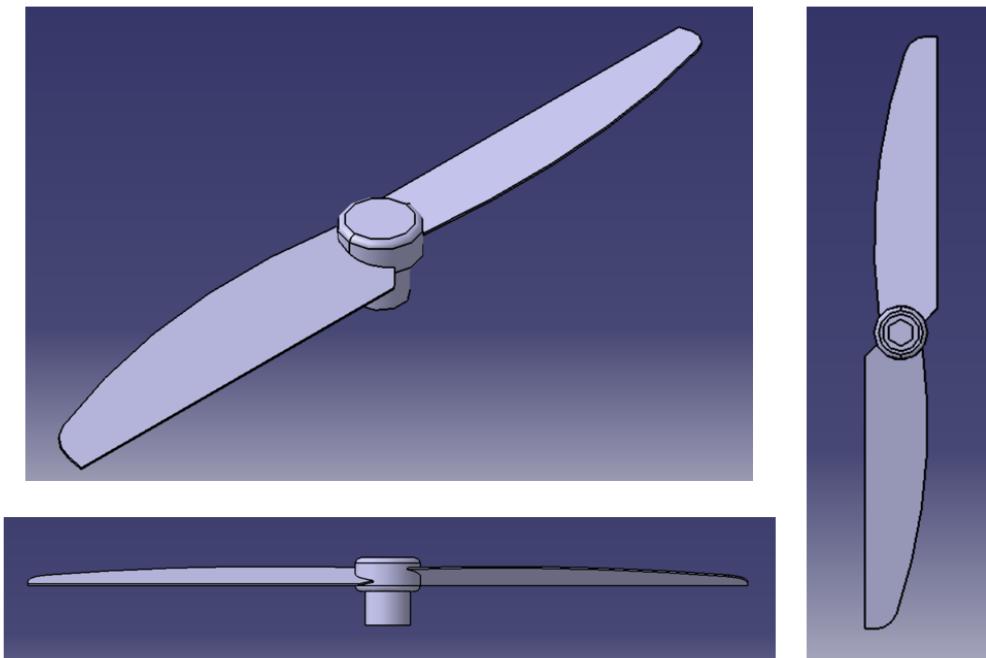
*Figura 17: Carcasa de la hélice del dron, realizada con Solid Edge*



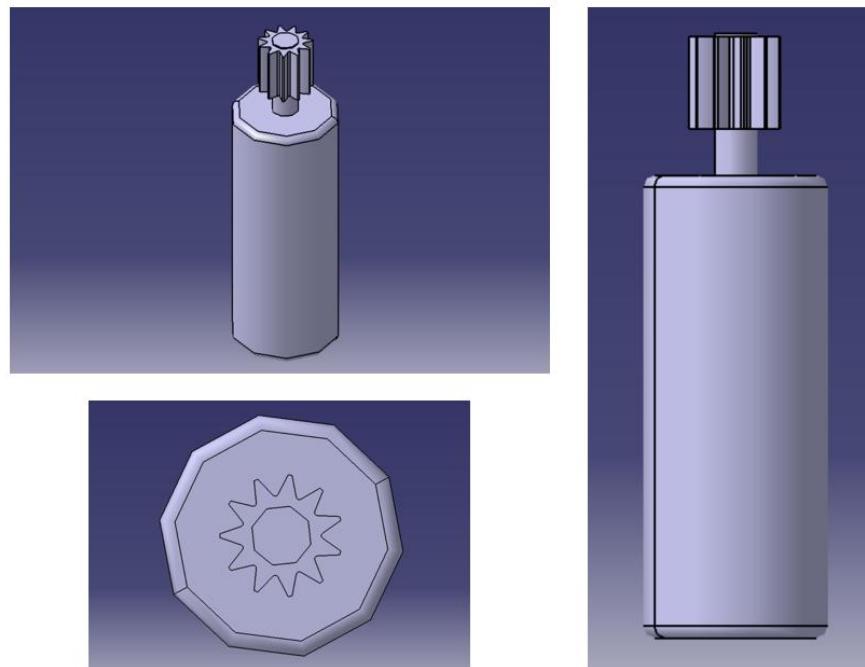
*Figura 18: Ensamblaje del sistema de la hélice del dron, realizado con Solid Edge*

Solid Edge cuenta con una interfaz similar a la de SolidWorks, lo cual se refleja en la similitud en apariencia de los resultados de los conjuntos realizados con ambos programas. Esto tiene como resultado que Solid Edge sea la herramienta con un menor tiempo de formación inicial. Sin embargo, en el desarrollo con Solid Edge se cometieron más errores que con CATIA V5. Esto se debe a que CATIA V5 tiene una interfaz paramétrica muy robusta y que no asume intuitivamente ningún paso del proceso. Esto ralentiza el tiempo de modelado frente a Solid Edge, pero permite localizar y prevenir errores más fácilmente, ya que el usuario es consciente de la mayor parte de las especificaciones que realiza. No obstante, las operaciones guiadas de Solid Edge resultaron beneficiosas en cuanto a la reducción del tiempo empleado en completar el modelo.

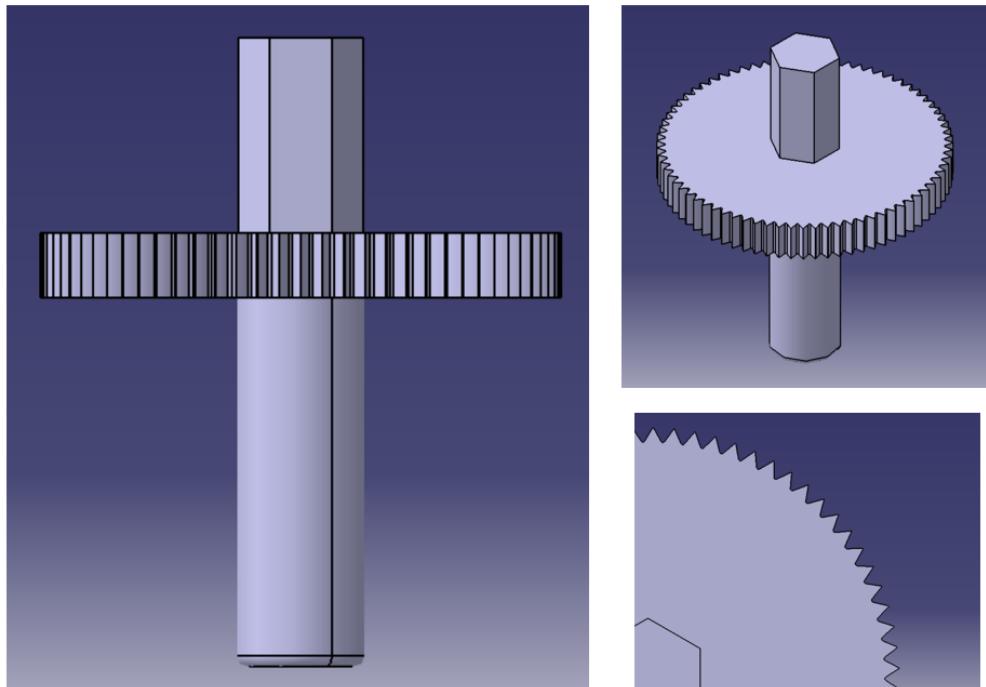
#### 4.1.3 CATIA V5



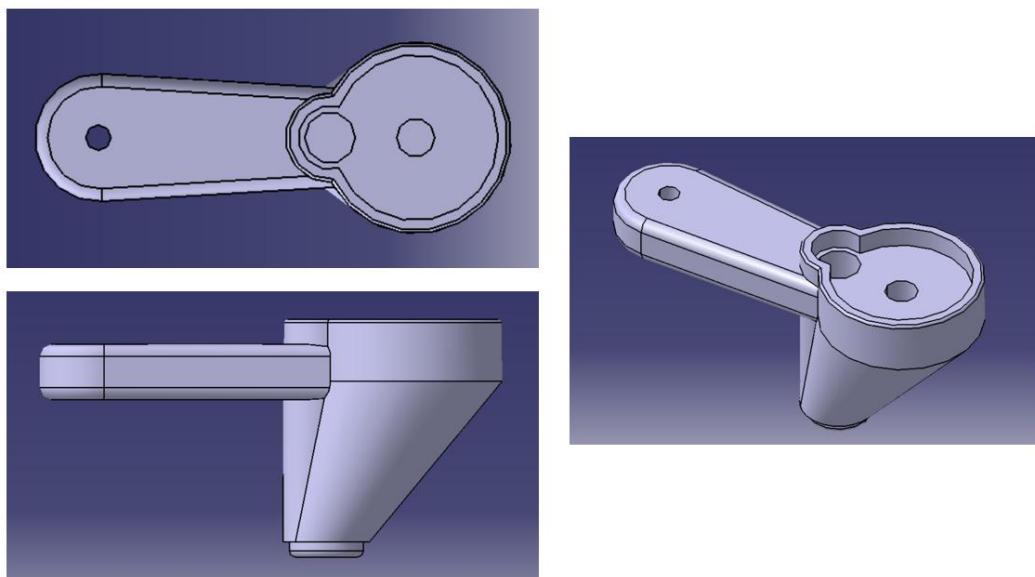
*Figura 19: Hélice del dron, realizada con CATIA V5*



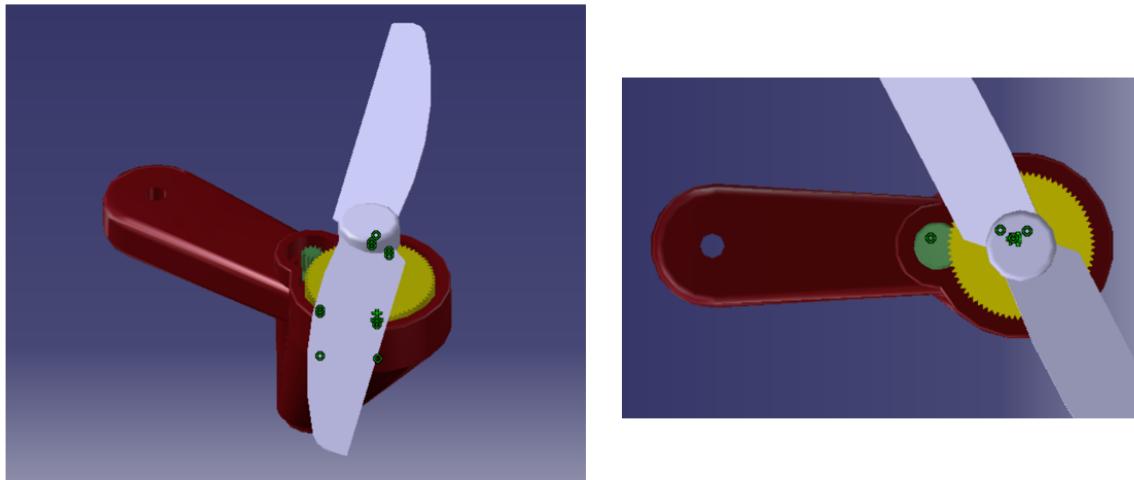
*Figura 20: Piñón del motor, realizado con CATIA V5*



*Figura 21: Engranaje reductor con eje hexagonal, realizado con CATIA V5*



*Figura 22: Carcasa de la hélice del dron, realizada con CATIA V5*



*Figura 23: Ensamblaje del sistema de la hélice del dron, realizado con CATIA V5*

Como se puede observar, la interfaz de CATIA V5 es la que más contrasta en apariencia con las otras herramientas que se comparan. Para conjuntos sencillos, realizar un modelo con CATIA V5 puede resultar desfavorable frente a otras herramientas más accesibles. En la Figura 20, se aprecia en la vista superior del piñón del motor cómo el perfil del cilindro creado se asemeja a un polígono en lugar de un círculo. Sin embargo, el software de CATIA V5 supera en capacidades a los de SolidWorks y Solid Edge, siendo capaz de trabajar con diseños avanzados y de complejidad más alta que los entornos con los que se le compara en este trabajo.

Pese a su gran nivel de detalle, modelar con CATIA V5 es un proceso más lento por su entorno parametrizado, y los comandos por defecto se encuentran ocultos, lo que interfiere con la agilidad a la hora de realizar estos modelos

## **4.2 ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEM)**

En cuanto a los análisis por elementos finitos, tras ejecutar las simulaciones pertinentes y la correspondiente toma de datos, se extrae la siguiente tabla de resultados:

	<b>Solid Edge</b>	<b>Ansys</b>
<b>Tiempo de formación [h]</b>	1,5	2,5
<b>Tiempo de resolución [s]</b>	18,71	6,62
<b>Desplazamiento máx. [mm]</b>	4,35E-03	8,07E-03
<b>Tensión máx. Von Mises [MPa]</b>	0,277	0,45485

*Tabla 3: Resultados análisis FEM*

Los tiempos de formación por cada herramienta difieren, pero esta disimilitud se considera proporcional dada la distinta extensión que abarca cada herramienta: Solid Edge se limita a un análisis estructural básico dentro de la propia interfaz de diseño CAD, mientras que Ansys posee diversos módulos que es preciso conocer antes de realizar un estudio de análisis FEM.

Se observan diferencias relevantes entre los análisis llevados a cabo por ambas herramientas. Pese a partir exactamente de la misma geometría y de un tamaño de malla de 2 mm para ambos softwares, Solid Edge tiene un tiempo de resolución significativamente mayor, llegando casi a triplicar el tiempo de Ansys.

Los resultados numéricos extraídos del postprocesado también difieren. El desplazamiento máximo obtenido con Ansys es x1,85 veces mayor que el obtenido por el análisis de Solid Edge. No obstante, se está trabajando con desplazamientos de un tamaño muy pequeño en comparación a la geometría, por lo que esta diferencia no resulta tan significativa.

La magnitud de estos desplazamientos se debe a la carga aplicada en función de las dimensiones. El perfil alar cuenta con una longitud de 10 mm y ha sido extruido 200 mm. Por tanto, una aproximación razonable sería determinar que la superficie sobre la que se aplica la presión es la siguiente:

$$A = 10 \text{ mm} * 200 \text{ mm} = 2000 \text{ mm}^2$$

Con una presión aplicada de 5000 Pa, la fuerza total sobre la estructura será:

$$F = P * A = 5000 \text{ Pa} * 2000 * 10^{-6} \text{ m}^2 = 10 \text{ N}$$

Este valor de fuerza para la estructura total del ala es un valor bajo. En este estudio se han impuesto valores representativos de presión con el objetivo de centrarse en la comparación

por lo que la magnitud de estos desplazamientos queda justificada. Esto también implica que las tensiones equivalentes de Von Mises extraídas serán igualmente bajas, ya que las tensiones se calculan siguiendo la ecuación E. 1:

$$E. 1 \quad \sigma = \frac{F}{A}$$

Estas tensiones están concentradas en una sección transversal. Dado que el perfil alar NACA 2412 tiene una altura máxima de 1,211 mm, esta sección transversal se puede aproximar al área que se expresa a continuación:

$$A = 10 \text{ mm} * 1,211 \text{ mm} = 12,11 \text{ mm}^2$$

Sustituyendo este valor y el valor de fuerza de 10 N obtenido en la ecuación E. 1, se obtiene la siguiente tensión:

$$E. 2 \quad \sigma = \frac{10 \text{ N}}{12,11 \text{ mm}^2} = 0,8258 \text{ MPa}$$

Por tanto, la magnitud de las tensiones equivalentes será del orden de la tensión obtenida en la ecuación E. 2, lo que se confirma por los valores obtenidos en la Tabla 3.

Las tensiones máximas de Von Mises obtenidas en la Tabla 3 de resultados varían, pero ambas se encuentran muy por debajo del límite elástico del Aluminio 7075-T6, que es de 503 MPa.

Por tanto, estos resultados indican diferencias notables entre las dos herramientas de análisis y simulación FEM. Se toman como buenos los resultados dados por la simulación de Ansys, ya que es una herramienta más potente y especializada en análisis estructurales, mientras que se concluye que los resultados del análisis realizado por Solid Edge son menos precisos al ser un entorno integrado como parte de un programa de diseño CAD.

#### 4.2.1 MALLADO

Aplicadas las condiciones de contorno especificadas en el capítulo anterior, se aplicó el mallado de tamaño 2 mm. Las siguientes figuras los resultados de dichos mallados realizados con cada herramienta

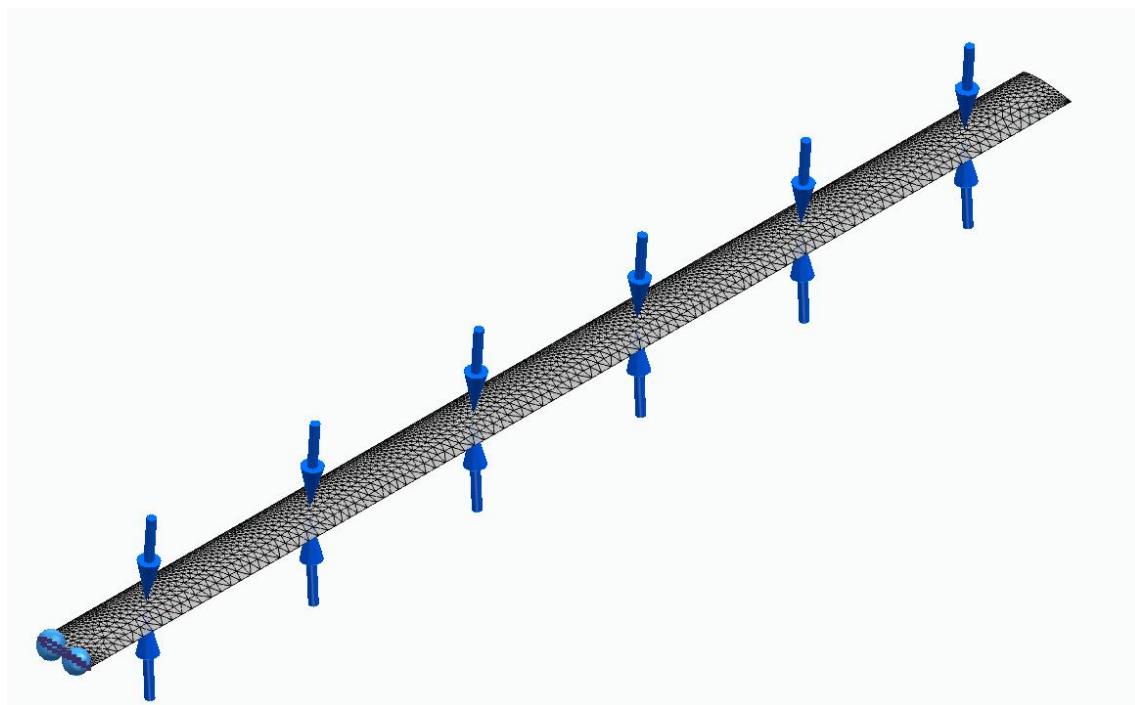


Figura 24: Mallado realizado con Solid Edge

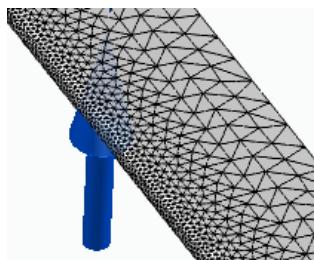
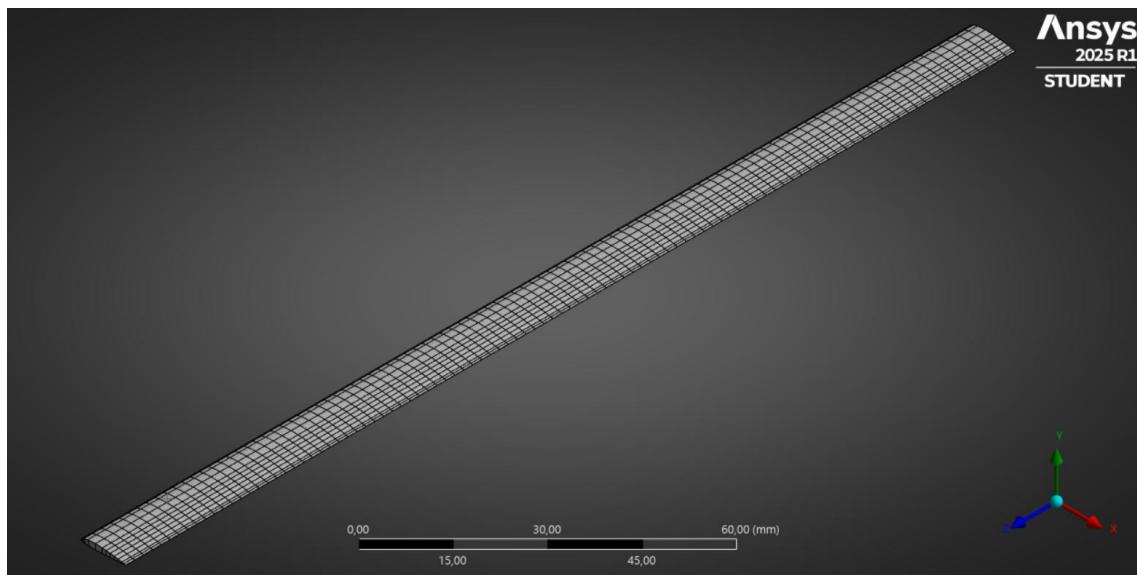


Figura 25: Vista ampliada de la geometría de mallado creada por Solid Edge



*Figura 26: Mallado realizado con Ansys*

Hay una clara diferencia geométrica entre los mallados realizados por cada programa, a pesar de haber establecido un mismo tamaño de malla. Cada programa elige automáticamente la geometría que mejor se adapte al modelo por cada iteración, según la geometría del modelo a analizar y el tamaño de malla. Esto fue observado realizando el análisis de convergencia de malla con Ansys, durante el cual el patrón de mallado variaba según el tamaño de malla introducido, hasta llegar al tamaño óptimo de 2 mm.

Por otro lado, la geometría más simple de Ansys influye en el tiempo de resolución, haciendo que sea significativamente menor que el de Solid Edge. Este patrón resulta más adecuado ya que la geometría del ala no es especialmente compleja.

#### 4.2.2 RESULTADOS NUMÉRICOS

Los resultados de las simulaciones de las herramientas se muestran en los siguientes diagramas de deformación y tensión de Von Mises.

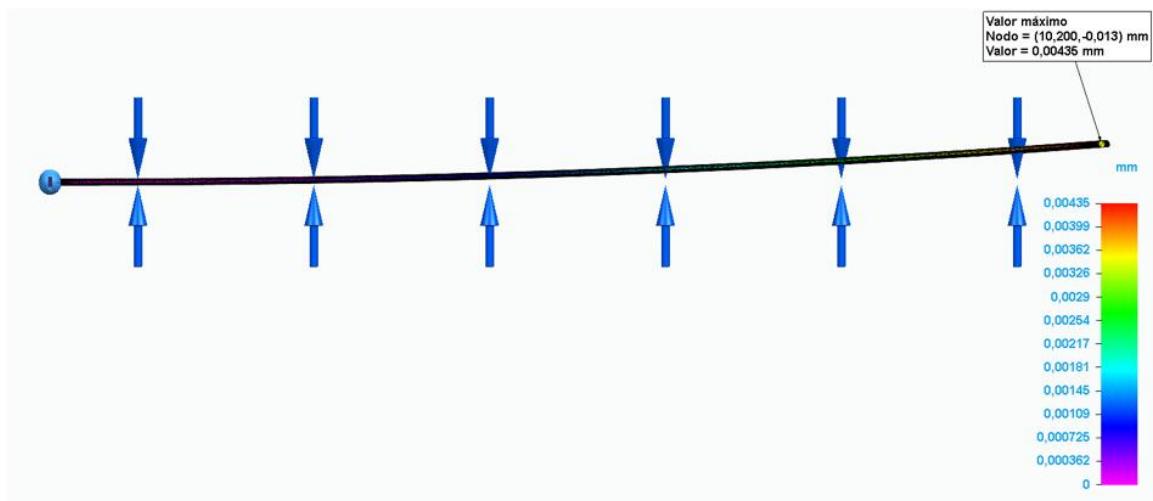


Figura 27: Vista lateral del desplazamiento máximo en Solid Edge

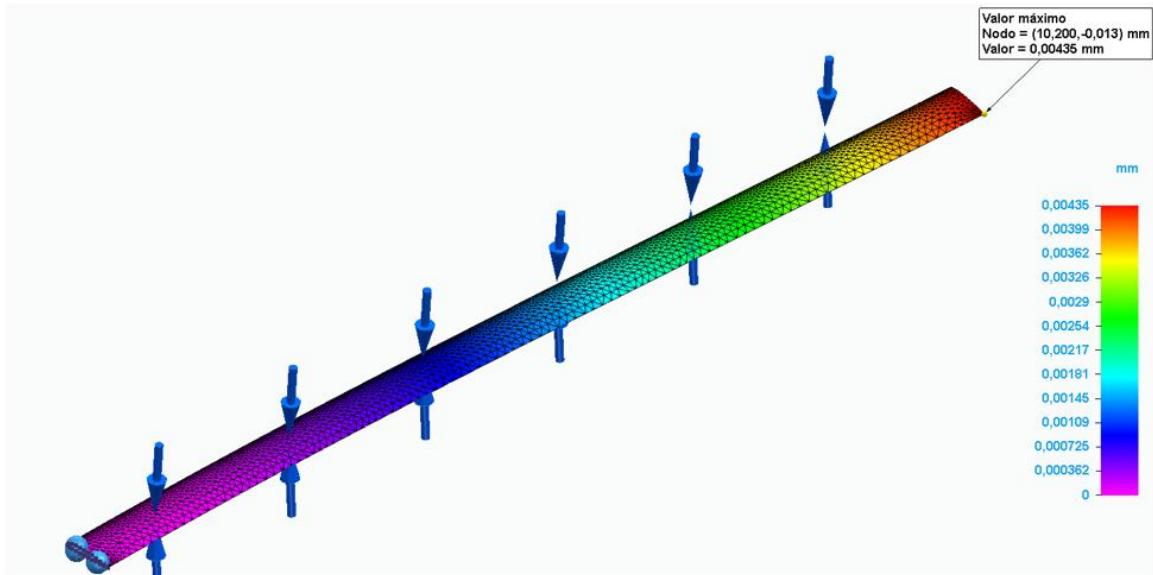


Figura 28: Diagrama de desplazamiento total realizado con Solid Edge

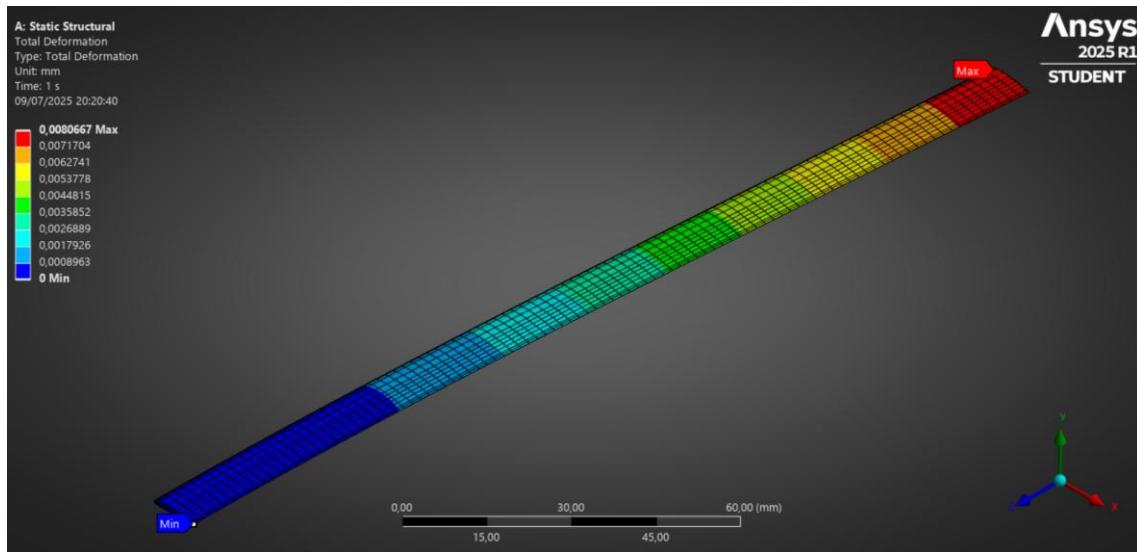


Figura 29: Diagrama de desplazamiento total realizado con Ansys

Como era de esperar, el desplazamiento máximo se encuentra en la cara opuesta al empotramiento, ya que es el borde libre del ala. Sin embargo, se observa que el punto de desplazamiento máximo en cada programa se encuentra en extremos opuestos. Esto puede deberse a que la variación en calidad del mallado de cada herramienta, ya que Solid Edge ha creado más nodos alrededor del borde de salida, encontrando así su nodo con mayor desplazamiento.

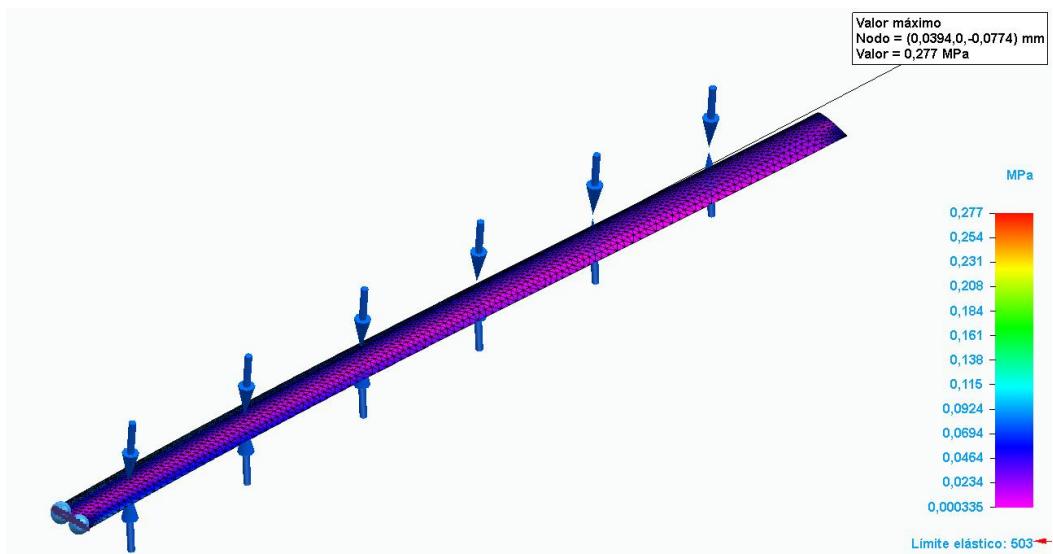


Figura 30: Diagrama de tensión equivalente de Von Mises, realizado con Solid Edge

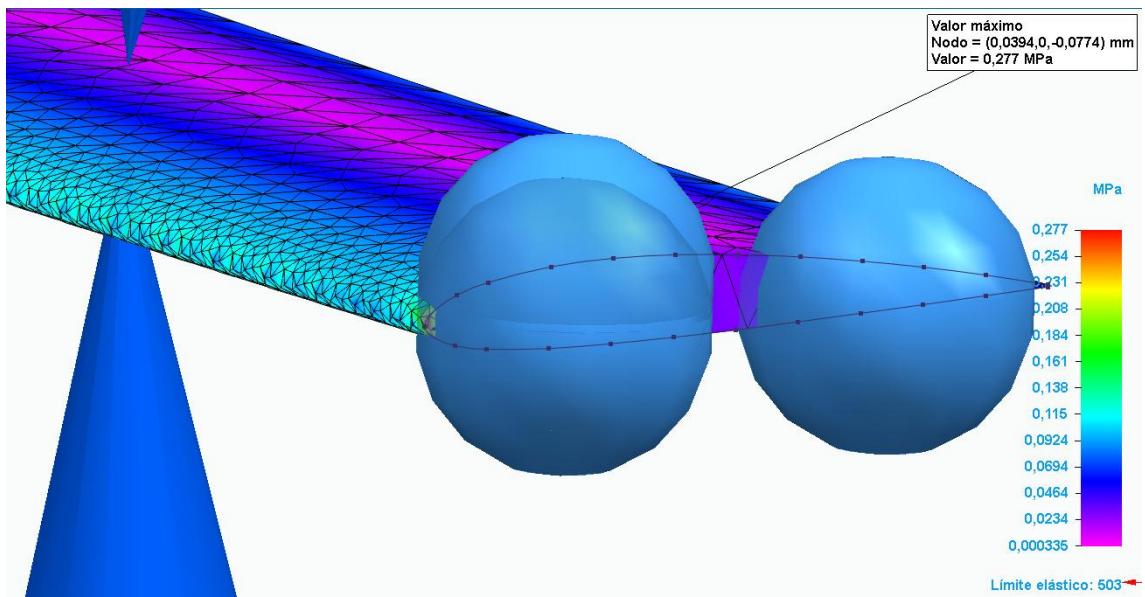


Figura 31: Localización de la tensión máxima de Von Mises por Solid Edge

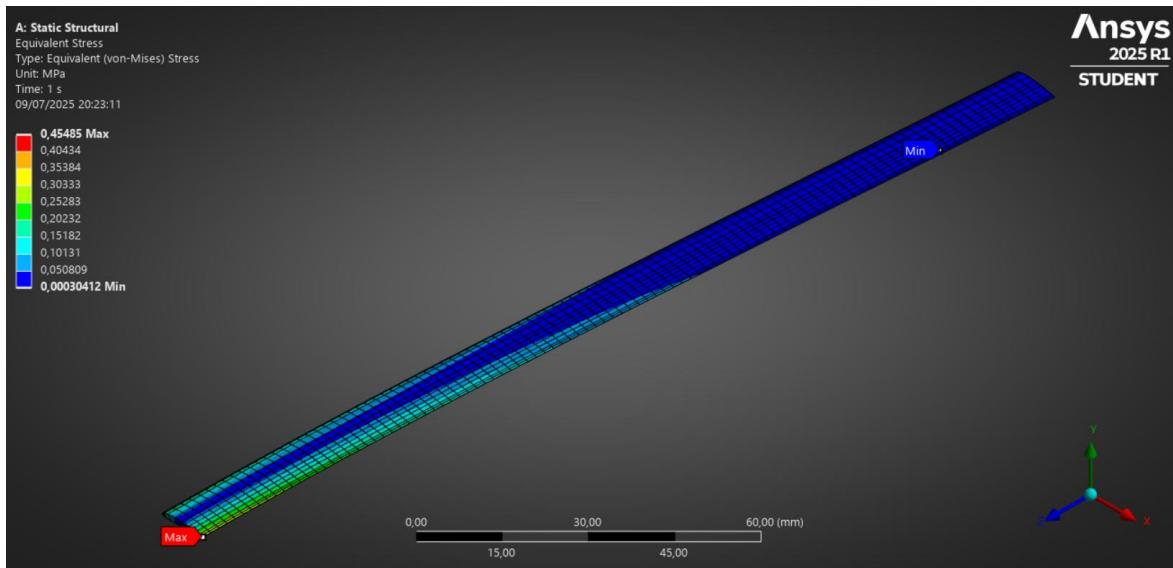


Figura 32: Diagrama de tensión equivalente de Von Mises, realizado con Ansys

Una vez más, se extraen las mismas conclusiones que del análisis de los diagramas de desplazamientos. En este caso, la tensión máxima de Von Mises se encuentra en el empotramiento, ya que el momento flector es máximo en esta zona, pero los puntos de máxima tensión vuelven a estar en extremos opuestos de la sección transversal en cada programa. El resto del diagrama sí sigue el mismo patrón para ambas herramientas.

## Capítulo 5. ESTUDIO ECONÓMICO

Durante este apartado, se realizará un estudio centrado en calcular los costes de inversión y de operación y mantenimiento de las cuatro herramientas con las que se trabaja en este TFG, añadiendo de forma extraordinaria Femap a los cálculos. El objetivo del estudio es aportar una información adicional valiosa para la comparativa del siguiente apartado, con el fin último de ayudar a empresas e ingenieros a la hora de decidir en qué soluciones invertir.

Para llevar a cabo el estudio, se tendrán en cuenta la inversión en infraestructura informática, costes de licencias, costes de formación y costes de mantenimiento y soporte, es decir, todos los costes recurrentes y necesarios para que la herramienta pueda ser utilizada a lo largo del tiempo. Al desconocerse el tamaño de la empresa, se asume durante todo el estudio que se está invirtiendo en una licencia de una herramienta para una persona con un equipo informático.

En primer lugar, se calculan los costes de inversión. Un equipo informático capaz de trabajar con las herramientas CAD-FEM aquí comparadas debería cumplir con las especificaciones detalladas en la Figura 33.

Componente	Modelo Recomendado
Procesador (CPU)	Intel Core i9-13900K / AMD Ryzen 9 7950X
Tarjeta Gráfica (GPU)	NVIDIA RTX A4000 / RTX A5000
Memoria RAM	64 GB DDR5 6000 MHz
Almacenamiento (SSD)	2 TB NVMe SSD (Samsung 980 Pro)

*Figura 33: Especificaciones técnicas recomendadas para ordenador de uso CAD-FEM [16]*

El precio de una estación de trabajo con estas especificaciones se encuentra en un rango de 4500 – 6000 €. Para el estudio se asume un precio de 5250 €. También se añadirá un monitor adicional, muy común en el trabajo de diseño mecánico. Este precio varía entre 300 – 500 €,

por lo que se tomará un precio de 400 €. Con todo esto, ya se puede estimar la inversión,  $INV$ .

$$INV = 5250 + 400 = 5650 \text{ €}$$

La amortización anual ( $A$ ) de esta inversión, asumiendo una vida útil ( $N$ ) de 5 años y una tasa de descuento  $i$ , viene dada por la siguiente ecuación E. 3.

$$E. 3 \quad A = INV * \left[ \frac{i * (1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right] = INV * f_a$$

Al considerar en este estudio  $i = 0$ , se obtiene la ecuación E. 4.

$$E. 4 \quad \lim_{i \rightarrow 0} f_a = \frac{1}{N}$$

Combinando las ecuaciones E. 3 y E. 4 se obtiene la amortización anual de la inversión en infraestructura informática:

$$A = \frac{INV}{N} = \frac{5650 \text{ €}}{5} = 1130 \text{ €}$$

En segundo lugar, se calculan los costes de operación anuales. Para calcularlo se va a tener en cuenta los costes de licencias, formación inicial, y soporte y mantenimiento. En la Tabla 4 se muestran todos estos costes anuales para cada herramienta [17] [18] [19]. Para los costes de formación inicial se ha estimado una vida útil de 5 años para ese conocimiento adquirido, por lo que el coste anual se distribuye equitativamente a lo largo de esa vida útil, por ser un intangible. Para los costes de soporte y mantenimiento, a falta de cifras públicas sobre este coste para algunas herramientas, se ha observado a partir de los datos conocidos que este mantenimiento supone un 20 – 25 % de la licencia anual de cada programa, por los que en los casos sin datos se asume que este coste es un 22,5% de la licencia anual.

Herramienta	Licencia anual [€]	Formación inicial [€]	Formación inicial anual [€]	Soporte y mantenimiento [€]	Coste de operación anual [€]
<b>SolidWorks</b>	6300	2500	500	1824	8624
<b>Solid Edge</b>	3429,47	2500	500	771,63	4701,10
<b>CATIA</b>	7000	5000	1000	2300	10300
<b>Ansys</b>	25662	4000	800	5773,95	32235,95
<b>*Femap</b>	5856	3000	600	1317,60	7773,60

Tabla 4: Coste de operación anual para cada herramienta

Finalmente, se juntan los datos obtenidos sobre coste de inversión y costes operativos para establecer el coste total anual de implementar cada una de estas herramientas en una empresa. Todo esto queda reflejado en la siguiente tabla:

Herramienta	Coste de operación [€]	Amortización de la inversión [€]	Coste total anual [€]
<b>SolidWorks</b>	8624	1130	9754
<b>Solid Edge</b>	4701,10	1130	5831,1
<b>CATIA</b>	10300	1130	11430
<b>Ansys</b>	32235,95	1130	33365,95
<b>*Femap</b>	7773,60	1130	8903,60

Tabla 5: Coste total anual para cada herramienta

La Tabla 6 ilustra gráficamente estos costes totales para valorar con más claridad los resultados obtenidos.

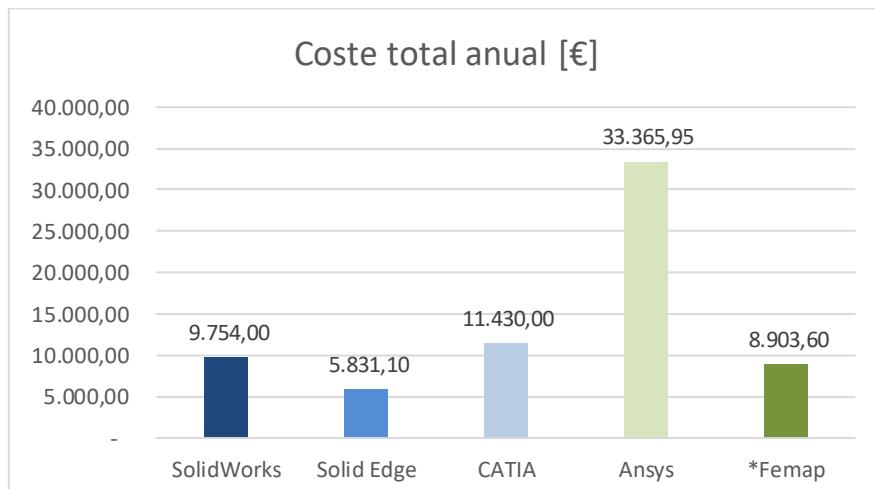


Tabla 6: Gráfico de barras del coste total anual por herramienta

CATIA V5 y Ansys presentan los costes anuales más altos. Esto es debido al enfoque que hacen estas herramientas en proyectos de alta complejidad, lo que se traduce en unas licencias más avanzadas que incrementan su coste frente a otras soluciones.

El coste anual más bajo es el de Solid Edge, y su modelo híbrido de integración CAD-FEM lo hace aún más competitivo frente a herramientas especializadas de coste mayor.

SolidWorks presenta un precio más competitivo que CATIA V5, pero su licencia limitada al diseño CAD rebaja su atractivo frente a Solid Edge.

Ansys es con diferencia la herramienta más costosa de todas, llegando a casi triplicar a la siguiente herramienta. Atendiendo únicamente al punto de vista económica, esta inversión tan significativa solo tendría sentido en empresas grandes que utilicen simulaciones de muy alta precisión, o que puedan considerar la opción de adquirir licencias perpetuas, lo cual rebajaría los costes anuales.

Finalmente, aunque no se haya podido evaluar la facilidad de uso de Femap, asumiendo que su tiempo de formación ha sido el mismo que el de Ansys, su coste es el segundo más bajo de toda la comparación. Esto lo convierte en una herramienta muy atractiva para empresas de menor tamaño cuyos objetivos están alineados con la ejecución de análisis FEM avanzados, manteniendo la especialización de Ansys a un precio que se acerca a los de programas integrados como Solid Edge.

## **Capítulo 6. CONCLUSIONES**

### **6.1 COMPARATIVA GLOBAL**

A lo largo de este proyecto, se han pretendido evaluar de forma práctica las herramientas más presentes actualmente en la industria aeronáutica desde el punto de vista del diseño CAD y del análisis FEM, con objeto de establecer las ventajas y desventajas de cada una.

Las conclusiones obtenidas pueden servir como referente para ingenieros del sector aeronáutico y empresas de la industria dedicadas al diseño mecánico, pues nunca antes se había realizado un estudio de esta naturaleza. El coste de licencias, mantenimiento y formación en estos programas supone un porcentaje considerable de los gastos anuales de una empresa de ingeniería, y el tiempo (otro recurso clave para los profesionales) dedicado a utilizar estas herramientas de forma efectiva se puede agilizar si se conocen bien estas herramientas y las fortalezas y debilidades de cada una.

Los resultados indican que Solid Edge es una herramienta eficiente, especialmente en diseño CAD, por el balance que hace entre el tiempo de formación inicial requerido para un usuario que empieza a utilizarla y los resultados que muestra en agilidad y precisión a la hora de desarrollar un modelo. En cuanto a análisis FEM, Ansys es superior tanto en capacidades técnicas como resolución y precisión, obteniendo resultados detallados en menor tiempo. Sin embargo, su coste económico es considerablemente superior al de cualquier otra herramienta. Asimismo, Femap también se presenta como una herramienta altamente competitiva en el sector. A pesar de que posee menos popularidad en la industria que Ansys, es un programa potente en capacidades y eficiente en coste, por lo que definitivamente supone una herramienta a considerar.

Desde el punto de vista económico, Solid Edge presenta el menor coste total anual (5.831,10€), mientras que Ansys por otro lado supone una inversión significativamente mayor. Pese a que las capacidades técnicas de cada herramienta varían, todas son capaces

de cumplir con sus objetivos de diseño CAD o simulación FEM, por lo que este factor no eliminaría ninguna solución a la hora de decidir. Sin embargo, el coste tan alto de Ansys sí puede suponer una barrera de entrada para ciertas empresas de menor tamaño, viéndose obligadas a descartarla como opción.

## **6.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS**

Herramienta por herramienta, las ventajas y desventajas principales encontradas como resultado de este proyecto son las siguientes:

- **SolidWorks:** entre sus ventajas se destacan la interfaz intuitiva, junto con un entorno robusto y completo para modelado CAD. Dispone de diversos entornos y una buena integración con otras herramientas industriales de fabricación CAM. Sin embargo, en cuanto a los datos cuantitativos obtenidos en este TFG se destacan más desventajas que ventajas: su alto tiempo de formación inicial, aunque puede servir como base para aprender otras herramientas como Solid Edge, se traduce en un lento progreso inicial, lo que alarga la curva de aprendizaje en un entorno en el que el tiempo es muy valioso. Su alto número de errores y retrocesos refleja un impacto negativo en la productividad, y aunque su coste total anual es competitivo, se encuentra en un punto medio en esta comparación y tampoco lo hace destacar.
- **Solid Edge:** sus ventajas más destacables son el tiempo de formación reducido, acelerado por el amplio acceso a documentación técnica y de apoyo por parte de los distribuidores, y su bajo tiempo de modelado CAD frente a las herramientas con las que se le compara. Además, su coste total anual es el más bajo de las comparativas. Todo esto ya lo convierte en la solución CAD más eficiente a nivel global. Por otro lado, su entorno de análisis FEM, aunque proporciona resultados coherentes, tiene un rendimiento mucho menor que el de herramientas especializadas como Ansys.
- **CATIA V5:** como ventaja, presenta un equilibrio entre el tiempo de modelado y los errores o retrocesos cometidos. Como plataforma, resulta más potente que sus competidores en entornos de diseño complejo, lo que le da una ventaja en el sector aeronáutico. Sus desventajas más importantes son su alto tiempo de formación

inicial, sin indicadores claros de una eficacia más alta en comparación, y su elevado coste total anual que, salvo el caso de una empresa muy exigente y de ingeniería compleja, no muestra ventajas frente a otras soluciones del mercado.

- **Ansys:** como simulador FEM, posee un excelente rendimiento en términos de tiempo de resolución y resultados numéricos, lo que le da una gran ventaja. Además es un entorno con presencia fuerte a nivel mundial y amplio reconocimiento. Sin embargo, se destaca como desventaja principal su alto coste total anual, que la hace inaccesible para un buen porcentaje de empresas.
- **\*Femap:** su mayor ventaja es su precio fuertemente competitivo frente al de Ansys, y su especialización en análisis FEM proporciona resultados más precisos que los de Solid Edge. Por el contrario, su mayor desventaja de cara a este estudio ha sido la imposibilidad de incluirlo en la comparación práctica de análisis FEM, por lo que la única desventaja resaltante es su falta de un entorno o módulo de diseño CAD donde poder generar las geometrías previas al análisis, lo que lo hace dependiente de otras herramientas externas.

### ***6.3 CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES FUTURAS***

En base al estudio completo, se puede concluir que Solid Edge presenta la mejor relación calidad-precio, con un robusto entorno de diseñado CAD, y un módulo de análisis FEM algo más débil, pero que proporciona resultados aceptables. Por tanto, resulta una herramienta especialmente útil en entornos que valoren la reducción de costes y donde la simulación FEM no sea prioritaria.

Ansys es una opción excelente en cuanto a simulación FEM avanzada y precisa, y con otros modelos de análisis disponibles. Sin embargo, solo se recomendaría en empresas asentadas en el sector y de gran tamaño que puedan asumir este coste, además del de una herramienta de diseño CAD externa.

Finalmente, SolidWorks y CATIA V5 resultan recomendables para empresas de tamaño medio-grande y que cuentan con profesionales ya formados en estas herramientas, evaluando adicionalmente el volumen de trabajo.

Mirando al futuro, se recomienda hacer una revisión de este trabajo en los próximos diez años, ya que el mundo del diseño CAD-FEM se encuentra todavía en plena expansión y desarrollo tecnológico, comenzando a implementar herramientas de Inteligencia Artificial (IA) o el diseñado en entornos de Realidad Virtual (RV).

## Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «NACA 4 digit airfoil generator (NACA 2412 AIRFOIL)». Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>
- [2] W. A. Khan, V. Esat, M. Hammad, H. Ali, M. Q. Zafar, y R. Ali, *Computer aided engineering design and manufacturing: a fourth industrial revolution perspective.* en Springer series in advanced manufacturing. Cham: Springer, 2025.
- [3] David F. Winkler y Julie L. Webster, *Searching the Skies: The Legacy of the United States Cold War Defense Radar Program.* Langley AFB, VA: Headquarters Air Combat Command, 1997.
- [4] O. G. Woge, C. O. G. Morán, y A. L. Chau, «Introducción al método del elemento finito: Solidworks y Matlab», *Ideas En Cienc. Ing.*, vol. 1, n.<sup>o</sup> 1, Art. n.<sup>o</sup> 1, jun. 2020.
- [5] Dassault Systèmes, «CAD 3D de SOLIDWORKS | SOLIDWORKS». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-3d-cad>
- [6] Siemens, «Solid Edge - edición para estudiantes», Siemens Digital Industries Software. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://resources.sw.siemens.com/es-ES/download-solid-edge-student-edition/>
- [7] Dassault Systèmes, «CATIA», Dassault Systèmes. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/products/catia>
- [8] ANSYS, Inc., «Ansyst Student Versions | Free Student Software Downloads». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ansys.com/academic/students>

- [9] Siemens, «Simcenter Femap», Siemens Digital Industries Software. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://plm.sw.siemens.com/es-ES/simcenter/mechanical-simulation/femap/>
- [10] S. Tornincasa, «THE FUTURE AND THE EVOLUTION OF CAD», presentado en 14th International Research/Expert Conference «Trends in the Development of Machinery and Associated Technology», TMT 2010, Mediterranean Cruise, sep. 2010, p. 18.
- [11] «The Engineering Design Revolution». Accedido: 11 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://images.designworldonline.com.s3.amazonaws.com/CADhistory/85739614-The-Engineering-Design-Revolution-CAD-History.pdf>
- [12] Osama Abdelaziz, «Drone Propeller | 3D CAD Model Library | GrabCAD». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://grabcad.com/library/drone-propeller-11>
- [13] Antor Mondal, «Foldable Drone Quadcopter | 3D CAD Model Library | GrabCAD». Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://grabcad.com/library/foldable-drone-quadcopter-1>
- [14] «Aluminio 7075 | Alloys International, Inc.» Accedido: 10 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://alloysintl.com/es/inventory/aluminum-alloys-supplier/aluminum-7075/>
- [15] «Las alas», L'avionnaire. Accedido: 12 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.lavionnaire.fr/EspAlas.php>
- [16] nexovirtual, «Cómo elegir el equipo informático perfecto para CAD/CAM/CAE en 2024», CADEMS. Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cadems.es/como-elegir-el-equipo-informatico-perfecto-para-cad-cam-cae-en-2024/>

- [17] «How much does a SOLIDWORKS license cost?», KEONY. Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.keony.com/en/dassault-systemes-software/solidworks/solidworks-license-prices/>
- [18] «Precios de Solid Edge | Siemens Software», Siemens Digital Industries Software. Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://plm.sw.siemens.com/es-ES/solid-edge/pricing/>
- [19] «What is the price of CATIA? A comprehensive buying guide», Dassault Systèmes. Accedido: 14 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/store/what-price-catia-comprehensive-buying-guide>

## **ANEXO I. ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE**

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un conjunto de 17 objetivos globales interconectados diseñados como un plan para lograr un mundo más sostenible. Fueron propuestos en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, y pretenden ser alcanzados para 2030.

En base a las definiciones dadas por la ONU, los ODS que mejor se alinean con este trabajo son:

- **ODS 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación.** Mediante la comparación de distintas herramientas de CAD-FEM, se contribuye a identificar las funcionalidades más eficientes y precisas de cada herramienta, promoviendo la innovación tecnológica en el sector aeronáutico.
- **ODS 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.** El uso de la simulación por elementos finitos acaba con la necesidad de crear y probar prototipos físicos, lo que reduce el desperdicio de recursos y el impacto ambiental.
- **ODS 11: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.** Un uso más eficiente de las herramientas de diseño CAD permite construir aeronaves más livianas y duraderas, contribuyendo a un transporte más sostenible, seguro y resiliente.