

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Grado en Ingeniería Aeroespacial
Trabajo Fin de Grado

**PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO DEL PROCESO DE
FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE DE AERONAVES
INTEGRADO EN PLATAFORMAS PLM**

Curso académico:
2018-2019



Presentado por: Samuel Molina Casino
Dirigido por: Carlos Vila Pastor

Valencia, 10 de julio de 2019

*En agradecimiento a
Carlos Vila Pastor por haber confiado en mí y por su amabilidad y dedicación
mi familia por el apoyo incondicional y el cariño que me dan en todo momento*

*Dedicado a
mi familia*

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado se contextualiza en el entorno actual de la fabricación digital y el concepto de Gestión del Ciclo de Vida del Producto (PLM). En el mismo se pretende realizar un aporte a la definición de las actividades y procesos de ensamblaje de aeronaves mediante la plataforma 3DExperience de Dassault Systèmes.

Se realiza un estudio previo de los conceptos que influyen en la planificación y el diseño del ensamblaje de estructuras aeronáuticas, así como del desarrollo y las metodologías de colaboración entre departamentos. Una introducción a la ingeniería concurrente y colaborativa permite ubicar el proyecto en la fase final de desarrollo del producto.

Posteriormente se plantean dos alternativas de caso estudio, en las que se analizarán las especificaciones de una Línea de Ensamblaje Final de un avión A350. Para ello se hará uso de las herramientas proporcionadas por 3DExperience. Se describe paso a paso el proceso necesario para la determinación de las operaciones a llevar a cabo y la implementación del sistema de producción. Los resultados obtenidos permiten demostrar el potencial de las plataformas PLM en el ahorro y la optimización de las fases de diseño y desarrollo de aeronaves.

Por último, se lleva a cabo un estudio del presupuesto de la integración del programa y el procedimiento seguido a lo largo del proyecto. Se tomará en consideración el ámbito del caso de estudio y todas las labores de ingeniería de diseño, de fabricación y de gestión que implican.

RESUM

El present Treball de Fi de Grau es contextualitza a l'entorn actual de la fabricació digital i el concepte de Gestió del Cicle de Vida del Producte. En aquest es pretén realitzar un aport a la definició de les activitats i processos d'assemblatge d'aeronaus mitjançant la plataforma 3DExperience de Dassault Systèmes.

Es realitza un estudi previ dels conceptes que afecten la planificació i el disseny del muntatge d'estructures aeronàutiques, així com del desenvolupament i les metodologies de col·laboració entre departaments. Una introducció a l'enginyeria concurrent i col·laborativa permet ubicar el projecte a la fase final del desenvolupament del producte.

Posteriorment es plantegen dues alternatives de cas d'estudi, a les que s'analitzaran les especificacions d'una Línia d'Assemblatge Final d'un avió A350. Per a això es farà ús de les ferramentes proporcionades per 3DExperience. Es descriu pas a pas el procés necessari per a la determinació de les operacions que tenen lloc i la implementació del sistema de producció. Els resultats obtinguts permeten demostrar el potencial de les plataformes PLM en l'estalvi i l'optimització de les etapes de disseny i desenvolupament d'aeronaus.

Per últim, es du a terme un estudi del pressupost de la integració del programa i el procediment seguit al llarg de tot el projecte. Es prendrà en consideració l'àmbit del cas d'estudi i totes les labors d'enginyeria de disseny, de fabricació i de gestió que impliquen.

ABSTRACT

The present Final Degree Project is contextualised at the current digital manufacturing setting and the Product Lifecycle Management concept. It is expected to make a contribution to the definition of aircraft's manufacturing processes and activities by using the 3DExperience platform from Dassault Systèmes.

A previous study of the concepts affecting the planning and design of aeronautical structures assembly processes is done. An analysis of the development aspects of a new product and the collaboration methodologies between departments will also take part. An introduction to concurrent and collaborative engineering allows to place this project inside the final stage of a products development.

Afterwards, two alternatives to the case of study are suggested, with them will take place an analysis of an A350's Final Assembly Line specifications. Using the tools provided by 3DExperience there will be made a detailed description of the necessary process to determine the operations to do and the implementation of the production system. The obtained results demonstrate the potential of PLM platforms to save and optimise the aircraft's design and development stages.

Finally, a budget study of the program's integration and the followed procedures is made. It will be taken into consideration the case of study context and every design, manufacturing or management engineering task involved.

Índice

| | | |
|-----|-----------------------|-----|
| I | MEMORIA | 1 |
| II | ANEXOS | 61 |
| III | PLANOS | 81 |
| IV | PLIEGO DE CONDICIONES | 103 |
| V | PRESUPUESTO | 113 |

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Grado en Ingeniería Aeroespacial

Parte I

MEMORIA

**PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO DEL PROCESO DE
FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE DE AERONAVES
INTEGRADO EN PLATAFORMAS PLM**

Samuel Molina Casino

Índice

| | |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. Introducción | 7 |
| 1.1. Objetivo | 7 |
| 1.2. Antecedentes | 8 |
| 1.3. Alcance | 9 |
| 2. Proceso de diseño y fabricación de aeronaves | 11 |
| 2.1. Análisis del proceso de producción | 11 |
| 2.2. Definición del proceso de ensamblaje de aeronaves | 12 |
| 2.3. Sistema de ensamblaje de Airbus | 13 |
| 2.4. Línea de Ensamblaje Final del A350 XWB | 14 |
| 3. Fabricación digital en el sector aeroespacial | 17 |
| 3.1. Diseño avanzado de aeronaves | 17 |
| 3.2. Desarrollo de aeronaves y gestión de la configuración | 20 |
| 3.3. Gestión del Ciclo de Vida del Producto | 22 |
| 3.4. Implementación del PLM en el sector aeroespacial | 24 |
| 3.5. 3DExperience como plataforma PLM | 26 |
| 4. Caso de estudio: Línea de Ensamblaje Final del A350 | 31 |
| 4.1. Modelo de A350 | 31 |
| 4.2. Alternativas propuestas | 31 |
| 4.3. Definición del proceso de ensamblaje con DELMIA | 34 |
| 4.4. Modelado del proceso y diseño de las simulaciones | 45 |
| 5. Análisis de los casos de estudio | 49 |
| 5.1. Caso de estudio I | 49 |
| 5.2. Caso de estudio II | 50 |
| 5.3. Comparación de propuestas | 51 |
| 6. Conclusiones y trabajos futuros | 55 |
| 6.1. Conclusiones | 55 |
| 6.2. Valoración del proyecto | 55 |
| 6.3. Trabajos futuros | 57 |
| Referencias | 59 |

Índice de figuras

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Modelo del A350 empleado en el trabajo (Canaz, 2017). | 9 |
| 1.2. División del A350 en sistemas (fuente: elaboración propia). | 9 |
| 2.1. Etapas de producción de una aeronave (fuente: elaboración propia). | 11 |
| 2.2. Sección de fuselaje del B787 (Davies, 2013). | 13 |
| 2.3. Estaciones del FAL del A320 (Airbus, 2017). | 14 |
| 3.1. Descomposición de las fases de diseño y fabricación (fuente: elaboración propia). | 17 |
| 3.2. Planteamiento tradicional vs Ingeniería Concurrente (Mas et al., 2013b). | 18 |
| 3.3. DMU de una compuerta del A320neo (Mas et al., 2013b) (no real debido a confidencialidad). | 19 |
| 3.4. Ingeniería Concurrente vs Ingeniería Colaborativa (Mas et al., 2013b). | 19 |
| 3.5. Visión funcional e industrial del producto (Mas et al., 2013a). | 21 |
| 3.6. Fases del ciclo de vida de un producto (fuente: elaboración propia). | 23 |
| 3.7. Fases e hitos en el ciclo de vida de un avión en Airbus (Mas et al., 2013a). | 24 |
| 3.8. Flujo de caja durante el ciclo de vida de un avión civil típico (eje en años) (Ríos et al., 2016). | 25 |
| 3.9. Aplicaciones de 3DExperience (Dassault Systèmes, 2017). | 26 |
| 3.10. Página principal de <i>Peer Learning</i> (Dassault Systèmes, 2019). | 29 |
| 3.11. Página principal del bloque COMPANION (Dassault Systèmes, 2019). | 29 |
| 3.12. Estructura de los cursos de aprendizaje (Dassault Systèmes, 2019). | 30 |
| 4.1. Modelos 3D de los sistemas del avión (Canaz, 2017). | 31 |
| (a). Fuselaje cabina. | 31 |
| (b). Fuselaje central. | 31 |
| (c). Fuselaje cola. | 31 |
| (d). Motor. | 31 |
| (e). Ala izquierda. | 31 |
| (f). Ala derecha. | 31 |
| (g). Estab. vertical. | 31 |
| (h). Estab. horizontal. | 31 |
| 4.2. Alternativa de secuencia de ensamblaje I (fuente: elaboración propia). | 32 |
| 4.3. Propuesta de secuencia de ensamblaje II (fuente: elaboración propia). | 33 |
| 4.4. Secuencia a seguir en 3DExperience (fuente: elaboración propia). | 34 |
| 4.5. Producción multimodelo (izquierda) y multilocalización (derecha) (Dassault Systèmes, 2019). | 35 |
| 4.6. Tipos de objeto presentes en un MBOM (Dassault Systèmes, 2019). | 36 |
| 4.7. Nodos de proceso del MBOM del A350 XWB en la FAL I (fuente: elaboración propia). | 37 |
| 4.8. Nodos de proceso del MBOM del A350 XWB en la FAL II (fuente: elaboración propia). | 37 |
| 4.9. <i>Provided parts</i> asociadas a sus <i>manufacturing assemblies</i> (fuente: elaboración propia). | 38 |
| 4.10. Nodo de sistema (Dassault Systèmes, 2019). | 38 |
| 4.11. Ejemplo de <i>system tiles</i> con una secuencia establecida (fuente: elaboración propia). | 39 |
| 4.12. <i>Process Planning</i> de la FAL I (fuente: elaboración propia). | 41 |
| 4.13. <i>Process Planning</i> de la FAL II (fuente: elaboración propia). | 41 |
| 4.14. Operaciones de la estación de cola en la FAL I (fuente: elaboración propia). | 42 |
| 4.15. Diagrama de Gantt de la la FAL I (fuente: elaboración propia). | 43 |
| 4.16. Detalle del diagrama de Gantt de la la FAL I (fuente: elaboración propia). | 43 |
| 4.17. Diagrama de Gantt de la la FAL II (fuente: elaboración propia). | 44 |
| 4.18. Leyenda de colores durante la simulación (fuente: elaboración propia). | 47 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| (a). Procesando. | 47 |
| (b). Esperando entrada. | 47 |
| (c). Esperando salida. | 47 |
| (d). Fallo. | 47 |
| 4.19. Simulación de la FAL II (fuente: elaboración propia). | 47 |
| 4.20. Gráficas durante la simulación de la FAL II (fuente: elaboración propia). | 48 |
| 4.21. Tabla de resultados de simulación de la FAL II (fuente: elaboración propia). | 48 |
| 5.1. Diagrama de utilización de estaciones en la FAL I (fuente: elaboración propia). | 49 |
| (a). Modelo ideal. | 49 |
| (b). Modelo real. | 49 |
| 5.2. Diagrama de utilización de estaciones en la FAL II (fuente: elaboración propia). | 50 |
| (a). Modelo ideal. | 50 |
| (b). Modelo real. | 50 |
| 5.3. Diagrama de la eficiencia de estaciones por FAL. Color claro el modelo ideal, color oscuro el modelo real. (fuente: elaboración propia). | 52 |
| 5.4. Diagrama de utilización de transferencias por FAL. Color claro el modelo ideal, color oscuro el modelo real. (fuente: elaboración propia). | 52 |

Índice de tablas

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Sistemas Pre-FAL del A350 XWB y su procedencia (Airbus, 2017). | 14 |
| 2.2. Estaciones de la FAL del A350 XWB (Airbus, 2012). | 15 |
| 3.1. Ingeniería Tradicional vs Concurrente vs Colaborativa (Mas et al., 2013b). | 20 |
| 3.2. Ejemplo de número de piezas en un producto (Stark, 2015). | 23 |
| 3.3. Módulos disponibles en 3DExperience (fuente: elaboración propia). | 27 |
| 4.1. Nomenclatura para descripción de propuestas (fuente: elaboración propia). | 31 |
| 4.2. FAL I (fuente: elaboración propia). | 32 |
| 4.3. FAL II (fuente: elaboración propia). | 33 |
| 4.4. Tipos de <i>system tiles</i> disponibles (fuente: elaboración propia). | 39 |
| 4.5. Operaciones del módulo <i>Process Planning</i> (fuente: elaboración propia). | 40 |
| 4.6. Tiempo estimado de las operaciones (fuente: elaboración propia). | 42 |
| 4.7. Operaciones del módulo <i>Process Flow Simulation</i> (fuente: elaboración propia). | 45 |
| 4.8. Modelo probabilístico para el caso real (fuente: elaboración propia). | 45 |
| 4.9. Tiempo medio entre fallos (MTBF) y de reparación (MTTR) de las estaciones (fuente: elaboración propia). | 46 |
| 4.10. Parámetros de las simulaciones (fuente: elaboración propia). | 46 |
| 5.1. Utilización de estaciones en la FAL I (fuente: elaboración propia). | 49 |
| 5.2. Utilización de estaciones en la FAL II (fuente: elaboración propia). | 51 |
| 5.3. Unidades producidas en 3 años por FAL (fuente: elaboración propia). | 51 |

1 Introducción

1.1 Objetivo

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es realizar una aportación en las actividades de planificación de los procesos y actividades de fabricación de aeronaves, concretamente de la fase de ensamblaje de las mismas. Todo ello integrado en una plataforma de Gestión del Ciclo de Vida del Producto (*Product Lifecycle Management*, PLM), a través de la cual se llevará a cabo una de las tareas de definición de las etapas de fabricación en la fase final de ensamblaje con las últimas etapas de diseño en detalle de la aeronave.

Teniendo como meta última la planificación de los procesos de ensamblaje, se plantea un modelo agregado del diseño en las fases finales junto con el proceso de diseño de los procesos y recursos de fabricación.

Para la realización del trabajo se ha llevado a cabo una fase primera de planificación conceptual, en la que se ha planteado el proceso a seguir en el ensamblaje de una aeronave y se ha obtenido la información necesaria para poder entender y optimizar dicho proceso. La segunda fase del trabajo se ha realizado en su totalidad en una plataforma PLM denominada 3DExperience, que incluye aplicaciones de especial interés en el modelado sólido (CAD/CAM/CAE) y de la gestión de datos del ciclo de vida de la aeronave en entornos de la industria 4.0. El trabajo sirve como validación de estas aplicaciones para el sector aeroespacial en el entorno académico.

1.2 Antecedentes

La insistente búsqueda en la industria aeronáutica de sistemas cada vez más eficientes y seguros ha conllevado la aparición de una tendencia actual al incremento progresivo en complejidad y número de componentes de las aeronaves, ya sea con el objetivo de hallar mejoras en sus prestaciones aerodinámicas como en su tecnología electrónica.

El hecho de ampliar el número de componentes que conforman la aeronave en su globalidad implica la aparición de problemas y posibles puntos débiles en el proceso de diseño, fabricación o ensamblaje que pueden afectar al posterior correcto funcionamiento de la misma. Además de una mayor carga de trabajo a la hora de llevar a cabo el mantenimiento de dichos componentes.

Anteriormente, un producto como una aeronave era diseñado por distintos departamentos que trabajaban de forma independiente con un marcado objetivo por parte de cada uno de ellos. Así pues, se encontraba el departamento de diseño estructural, de aerodinámica, de aviónica, de presupuesto, de fabricación, etc. La comunicación tradicional entre ellos traía consigo el uso de infinidad de papeles, correos electrónicos, llamadas, etc, así como el uso de múltiples aplicaciones distintas encargadas de realizar una tarea concreta, únicamente útil para el departamento que la empleaba.

El propósito de las plataformas PLM es el de eliminar las barreras entre los distintos departamentos encargados de que el diseño de la aeronave salga adelante a la vez que se proporciona una plataforma digital en la que se aúnan las múltiples aplicaciones en un solo lugar. La información necesaria está en todo momento disponible dentro de la propia plataforma y es accesible para todo el que trabaje en un mismo proyecto, por lo que se reduce de forma considerable el flujo de información mediante las vías tradicionales.

El empleo del concepto PLM enfocado a las actividades del proceso de ensamblaje supone la posibilidad de realizar, a la vez que se finaliza el diseño, estudios de la viabilidad, la planificación de procesos y de la optimización de los mismos. No solo se hace posible simular el ensamblaje del sistema sino también el entorno en el que este se va a encontrar, pudiendo anticiparse también la distribución de la planta de ensamblaje, los utillajes y las herramientas necesarios durante el proceso.

Las patentes ventajas del uso de la filosofía PLM en las actividades previamente descritas suscita el interés de empresas e investigadores, siendo el número de artículos y libros relacionados con el tema muy elevado. Como base para la realización de este trabajo se hace uso de artículos y proyectos enfocados a la concepción teórica de los procedimientos que conforman el ensamblaje final de aeronaves, trasladando los conclusiones que se deducen de la aplicación teórica a un caso práctico concreto.

1.3 Alcance

En el presente proyecto se pretende realizar un modelo del proceso de ensamblaje de aeronaves en el que se definen las operaciones y los recursos de fabricación a emplear actualizado con las fases finales del diseño. Todo ello se realizará mediante la plataforma PLM de 3DEXperience, propiedad de la compañía Dassault Systemes.

Para ello se proporcionará una visión global del proceso de planificación del ensamblaje final de aeronaves desde la perspectiva de una herramienta PLM. Con dicho objetivo se empleará un modelo 3D de un Airbus A350 (Figura 1.1), el cual se halla en un estado de modelado suficiente para poder realizar una simulación del proceso de ensamblaje final de los sistemas de la aeronave.



Figura 1.1: Modelo del A350 empleado en el trabajo (Canaz, 2017).

Debido al elevado número de piezas, subsistemas y elementos de unión presentes en una aeronave, se pretende alcanzar un nivel de detalle en el proceso en el que no se tendrán en cuenta los elementos de unión empleados ni los subsistemas pequeños. La aeronave se supondrá, por tanto, en un estado previo al ensamblaje final de la misma, y se encontrará dividida en los sistemas que se presentan a continuación.

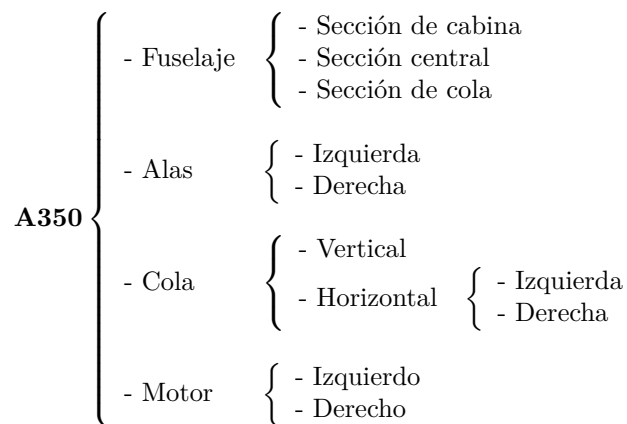


Figura 1.2: División del A350 en sistemas (fuente: elaboración propia).

Se puede corroborar, por tanto, que no se entra en los detalles individuales de cada uno de los sistemas, sino que se suponen ya ensamblados y preparados para ser instalados de forma que se consiga el producto final de la aeronave.

Para el desarrollo del proyecto se va a seguir la secuencia descrita a continuación:

1. En el primer apartado (el actual), se realiza una introducción al tema tratado en el Trabajo de Fin de Grado, así como una definición del nivel de profundidad que se desea alcanzar en las actividades llevadas a cabo.
2. En un segundo apartado se hace una presentación de los sistemas de producción y la metodología empleada hoy en día para el ensamblaje de aeronaves.
3. La tercera parte de la memoria se centra en el uso de la fabricación digital en el entorno aeroespacial, introduciendo posteriormente el concepto de Gestión del Ciclo de Vida y su justificación en la industria. Tras todo ello se realiza una breve descripción de la plataforma 3DExperience.
4. Esta sección comienza describiendo de forma detallada del modelo 3D que se posee y las propuestas de Líneas de Ensamblaje Final que se plantean. Posteriormente se procede a la definición del caso de estudio en la plataforma 3DExperience, explicando en profundidad cada uno de los pasos seguidos y su función en el diseño del sistema de producción.
5. En el quinto apartado se comentan los resultados obtenidos de la aplicación del proceso expuesto en el apartado anterior y se comparan los casos modeladas.
6. Conclusiones tras la realización del proyecto, opinión personal y propuesta de trabajos futuros de ampliación o complementarios al que se ha llevado a cabo.

Con esta estructura de las secciones se pretende abarcar de una forma eficiente y justificada cada uno de los puntos marcados en los objetivos de este Trabajo de Fin de Grado (Apartado 1.1).

2 Proceso de diseño y fabricación de aeronaves

2.1 Análisis del proceso de producción

El desarrollo de una aeronave, desde que se concibe como idea hasta que se entrega al cliente, está conformado por diversas etapas que, de forma general, se siguen en el diseño de cualquier aeronave convencional. Estas se muestran en la Figura 2.1.

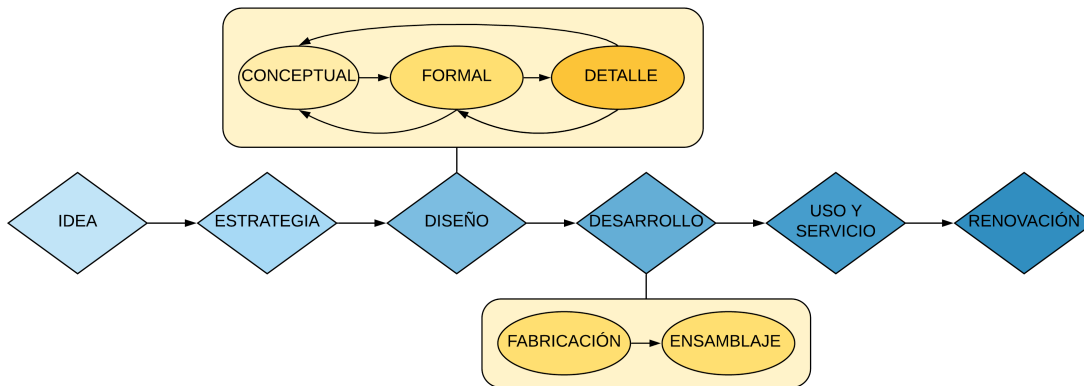


Figura 2.1: Etapas de producción de una aeronave (fuente: elaboración propia).

La primera fase una vez ha surgido la idea es el planteamiento de una estrategia empresarial. Esto es, la planificación de los recursos económicos, materiales y humanos que la empresa está dispuesta a emplear en la realización del proyecto. También en esta etapa se plantea la metodología de trabajo a seguir, la cual condicionará la forma de comunicarse entre departamentos y, en cierta medida, el tiempo que se va a dedicar en las etapas siguientes.

Posteriormente, comienza la etapa de diseño. El diseño de una aeronave desde cero es una tarea compleja y que involucra a muchos individuos, está compuesta de multitud de fases, conectadas entre sí y que interactúan de forma iterativa, por lo que es un proceso lento y tedioso que precisa de una elevada planificación y comunicación entre departamentos.

Las principales fases de las que se compone el período de diseño de una aeronave son:

- Diseño conceptual: se basa en el planteamiento inicial de parámetros básicos de tipo geométrico, aerodinámico y estructural. En esta fase se realiza una búsqueda de información que permita obtener una tendencia de aeronaves similares, gracias a la cual se realizan estimaciones y cálculos preliminares.
- Diseño formal: se emplean cálculos más exactos para definir los parámetros de forma precisa. En esta etapa la geometría y la aerodinámica de la aeronave quedan definidos de forma provisional.
- Diseño en detalle: una vez definida la aeronave a grandes rasgos, se diseñan y seleccionan el resto de sistemas que la complementan. En este momento se definen el interior de la aeronave, los sistemas hidráulicos y neumáticos y cualquier sistema que afecte al correcto funcionamiento de la aeronave. Una vez finalizada esta fase, el modelo de la aeronave ya está en condiciones de poder comenzar su producción.

La elevada complejidad y conexión entre todos los elementos que conforman la aeronave hace que las tres fases arriba explicadas sean habitualmente difusas. Con el avance en el proceso de diseño

aparecen multitud de problemas que hacen que sea necesario dar pasos atrás y re-diseñar algún componente o algún parámetro previamente definido. Éste es el proceso iterativo que compone la etapa de diseño, es el causante de que el desarrollo de una aeronave desde que se presenta una nueva idea sea mucho más largo que en otras industrias.

En la etapa de desarrollo se fabrican las piezas que forman parte de la aeronave y, posteriormente, son ensambladas, obteniendo así el producto final. El proceso de ensamblaje de una aeronave, debido a la cantidad de piezas y sistemas que contiene, es un proceso complejo, a menudo llevado a cabo en distintas localidades por conveniencia logística, y que conlleva una planificación previa del proceso a seguir y de los recursos empleados. Es durante las últimas etapas de diseño en detalle cuando comienza la planificación de las actividades de fabricación y ensamblaje, diseñando también las líneas de ensamblaje y los utillajes necesarios para ello.

Tras el ensamblaje de la aeronave, se realizan multitud de pruebas que demuestren que el proceso de montaje se ha realizado sin errores que afecten al funcionamiento y la seguridad de la misma. Durante las pruebas finales se comprueban desde los sistemas informáticos, la estructura, hasta las prestaciones en vuelo.

El alto nivel de exigencia y precisión con el que se lleva a cabo cada una de las actividades que contribuyen a la fabricación de una aeronave ha permitido el bajo número de accidentes (en comparación con industrias como la automovilística) que se han dado en el sector aeronáutico.

2.2 Definición del proceso de ensamblaje de aeronaves

La reducción de costes en la fabricación de aeronaves fue posible gracias al desarrollo de tecnologías avanzadas, a la aplicación de automatismos y al uso de las herramientas digitales en la simulación de procesos, todo ello combinado con la aparición de metodologías de ingeniería concurrente/colaborativa.

El ensamblaje de una aeronave conlleva una gran variedad de procesos de fabricación y montaje de componentes de menor tamaño. El material en bruto es mecanizado y fabricado hasta conformar distintas piezas, que se unirán a otras formando diversos niveles de configuraciones estructurales (Sarh et al., 2009), como el fuselaje, las alas o, finalmente, el avión al completo.

A continuación se exponen los procesos de montaje de los conjuntos más importantes en la estructura de la aeronave:

- Fuselaje:

El proceso de ensamblaje del fuselaje implica procesos de unión y remachado en cinco grandes niveles de profundidad. En el primer nivel (el menor de ellos), la piel, largeros, cuadernas y demás se unen formando un único panel. El tamaño y la complejidad de estos paneles viene dada por requerimientos aerodinámicos y de carga. En el segundo nivel, varios paneles individuales se combinan mediante elementos de unión distribuidos en dirección radial y longitudinal, formando un gran panel. El ensamblaje de la estructura del suelo también es de segundo nivel. En el tercer nivel se unen los paneles procedentes del segundo, conformando las semi-células superior e inferior del fuselaje (a una de ellas se añade la estructura del suelo). Éstas semi-células se unen de forma longitudinal en el cuarto nivel, obteniendo así las secciones completas de fuselaje (Figura 2.2), las cuales serán unidas de forma radial en el quinto nivel.

- Alas:

El ala presenta tres niveles de profundidad. En el primero de ellos, se unen los paneles correspondientes a la piel superior e inferior con sus larguerillos correspondientes. Posteriormente, se unen en el segundo nivel los largeros y las cuadernas formando así la estructura del ala. Finalmente, en el tercer nivel, se añaden el borde de ataque y el borde de fuga a la estructura, obteniendo el ala completa.



Figura 2.2: Sección de fuselaje del B787 (Davies, 2013).

- Cola:
El proceso de ensamblaje de la cola es análogo al de las alas. El montaje de los estabilizadores horizontales y verticales se realiza de forma independientemente y, tras esto, se unen a la sección de cola del fuselaje.
- Resto:
El sistema de propulsión, tren de aterrizaje, interior y sistemas hidráulicos, eléctricos y neumáticos se instalan para completar el avión. Tras realizar las pruebas pertinentes sobre la estructura y los componentes instalados, se pinta y entrega al cliente.

Se explica a continuación la metodología de ensamblaje que emplea Airbus. Ésta será de especial interés para el desarrollo del trabajo ya que se va a realizar un análisis de una estructura similar a ella.

2.3 Sistema de ensamblaje de Airbus

El fabricante Airbus actualmente emplea una metodología para el ensamblaje de sus aviones basada en las Líneas de Ensamblaje Final (*Final Assembly Line*, FAL) (Airbus, 2017). Las FAL se organizan en forma de estaciones de trabajo, donde en cada una de ellas se realiza una tarea específica de ensamblaje y de testeo de la aeronave. De tal manera que no es la estación la que se desplaza hacia el lugar donde se halla la aeronave, sino que la propia aeronave, a lo largo del proceso de ensamblaje, va moviéndose de una estación a otra (Figura 2.3).

Airbus tiene a su disposición ocho Líneas de Ensamblaje Final (FAL) repartidas en cuatro localizaciones, capaces de producir la amplia gama de aeronaves que la compañía desarrolla. Dichas FAL se encuentran repartidas de la siguiente forma:

- Toulouse (Francia): cinco FALs en total, dos de ellas encargadas de la producción de la familia del A320 y una individual para las familias del A330, A350 XWB y el A380.
- Hamburg (Alemania): una FAL destinada a la familia del A320.
- Tianjun (China): una FAL destinada a la familia del A320.
- Mobile (EEUU): una FAL destinada a la familia del A320.



Figura 2.3: Estaciones del FAL del A320 (Airbus, 2017).

La intención de este trabajo es la de recrear el proceso de ensamblaje del avión A350 en una Línea de Ensamblaje Final mediante una plataforma PLM. En consecuencia, a continuación se explica en detalle como está compuesta y organizada la FAL del A350 XWB.

2.4 Línea de Ensamblaje Final del A350 XWB

La fase final del ensamblaje del A350 XWB (Airbus, 2012), tal y como se ha comentado en el apartado anterior, sigue la metodología de Airbus en cuanto a líneas de ensamblaje final. En este caso el proceso se realiza en la FAL de Toulouse (Francia), la cual se compone de siete estaciones en las que se ensamblan los sistemas finales y a su vez se instalan los sistemas y equipos que completan la aeronave y permiten su correcto funcionamiento.

La FAL del A350 XWB implica una gran planificación logística, siendo necesaria una colaboración extraordinaria entre las diferentes factorías encargadas de la fabricación de los componentes y el ensamblaje de los sistemas principales. La ubicación de cada una de las factorías dedicadas al ensamblaje de dichos sistemas es la siguiente:

| Sistema | Ubicación |
|------------------------------|-----------------------|
| Alas | Broughton, Inglaterra |
| Bordes de ataque y de fuga | Bremen, Alemania |
| Parte delantera del fuselaje | Nantes, Francia |
| Parte central del fuselaje | Nantes, Francia |
| Parte trasera del fuselaje | Hamburgo, Alemania |
| Estabilizador vertical | Hamburgo, Alemania |
| Estabilizador horizontal | Getafe, España |
| Pilón y góndola del motor | Toulouse, Francia |

Tabla 2.1: Sistemas Pre-FAL del A350 XWB y su procedencia (Airbus, 2017).

En la FAL todas los procedimientos a realizar se hayan bien definidas por estaciones, siendo siete el número de ellas. La aeronave se mueve entre estaciones con un transportador, que permite el desplazamiento de la misma cuando no dispone todavía de tren de aterrizaje.

Las actividades de ensamblaje (y de testeo) llevadas a cabo en cada una de las estaciones (por orden cronológico) se exponen a continuación:

| | |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Estación 59 | Instalación de los elementos de cabina en las secciones de fuselaje. |
| Estación 50 | Unión estructural de las tres secciones de fuselaje. |
| | Transferencia del fuselaje a la siguiente estación con el transportador. |
| Estación 40 | Unión de las alas al fuselaje. |
| | Unión del estabilizador vertical y horizontal. |
| | Unión del cono de cola. |
| | Unión del pilón. |
| Estación 30 | Unión del tren de aterrizaje principal. |
| | Pruebas en interior del hangar. |
| | Personalización de la cabina. |
| Estación 18 | Pruebas de exterior en suelo. |
| Estación P | Pintado de la aeronave. |
| Estación 20 | Instalación de los motores. |
| | Amueblamiento de la cabina de pilotos. |
| - | Prueba final en vuelo. |

Tabla 2.2: Estaciones de la FAL del A350 XWB (Airbus, 2012).

Todas estas fases de ensamblaje se simulan previamente a su realización física mediante la tecnología virtual que ofrecen las plataformas PLM. La gran ventaja de este proceso previo de simulación permite observar los puntos débiles del proceso así como optimizarlo antes de que se lleve a cabo de forma física, así pues se consigue un ahorro económico en solución de posteriores problemas y una mejora en los niveles de producción ya que se evitan paradas innecesarias.

3 Fabricación digital en el sector aeroespacial

3.1 Diseño avanzado de aeronaves

En el desarrollo conceptual de una aeronave, la inversión económica necesaria en las primeras fases de diseño es muy elevada. La justificación de este hecho se da en la elevada necesidad de interacción e iteración de los procesos. Una de las condiciones clave en la reducción del tiempo y dinero dedicados a dichas fases es asegurar que se realizan con eficiencia máxima, para lo cual todas las disciplinas han de interactuar entre ellas con un objetivo común.

Como fabricante aeronáutico, Airbus ha estado estos últimos años trabajando en el desarrollo y aplicación de la ingeniería concurrente en un proyecto denominado ACE (*Airbus Concurrent Engineering*) (Pardessus, 2004). Según este proyecto, tal y como se observa en la Figura 3.7, el proceso de diseño y fabricación de la aeronave se puede descomponer en cinco fases marcadas por hitos (MX), los cuales se exponen en la Figura 3.1.

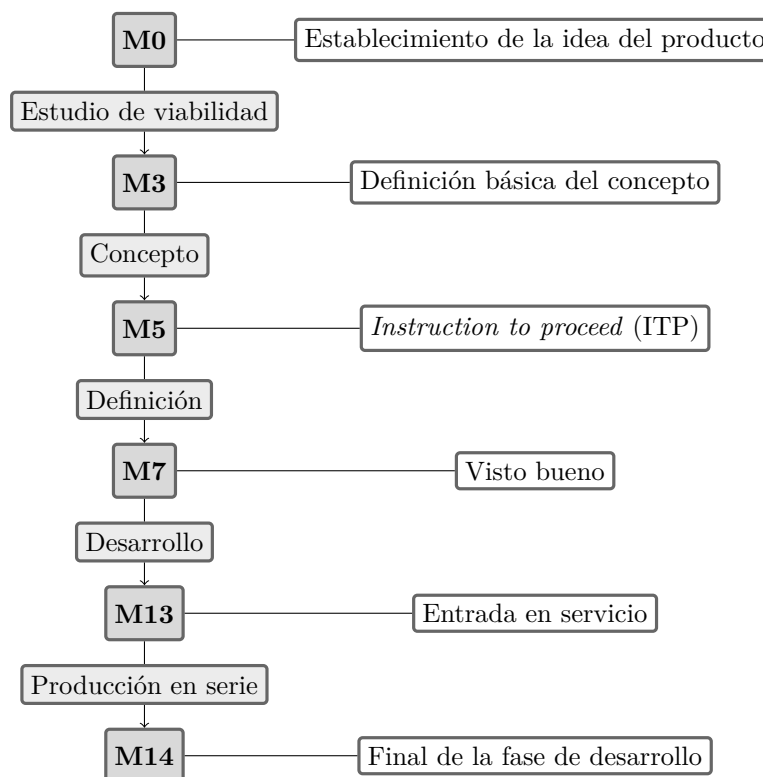


Figura 3.1: Descomposición de las fases de diseño y fabricación (fuente: elaboración propia).

Los conceptos en los que se basa la ingeniería concurrente son:

- La complejidad del producto se gestiona de forma que éste se halla accesible en todo momento para cualquier equipo trabajando sobre el mismo. Esta premisa conlleva la descomposición del producto en distintos objetos en el dominio de diseño, lo cual maximiza el trabajo en paralelo.
- Sincronización permanente para asegurar que el ciclo de desarrollo se encuentra bajo control. Para ello es necesaria una trazabilidad constante de toda la información generada.
- El uso de ingeniería multidisciplinar que permite generar técnicas colaborativas.

- Planteamiento del proceso, método y herramientas. Este nuevo paradigma basado en el proceso implica:
 - Considerar cómo los equipos de diseño cooperan en el contexto de diseño, qué herramientas empresariales usan, cómo las comparten y cómo evolucionan de forma simultánea con los cambios en el diseño.
 - Plantear en la medida de lo posible, en términos de integración de los procesos, el modo en el que se mejora el flujo de trabajo y la calidad del proceso.

La planificación del ensamblaje de la aeronave durante la aplicación de la ingeniería concurrente se realiza de forma conjunta con el diseño de la aeronave, de tal forma que evoluciona con éste. La ventaja de esta metodología radica en la reducción del tiempo (ilustrado en la Figura 3.2), ya que las tareas dejan de realizarse de forma secuencial, y en la posibilidad de tener en cuenta en tiempo real los factores que afectan a la viabilidad de la fabricación de dicha aeronave, evitando así fallos posteriores o la excesiva iteración del mecanismo de diseño (Mas et al., 2013b).

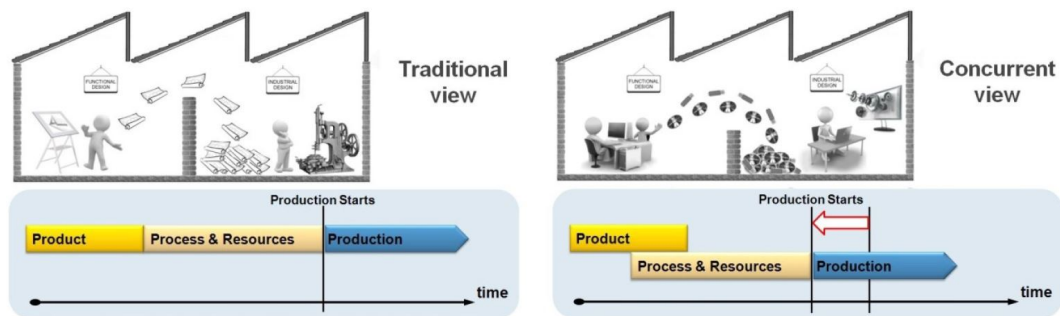


Figura 3.2: Planteamiento tradicional vs Ingeniería Concurrente (Mas et al., 2013b).

Otro factor relevante es la creación de la maqueta digital (*Digital Mock-Up*, DMU), a través de la cual los distintos equipos de trabajo serán capaces de realizar sus labores encomendadas de forma independiente y en paralelo sobre un mismo sistema.

La maqueta digital se define como un conjunto de información organizado, que refleja las distintas necesidades de los equipos de trabajo y se estructura según la Estructura del Producto (Pardessus, 2004). La Estructura del Producto es el sistema de raíz, el cual describe como se configuran los planos (cuando se tiene en cuenta las necesidades en la fabricación). La DMU está basada en técnicas similares a la realidad virtual y por lo tanto es posible "navegar" en ella y explorar las áreas de diseño deseadas.

La DMU se convierte, por tanto, en el centro de información del proyecto. Se crea gracias a las herramientas CAD de diseño asistido por ordenador (se muestra un ejemplo de ello en la Figura 3.3), y se gestiona mediante sistemas de Gestión de Datos del Producto (*Product Data Management*, PDM), los cuales permiten también la creación y difusión de planos, la planificación de procesos y la optimización de la gestión del producto. En el marco del PDM es dónde tiene lugar la introducción de las plataformas PLM.

Se puede descomponer la maqueta digital en tres productos derivados del diseño, los cuales se emplean para satisfacer las necesidades de cada uno de los equipos implicados a lo largo de todo el ciclo de vida del producto. Éstos son:

- *Master Geometry*: resultante de la definición de la forma aerodinámica de la aeronave. Puede ser empleado por el equipo estructural para la obtención de una definición preliminar de la estructura y los principios de diseño asociados. Los equipos de fabricación lo emplean para la planificación preliminar de las operaciones de la Línea de Ensamblaje Final. Asimismo, el equipo de operaciones puede elaborar un estudio de las capacidades de servicio en aeropuerto.

- *Space Allocation Model*: permite a los equipos de ingeniería de sistemas realizar la pre-instalación (virtual) de los diferentes sistemas y componentes de los equipos. En esta etapa, los equipos de soporte al diseño también planifican cómo se realizarán las tareas de mantenimiento sobre la aeronave.
- *Definition model*: etapa final de la DMU, de la cual se extraen los datos necesarios para proceder a las actividades de fabricación.

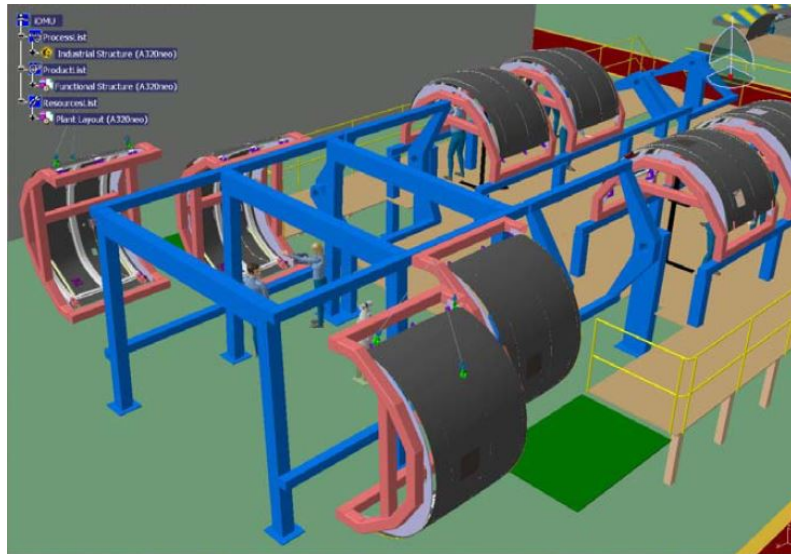


Figura 3.3: DMU de una compuerta del A320neo (Mas et al., 2013b) (no real debido a confidencialidad).

Con el objetivo de eliminar la barrera entre departamentos de manera definitiva, en la actualidad se está comenzando a implementar el concepto de ingeniería colaborativa (Figura 3.4). Ésta se plantea como una nueva metodología que necesita de la definición de nuevos procedimientos y herramientas de gestión.

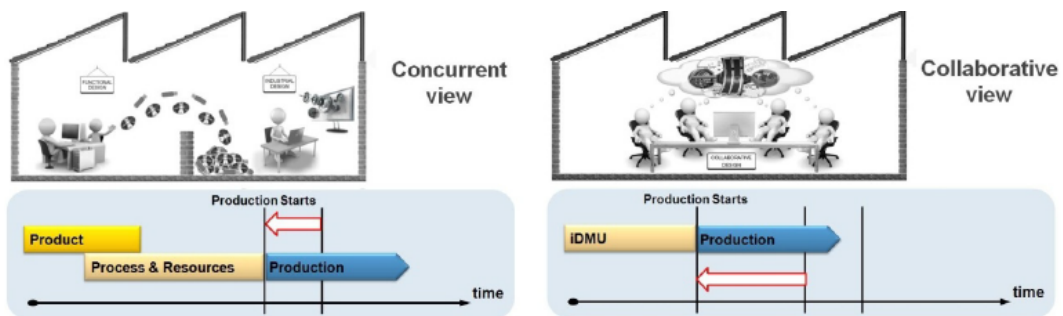


Figura 3.4: Ingeniería Concurrente vs Ingeniería Colaborativa (Mas et al., 2013b).

El fin de la ingeniería colaborativa es la creación de la maqueta digital industrial (industrial Digital Mock-Up, iDMU), la cual aúna las necesidades de diseño desde el punto de vista funcional y el industrial (concepto explicado en profundidad en el apartado siguiente).

Las principales ventajas de la aplicación de este método de trabajo son la reducción del tiempo empleado, la validación virtual de técnicas de fabricación sobre el propio modelo 3D y los beneficios derivados de la existencia de un sólo equipo con una meta única.

Se expone a continuación una tabla comparando las características de las tres metodologías de trabajo comentadas:

| Característica | Tradicional | Concurrente | Colaborativa |
|----------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| Secuencia de proceso | Secuencial | Solapado | Compartido |
| Equipos | Muchos | Varios | Único |
| Producto final | Planos | DMU | iDMU |
| Enfoque | Producto | Tiempo | Cliente |
| Objetivo | Diseño por funcionalidad | Diseño para ensamblaje | Fabricación virtual |

Tabla 3.1: Ingeniería Tradicional vs Concurrente vs Colaborativa (Mas et al., 2013b).

3.2 Desarrollo de aeronaves y gestión de la configuración

En cuanto a la definición de la concepción de un producto como una aeronave, se puede diferenciar entre visión funcional y visión industrial, teniendo ambas el mismo número de componentes o soluciones de diseño.

La visión funcional es una descomposición del sistema global en subsistemas (denominados nodos funcionales) según la función de estos últimos, en el que los diseñadores pueden navegar por el producto de forma que pueden llevar a cabo las actividades de diseño asociadas al subsistema en concreto. Ejemplos de nodos funcionales son el tren de aterrizaje, el estabilizador horizontal, el sistema de combustible, etc. La estructura que compone la visión funcional es una personalización realizada por la compañía de los estándares internacionales y se concreta en la estructura "*as designed*" del producto.

El subsistema derivado de un nodo funcional puede no existir en la realidad como producto en sí mismo. Por ejemplo, el nodo funcional del grupo alar (*wing set*) nunca va a darse como ensamblaje físico real debido a que el proceso de ensamblaje se ha definido como un sub-ensamblaje ala-fuselaje (Figura 3.5).

La industrialización de la visión funcional de un sistema puede tener varias soluciones viables, teniendo cada una de ellas su propia visión industrial (*as planned*). En esta nueva descomposición del sistema, cada uno de los nodos industriales sí que corresponde a un producto físico en la realidad ya que es un paso intermedio en el proceso de ensamblaje de la aeronave. Para la definición de la visión industrial, los equipos de diseño y de fabricación han de trabajar en conjunto con el objeto de llegar a un acuerdo con respecto a los niveles de los distintos componentes y subsistemas existentes y concretar así la visión industrial del producto. Ésta se detalla en la estructura de definición de producto *as planned*.

La gestión de las distintas configuraciones de la aeronave es un factor clave durante la fase de desarrollo de la aeronave, es por ello que en la fase conceptual, debido a su nivel de abstracción, el modelo incluye variantes que se acomoden a las posibles necesidades de los usuarios. La línea de ensamblaje deberá ser ideada de forma que puede acomodarse a las distintas variantes existentes.

Un componente (por ejemplo el fuselaje central) es conceptualmente invariante. Sin embargo, las distintas versiones de éste se detallan en un nivel jerárquico inferior como un *cad model*, por lo que un mismo componente puede tener varios de ellos asociados a éste. Cada *cad model* tiene una propiedad, denominada *range of aircraft*, que detalla las aeronaves para las cuales será empleado en la construcción de la DMU. Una definición final de cualquier aeronave puede realizarse tanto con una vista industrial como funcional, obteniendo una composición de ambas vistas que pueden ser comparadas una vez se exponen en paralelo.

Durante la fase de diseño conceptual de la línea de ensamblaje, el modelo todavía se observa con poco nivel de detalle, por lo que los niveles jerárquicos inferiores de los componentes no se tienen en cuenta.

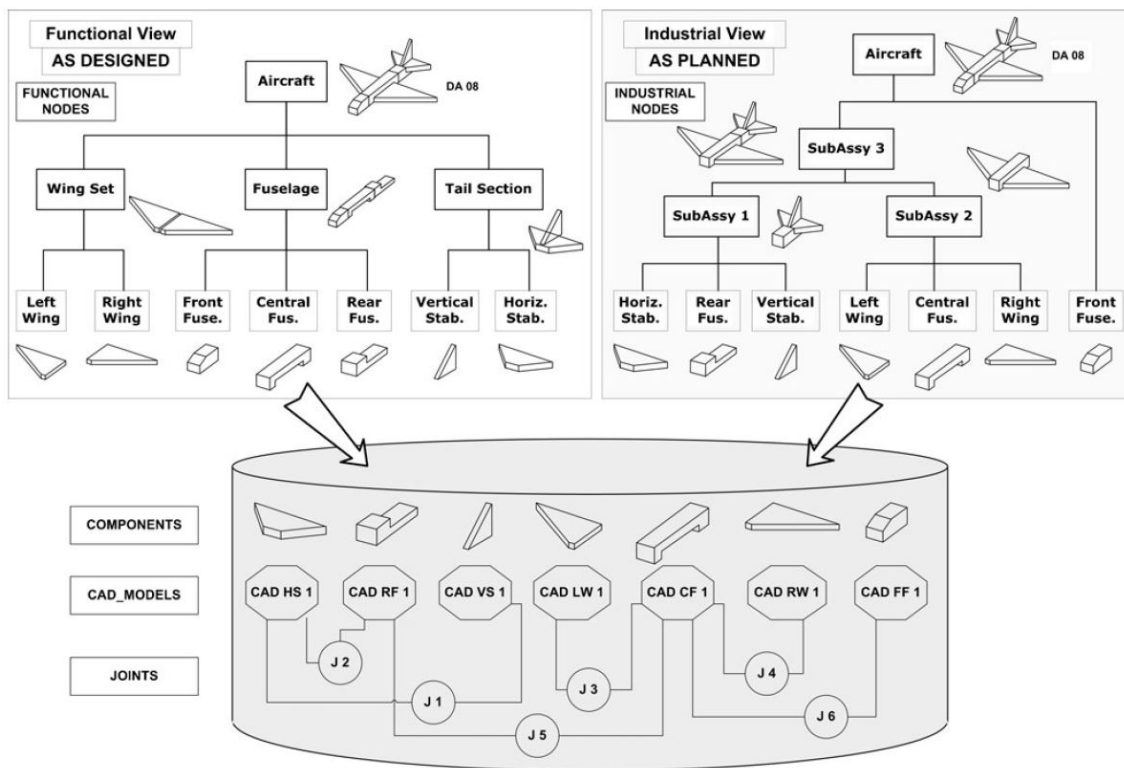


Figura 3.5: Visión funcional e industrial del producto (Mas et al., 2013a).

El proceso de ensamblaje consiste en la combinación de una serie de productos de manera que conforman un nuevo producto, ejecutando los procesos de unión necesarios y las tareas de ensamblaje necesarias con los recursos que se precisen para ello. En el sector aeronáutico está aceptada la descomposición en tres niveles: *el primero de ellos es la línea de ensamblaje completa, el segundo son las estaciones individuales y el tercero se relaciona con las operaciones básicas que se realizan en cada una de ellas.* En cada proceso básico del ensamblaje, el elemento de proceso tiene al menos dos productos como entrada y un solo producto como salida.

El nivel superior, la línea de ensamblaje, es un concepto que recoge y formaliza toda la información proveniente de los niveles inferiores. Los procesos industriales, recursos humanos y ciclos de tiempo se calculan de las estaciones de trabajo detalladas en el segundo nivel ya que una línea de ensamblaje se compone de las estaciones de trabajo y las relaciones entre ellas.

En cuanto a los procesos básicos de ensamblaje, tercer nivel, se clasifican según sus características y uso de recursos. Establecen cómo ensamblar dos componentes concretos que conforman un conjunto, es la solución óptima hallada en el ámbito de la fabricación para la asociación de los componentes. Dependiendo de la geometría, el material y la función de los componentes que aparecen en el proceso, se pueden dividir los procesos básicos de ensamblaje en seis tipos:

- Proceso estructural: incluye los procedimientos mecánicos para unir partes o sub-ensamblajes, básicamente con tornillos o remaches. Contiene una secuencia conocida de tareas del tipo: posicionamiento, taladrado y remachado.
- Proceso eléctrico: incluye los procedimientos mecánicos de ensamblaje del cableado eléctrico presente la aeronave y de la conexión entre ellos.
- Proceso accesorios: incluye los procesos de instalación de elementos no aeronáuticos tales como asientos, aire acondicionado, aseos, paracaídas, etc.

- Proceso de instalación de sistemas: incluye procedimientos de instalación de sistemas aeronáuticos como el tren de aterrizaje, flaps, actuadores y otros sistemas de vital importancia.
- Procesos de pintura y sellado: incluye la preparación de la superficie, aplicación de la primera y la última capa y el uso de las tecnologías de sellado pertinentes.
- Procesos de testado: procedimientos llevados a cabo para la comprobación de la correcta instalación y funcionamiento de todos los sistemas y la estructura de la aeronave.

El tipo de proceso que se realice implicará el empleo de unos recursos humanos y materiales concretos, los cuales se detallan en la descripción del mismo cuando se definen.

3.3 Gestión del Ciclo de Vida del Producto

En el desarrollo de productos complejos es fundamental gestionar el proceso de diseño hasta su renovación o retirada pasando por la definición del producto, fabricación, uso y servicio. Esto da origen al concepto de PLM.

El acrónimo PLM corresponde a las iniciales de "*Product Lifecycle Management*" y su traducción directa es "Gestión del Ciclo de Vida del Producto".

La definición de PLM, según J. Stark (Stark, 2015, Stark, 2016), es:

La Gestión del Ciclo de Vida de un Producto es la actividad empresarial de gestionar, de la forma más eficiente posible, los productos de una compañía a largo de todo su ciclo de vida, desde la primera idea inicial del producto hasta que este queda obsoleto y se retira.

La gestión del producto, por tanto, no se realiza de forma individual, sino que se lleva a cabo de forma global. La compañía es capaz de gestionar de forma conjunta todas las partes, productos y portfolios que disponga.

3.3.1 Producto en el PLM

El producto, o algún servicio que se relacione con éste, es lo que busca el consumidor. Es la fuente de beneficios de la compañía y sin él la misma no existiría.

Hay un amplio abanico de tipos de producto, y éstos pueden ser tangibles (un ordenador, una aeronave...) o intangibles (una póliza de seguros, un software...). Definido como servicio, el producto puede constar de un servicio aislado o en conjunto con otro producto físico. Un ejemplo de esto último sería un teléfono móvil y el posterior servicio de reparación del mismo.

El término producto engloba tanto al producto en si como al envoltorio, los extras que junto con él se incluyen (conectores, cables), la literatura necesaria para su uso (manual de instrucciones), la documentación legal, etc...

En un producto, sea tangible o no, el número de partes o piezas que lo conforman puede ir desde unas pocas hasta millones de ellas, como puede verse en la tabla 3.2.

El grado de complejidad de un producto se relaciona con el número de piezas que contiene y con la complejidad de éstas. Asimismo, las plataformas PLM permiten la gestión y la definición de relaciones entre componentes de forma sencilla.

| Producto | Número de piezas |
|--------------------|------------------|
| Desodorante | 20 |
| Sandwich | 30 |
| Champú | 50 |
| Reloj | 300 |
| Herramienta | 2000 |
| Coche | 25000 |
| Aeronave | 400000 |
| Lanzadera espacial | 2000000 |
| Software | 20000000 |

Tabla 3.2: Ejemplo de número de piezas en un producto (Stark, 2015).

3.3.2 Ciclo de vida en el PLM

Hay cinco fases en el ciclo de vida de un producto (Figura 3.6) y en cada una estas fases el producto se encuentra en un estado distinto.

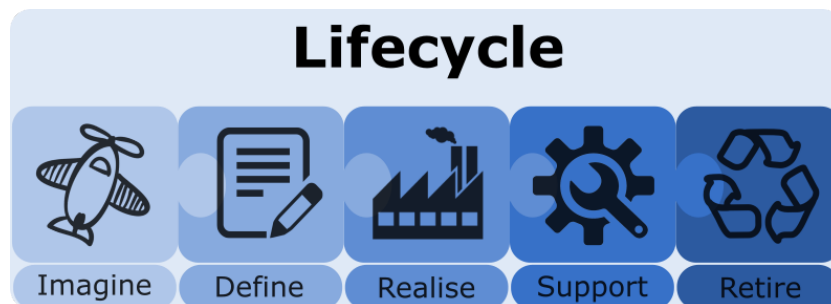


Figura 3.6: Fases del ciclo de vida de un producto (fuente: elaboración propia).

Durante la fase de imaginación (imagine) el producto es simplemente una idea, la cual se detalla en la segunda fase de definición. Tras definirlo correctamente comienza la tercera fase de fabricación (realise), después de la cual el producto está listo para su uso que, junto con el soporte que realiza la empresa, constituye la cuarta fase (support). La quinta y última fase se da cuando el producto se retira y se recicla (retire).

El ciclo de vida de cada producto es específico de la industria que lo englobe. Sin embargo, las cinco fases arriba definidas pueden ser adaptadas a cualquier compañía o industria particular.

3.3.3 Gestión en el PLM

El PLM es una herramienta empresarial que da a las empresas la capacidad de establecer una base global de información esencial en la comercialización y el correcto desarrollo de productos.

Como estrategia empresarial, las organizaciones adquieren de forma práctica la capacidad de trabajar como un único equipo conformado por cada uno de los departamentos. La función de la empresa se centra ahora en innovar y llevar a cabo cada uno de los aspectos del ciclo de vida del producto, y simultáneamente realizar un proceso retroactivo de aprendizaje de las lecciones y las prácticas recomendadas adquiridas durante dicho desarrollo.

En cuanto a estrategia de dirección, el PLM permite calcular y sacar provecho de las diferentes metodologías dedicadas a la aceleración de la explotación, limitar los costes de dicho proceso y

optimizar los beneficios relacionados con el producto o servicio que la compañía proporciona.

En forma de estrategia de información, se añade la creación de una estructura de datos asociada al producto, en la que se almacenan todos los detalles un solo lugar. Por lo tanto, se concilia la gestión de la información de forma eficiente, agilizando los trámites y el incremento en la colaboración entre individuos de un mismo equipo, entre departamentos o incluso entre organizaciones que cooperan en el ciclo de vida del producto. Con el uso de una base de datos global se evita la falta de información provocada muchas veces por la descentralización de los datos en sistemas fundados en procesos secuenciales o basados en papel.

Gracias a las plataformas PLM, los equipos responsables de un producto que se encuentran distribuidos por todo el mundo tienen acceso a una única ubicación donde se almacena todo el conocimiento y los estudios acerca del producto común y los procesos que lo definen. Adicionalmente, los equipos de fabricación y diseño son capaces de cooperar virtualmente, compartiendo en tiempo real la información.

3.4 Implementación del PLM en el sector aeroespacial

En 1999, el *Mars Climate Orbiter* de la NASA, de 125 millones de dólares, se acercó excesivamente a la atmósfera de Marte y se quemó. Las investigaciones concluyeron que uno de los equipos de ingenieros contratados proporcionó información sobre las maniobras propulsivas en el Sistema Imperial (libras y pulgadas) al equipo de navegación, el cual estaba usando el Sistema Internacional. Se desconocía este cruce de datos hasta la posterior investigación del accidente.

El telescopio espacial Hubble, proyecto en colaboración entre la NASA y la Agencia Espacial Europea, fue puesto en funcionamiento en abril de 1990. Las primeras imágenes que tomó no tenían la calidad esperada debido a que ciertas zonas del espejo primario eran 2 micrones más planas de lo que debían. Dicho error fue debido a un fallo en uno de los instrumentos de fabricación y verificación, el cual no había sido detectado correctamente. Para corregir la deficiencia en el espejo fue necesario efectuar otra misión, COSTAR, en la que se realizó la corrección. El coste de la misión COSTAR se estima entorno a los 500 millones de dólares.

Estos dos ejemplos y multitud de casos más dan a entender la importancia en la industria aeronáutica de tener una centralización de la información en la que se recogen todos los datos de cada uno de los departamentos encargados de que un producto siga su ciclo de vida.

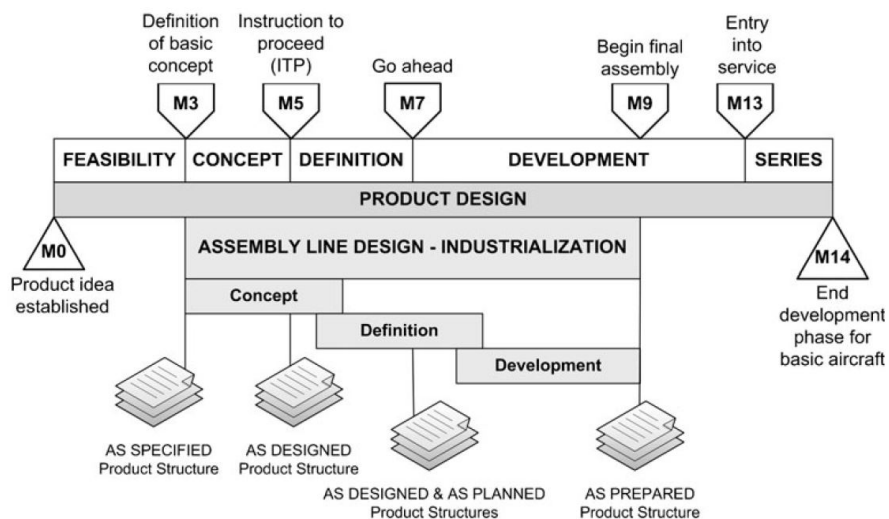


Figura 3.7: Fases e hitos en el ciclo de vida de un avión en Airbus (Mas et al., 2013a).

En las empresas de ámbito aeronáutico, el proceso que engloba desde que se plantea la idea inicial del producto hasta su puesta en servicio se estructura en fases e hitos. Concretamente, en el caso de un avión, el proceso de diseño evoluciona según el estándar RG-AERO-000-40A *General recommendation for the programme management specification* (BNAE, 1999). En dicho estándar se presentan una serie de hitos, llamados MX, que marcan el inicio de cada fase del ciclo de vida del producto hasta el momento de comercialización del mismo. A pesar de ser una recomendación general, en el sector aeronáutico es la base para la definición de procesos, en él se concreta el solape entre las distintas fases y la definición del concepto de concurrencia.

A partir de 1990 y partiendo de dicho estándar, en Airbus se emplea la metodología de la ingeniería concurrente/colaborativa durante el desarrollo de un avión. Los distintos equipos son ahora interdepartamentales, en los que se hace un intenso uso de herramientas informáticas de programas asistidos por ordenador (CAX) y de herramientas PLM, con el objetivo de hacer de la creación de una maqueta digital del producto (Digital Mock-Up, DMU) una tarea más sencilla. La Figura 3.7 muestra un esquema con las fases principales y los hitos más representativos del ciclo de vida de un avión en la compañía Airbus. En ella se muestran también las etapas de definición del producto en el proceso de ensamblaje, que se explicarán en detalle más adelante.

En términos económicos, el ciclo de vida de una aeronave es, comparado con el de cualquier producto habitual, especialmente largo. En la Figura 3.8 se puede observar como en las primeras etapas de diseño y fabricación, hasta que el producto entra en servicio, se realiza una gran inversión económica por parte del fabricante, la cual se recupera posteriormente con las ventas, tras un largo periodo de tiempo (European Commission, 2010). Es por tanto de gran importancia la correcta planificación de las fases de diseño y fabricación para lograr optimizar el tiempo y los recursos empleados en ellas, reduciendo la cuantía de la inversión inicial antes citada.

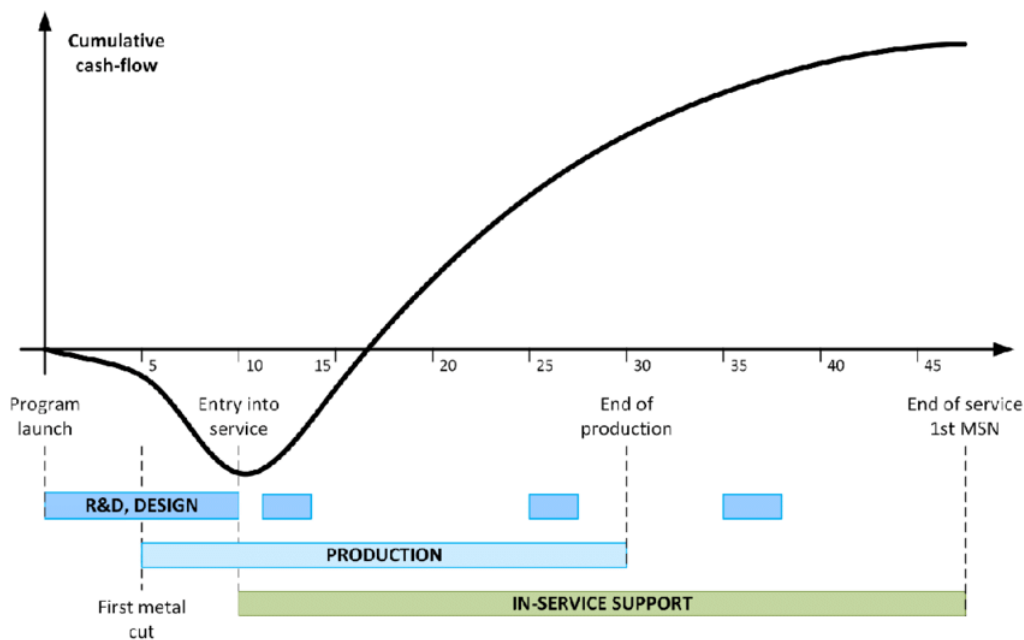


Figura 3.8: Flujo de caja durante el ciclo de vida de un avión civil típico (eje en años) (Ríos et al., 2016).

3.5 3DEXperience como plataforma PLM

3.5.1 Introducción a 3DEXperience

La compañía Dassault Systèmes, referente en el ámbito de las aplicaciones CAD/CAM, es propietaria de aplicaciones de gran renombre como puede ser CATIA, empleada en ámbitos de la ingeniería como el aeronáutico o en industrias de índole automovilística. Tras el éxito internacional de CATIA, la compañía invirtió en el desarrollo de aplicaciones de simulación (SIMULIA) y de definición de procesos (DELMIA), con las cuales se acercaba a poder gestionar la vida del producto mediante herramientas puramente virtuales.

Con la aparición y el auge de la ingeniería concurrente/colaborativa y el concepto de PLM, Dassault Systèmes concibió la plataforma 3DEXperience como unificadora de todas las aplicaciones de las que disponía hasta el momento (a las que se han ido añadiendo nuevas adquisiciones). 3DEXperience destaca por la interacción entre aplicaciones en un mismo interfaz de usuario (UI) y por hacer posible la colaboración en un entorno de nube pública o privada.

3DEXperience se define como una plataforma de uso empresarial capaz de facilitar soluciones informáticas para cada departamento que constituye la empresa, comprendiendo desde el departamento de ventas hasta el de ingeniería. Con una sola interfaz, promueve las *Industry Solution Experiences*, fundamentadas en el software de diseño tridimensional, la simulación, el análisis y la inteligencia en un contexto interactivo y colaborativo (Dassault Systèmes, 2017).



Figura 3.9: Aplicaciones de 3DEXperience (Dassault Systèmes, 2017).

El concepto de PLM se ve enriquecido, por lo tanto, por todos los recursos que 3DEXperience proporciona para cada ámbito de desarrollo y aplicación (Figura 3.9), siendo posible combinar cada una de las aplicaciones disponibles en un mismo proyecto y potenciando así los beneficios de la gestión virtual de información.

3.5.2 Productos y sus capacidades

3DEXperience se compone de distintos entornos de trabajo y módulos mediante los cuales se visualiza y manipula la información desde un punto de vista concreto según sea el propósito deseado. En la Figura 3.9 se puede observar un esquema de los módulos que la plataforma pone a disposición del usuario.

Los entornos de trabajo accesibles desde la plataforma se dividen en cuatro grupos principales:

- *3D Modeling*: dedicado al diseño y la fabricación asistida por ordenador, permite la creación de DMUs y la modelización de las actividades de fabricación de componentes.
- *Simulation*: concebido para la previsualización del comportamiento y la planificación de procesos (como el ensamblaje).
- *Information intelligence*: proporciona las herramientas necesarias para la eficiente gestión de datos e información.
- *Social and collaborative*: módulo dedicado al marketing y a la comunicación entre departamentos.

En la siguiente tabla se explica en detalle la finalidad de cada una de las aplicaciones principales presentes en los módulos anteriormente expuestos:

| Entorno | Módulo | Utilidad |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3D Modeling | SOLIDWORKS  | Aplicación de diseño asistido por ordenador (CAD). |
| | CATIA  | Aplicación CAD y de fabricación asistida por ordenador (CAM). |
| | GEOVIA  | Simulación y modelado de la Tierra para planificación de recursos naturales. |
| | BIOVIA  | Entorno para la investigación en biología, química y materiales. |
| Simulation | SIMULIA  | Aplicación de simulación realista para explorar el comportamiento de los productos. |
| | DELMIA  | Ayuda industrial para la colaboración, optimización y realización de operaciones. |
| | 3DVIA  | Ayuda en la toma de decisiones de compra-venta. |
| Information intelligence | EXALEAD  | Provee soluciones para la búsqueda, creación y manipulación de información. |
| | NETVIBES  | Creación de paneles de control para la monitorización en tiempo real, compartir información y toma de decisiones. |
| Social and collaborative | ENOVIA  | Entorno que permite y optimiza la colaboración entre los equipos de trabajo. |
| | 3DEXCITE  | Software dedicado al marketing, proporciona imágenes en 3D en tiempo real. |

Tabla 3.3: Módulos disponibles en 3DExperience (fuente: elaboración propia).

3.5.3 Ventajas e inconvenientes de la plataforma

Tras exponer las características de 3DExperience, se plantean ahora los beneficios e inconvenientes de la plataforma, obteniendo una visión objetiva de la misma.

Ventajas:

- Almacenamiento seguro, puede ser local o en la nube.
- Interfaz agradable e inteligente.
- Potente y completo compendio de aplicaciones que la convierte en una de las herramientas más punteras de su entorno.
- Alto grado de colaboración social, tanto de los equipos implicados en el desarrollo de cierto producto como con el cliente.
- Existencia de cursos propios a disposición del usuario para el aprendizaje de todas las aplicaciones.
- Aplicación de industria 4.0.

Inconvenientes:

- La gran cantidad de módulos y aplicaciones existentes dificulta el aprendizaje en profundidad de todo el potencial que ofrece.
- El estado de la plataforma se haya todavía en desarrollo, por lo que aparecen constantes actualizaciones y problemas con ciertas aplicaciones que se van resolviendo paulatinamente.
- Debido a la complejidad del *software*, la curva de aprendizaje es lenta.
- Inversión inicial elevada.
- Aspecto y tratamiento de la información distinto a los sistemas operativos conocidos, por lo que el periodo de adaptación es largo.

3.5.4 Autoaprendizaje de 3DExperience

El programa comprende tal cantidad de contenido que resulta inabarcable, en el tiempo disponible para la realización del proyecto, pretender comprender y emplear cada una de las posibilidades que ofrece.

Es por ello que, debido al carácter del trabajo que se plantea, se propone trabajar con el entorno de simulación. Concretamente con el módulo DELMIA, mediante el cual es posible plantear y analizar el proceso de ensamblaje de una aeronave.

3DExperience pone a disposición del usuario una serie de cursos para el aprendizaje de los distintos módulos y aplicaciones. Dichos cursos se muestran en su plataforma "*Peer Learning*" (Figura 3.10).

La plataforma contiene varios bloques educativos. El bloque "*COMPANION Learning Space*" va encaminado al aprendizaje de las herramientas disponibles de forma general. El resto de bloques que se aprecian en la figura están dedicados a una experiencia concreta como es el diseño de un coche de alta gama (*BLEU Story*), el diseño de un edificio (*Architecture Story*), de un envase de perfume (*French Fragrance Story*) y a la innovación independiente (*Innovative Professors*).

El espacio COMPANION se haya dividido en cuatro sub-bloques (Figura 3.11), cada uno de los cuales está enfocado en adquirir los conocimientos de un módulo concreto, siendo posible elegir entre los módulos: ENOVIA, CATIA, SIMULIA y DELMIA.

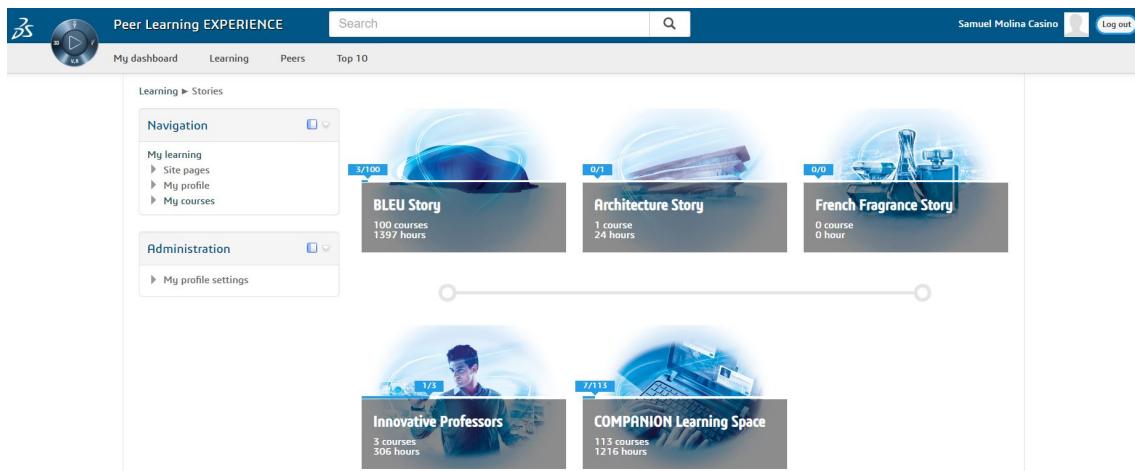


Figura 3.10: Página principal de *Peer Learning* (Dassault Systèmes, 2019).

Los sub-bloques de interés para el trabajo a realizar son los correspondientes al módulo de CATIA de diseño, con el objetivo de manipular el modelo 3D de la aeronave; y el módulo de DELMIA de procesos digitales, para la planificación y análisis de las actividades de ensamblaje.

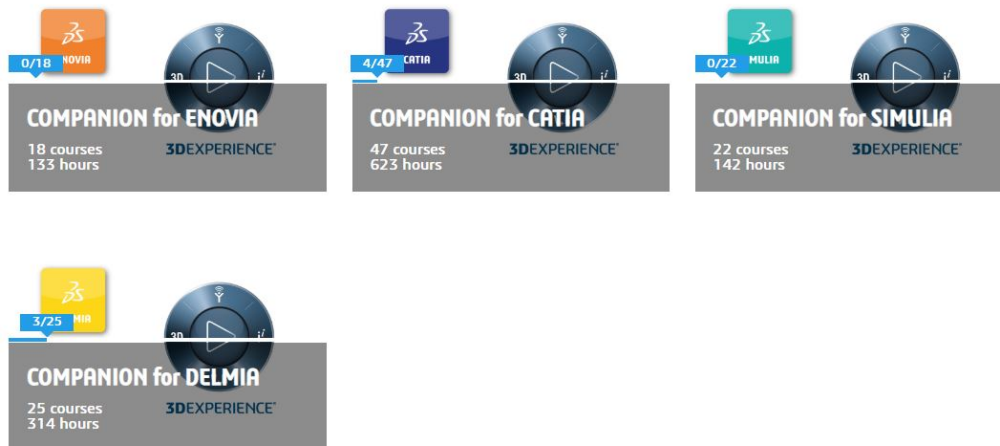


Figura 3.11: Página principal del bloque COMPANION (Dassault Systèmes, 2019).

Los cursos realizados de cada uno de los sub-bloques expuestos son los siguientes:

- COMPANION for CATIA:

- *Mechanical Design Fundamentals*: diseño de piezas simples.
- *Part Design Fundamentals*: diseño de componentes como conjunto de piezas.
- *Part Design Expert*: diseño de componentes complejos junto con el tratamiento de materiales y propiedades.
- *Assembly Design Fundamentals*: unión en el espacio de piezas y análisis de pesos.

- COMPANION for DELMIA:

- *Manufacturing Item Definition Essentials*: relación entre elementos que componen el producto.

- *Process Planning Essentials*: planificación de procesos a seguir para la obtención de un producto.
- *Plant Layout Design Essentials*: distribución en planta de las herramientas necesarias para el ensamblaje.
- *Time Motion Study Essentials*: estudio de los tiempos dedicados a cada tarea.
- *Process Flow Simulation Essentials*: simulación del comportamiento dinámico de un sistema.

La duración de cada uno de los cursos va desde las 8 hasta las 32 horas. Se estructuran en forma de temas (Figura 3.12), donde se explica de forma tanto teórica como práctica una función o funciones específicas de la aplicación mediante el uso de un ejemplo proporcionado al principio del tema. Tras la finalización del tema se propone un ejercicio guiado a realizar por el alumno. Finalmente, tras todos los temas se plantea un ejercicio global, el cual no dispone de instrucciones y pone a prueba lo aprendido a lo largo de los temas previos.

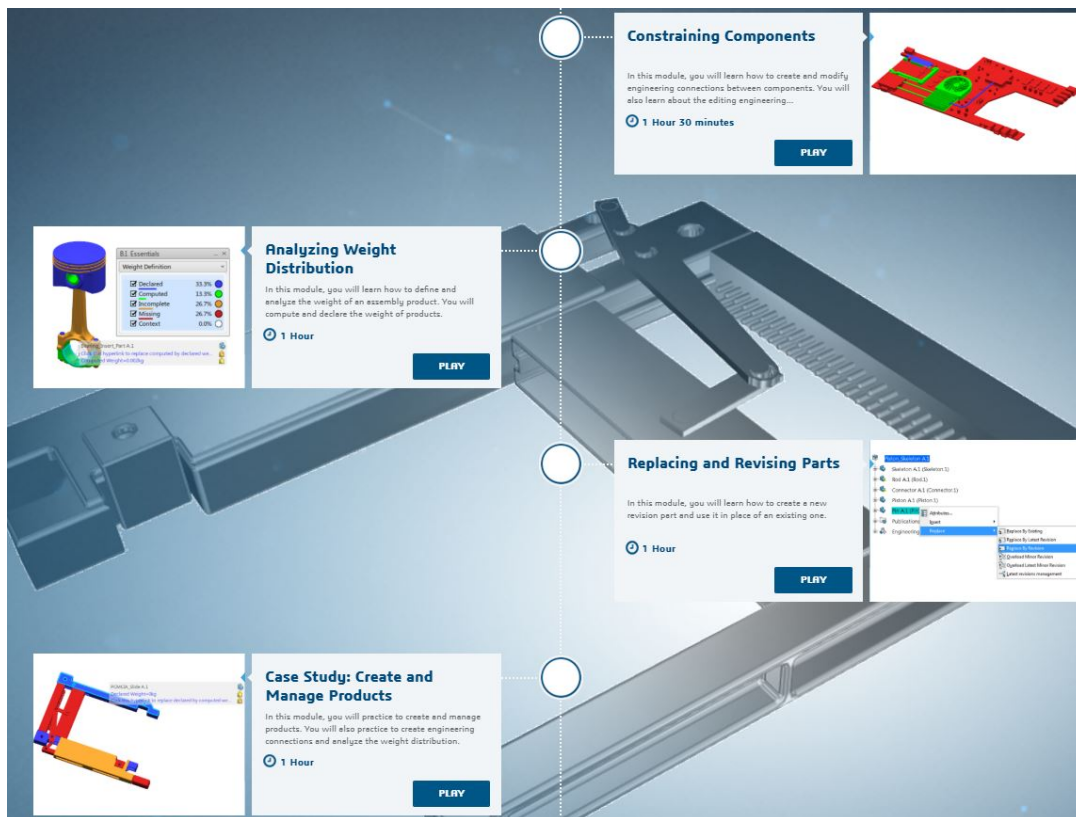


Figura 3.12: Estructura de los cursos de aprendizaje (Dassault Systèmes, 2019).

Una vez finalizados estos cursos se puede afirmar que se ha adquirido la destreza y los conocimientos necesarios para poder llevar a cabo el proyecto que se plantea con seguridad y siendo capaz de analizar cuál es la herramienta conveniente en cada fase del mismo.

4 Caso de estudio: Línea de Ensamblaje Final del A350

4.1 Modelo de A350

El modelo 3D del A350 XWB se ha extraído del repositorio libre de modelos, GrabCAD (<https://grabcad.com/>); y ha sido modelado por Mehmet Canaz (Canaz, 2017). Se obtiene en un fichero de extensión .zip, que contiene los archivos .step de los componentes de la aeronave (Figura 4.1).

Según la división de la aeronave expuesta en el esquema de la Figura 1.2, se muestra a continuación el modelo tridimensional de cada uno de los sistemas que se van a tratar:

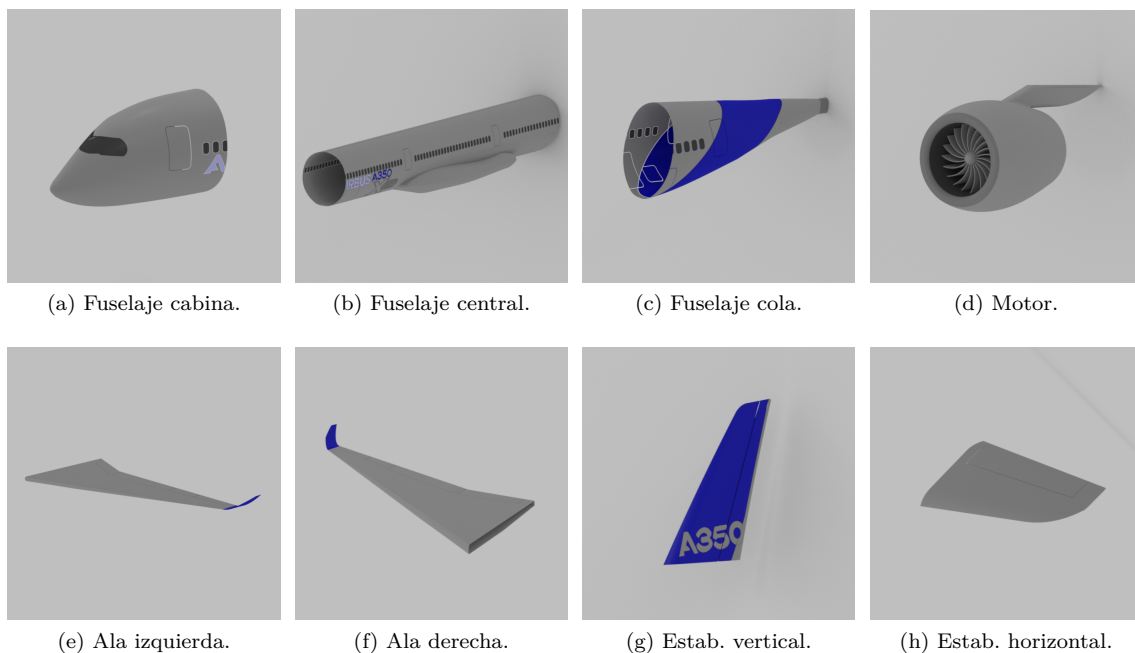


Figura 4.1: Modelos 3D de los sistemas del avión (Canaz, 2017).

No se ha realizado una división en mayor profundidad de los sistemas debido a que se pretende simular una FAL, la cual se lleva a cabo con los sistemas una vez estos ya han sido ensamblados.

4.2 Alternativas propuestas

Con el objetivo de poder observar el potencial de 3DEXperience a la hora de analizar y posteriormente seleccionar la mejor propuesta, se proponen dos alternativas al proceso de ensamblaje, cada una de ellas siguiendo una secuencia de montaje distinta.

Para los esquemas que se muestran en los apartados siguientes se emplea la nomenclatura:

| | | | |
|-----|----------------------------|---------|-------------------------------|
| FD: | Sección fuselaje de cabina | EH: | Estabilizador horizontal |
| FC: | Sección fuselaje central | EV: | Estabilizador vertical |
| FT: | Sección fuselaje de cola | Cel: | Célula (Estructura sin motor) |
| AI: | Ala izquierda | FusCol: | Conjunto fuselaje - cola |
| AD: | Ala derecha | FusC: | Conjunto fuselaje - alas |

Tabla 4.1: Nomenclatura para descripción de propuestas (fuente: elaboración propia).

4.2.1 Propuesta FAL I

La primera propuesta se basa en la planificación del ensamblaje desde un punto de vista industrial (Figura 3.5). El objetivo es el aprovechamiento de los recursos con la intención de realizar el proceso en el menor tiempo posible.

A continuación se presenta la propuesta en forma de esquema y de tabla para un mejor entendimiento.

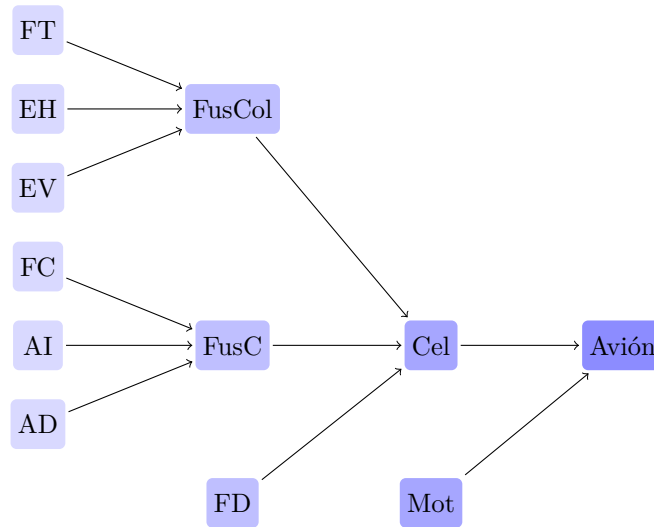


Figura 4.2: Alternativa de secuencia de ensamblaje I (fuente: elaboración propia).

Como se observa de los esquemas planteados, la primera fase de la FAL consiste en la realización en paralelo del ensamblaje del grupo estabilizador y el grupo alar sobre las secciones correspondientes del fuselaje. Posteriormente se lleva a cabo la unión completa del fuselaje, obteniendo así la célula del avión, a la que se añaden los motores en una última fase para alcanzar el producto final.

| Propuesta de FAL I | | | |
|--------------------|--------|-----|-------|
| FT | FusCol | Cel | Avión |
| EH | | | |
| EV | | | |
| FC | FusC | | |
| AI | | | |
| AD | | | |
| | FD | Mot | |
| | | | |

Tabla 4.2: FAL I (fuente: elaboración propia).

La principal ventaja de esta alternativa, apreciable a simple vista, es la optimización del tiempo que parece realizarse gracias al planteamiento de ensamblaje en paralelo de los grupos funcionales.

En el posterior análisis se comprobará si dicha ventaja es superior al hecho de tener que esperar a que ambas estaciones de trabajo hayan concluido su tarea para poder proseguir con el montaje. Ya que durante dicho periodo de espera una de las dos estaciones no será productiva.

4.2.2 Propuesta FAL II

Como segunda propuesta, se seguirán los pasos de Airbus en su FAL de Toulouse (Airbus, 2012).

Se propone este esquema de ensamblaje con la finalidad de poder comparar con la alternativa anterior y observar sus virtudes a pesar de conllevar un mayor tiempo de montaje. Además, se tratará de hallar las evidencias que marquen los posibles motivos que hicieron que el fabricante tomara la decisión de planificar el proceso de tal manera.

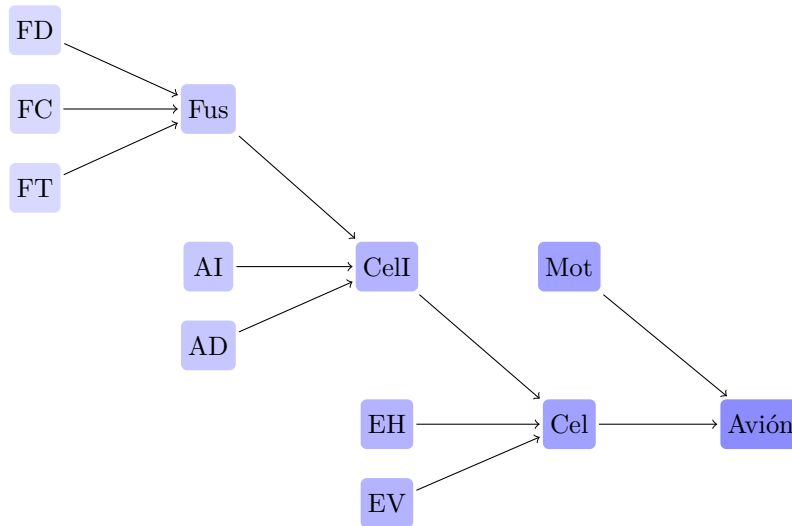


Figura 4.3: Propuesta de secuencia de ensamblaje II (fuente: elaboración propia).

Tal y como ya fue expuesto en el Apartado 2.4, Airbus realiza un procedimiento de ensamblaje secuencial, de forma que cuando una estación termina de realizar sus tareas con una aeronave, la traslada a otra estación y acoge otra nueva. Por lo tanto, en un mismo recinto se pueden producir de forma simultánea varios aviones, obteniendo así una productividad (a primera vista) mayor que en la propuesta anterior. Además, la gestión del espacio se halla optimizada, ya que para la producción de un mismo número de aeronaves serán necesarias menos estaciones de trabajo y operarios.

| Propuesta de FAL II | | | | |
|---------------------|-----|--------|------|-------|
| FD | Fus | Cell I | Cell | Avión |
| FC | | | | |
| FT | | | | |
| | AI | | | |
| | AD | | | |
| | | EH | | |
| | | EV | | |
| | | | Mot | |

Tabla 4.3: FAL II (fuente: elaboración propia).

Se aprecia que, a pesar de seguir una secuenciación distinta, los grupos de ensamblaje se asemejan a la visión funcional, en la que primero se une el fuselaje, para posteriormente añadir las alas y el estabilizador sobre las secciones correspondientes.

4.3 Definición del proceso de ensamblaje con DELMIA

Para definir el proceso de ensamblaje de cada una de las alternativas se hará uso de varios módulos de trabajo de la aplicación DELMIA proporcionada por 3DExperience. A modo de resumen de los pasos a seguir se muestra la Figura 4.4. En los subapartados siguientes se expondrá cada uno de ellos de forma que se pueda comprender el procedimiento seguido.

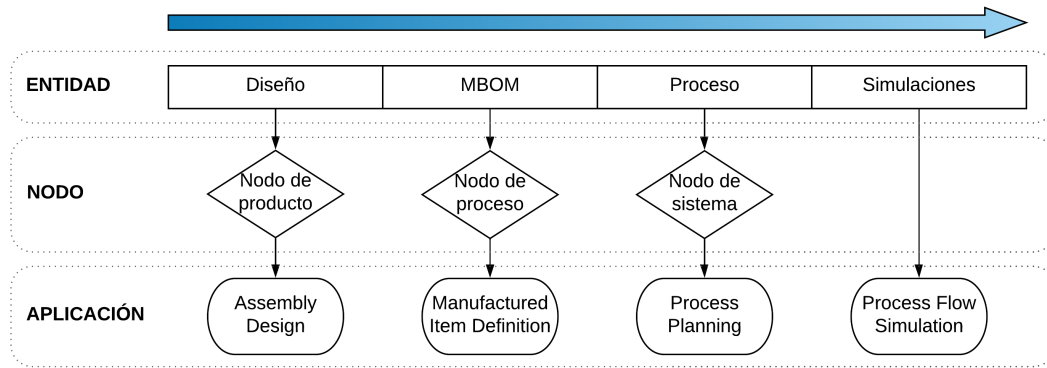


Figura 4.4: Secuencia a seguir en 3DExperience (fuente: elaboración propia).

4.3.1 DELMIA Manufactured Item Definition

Se define como lista de materiales (*Bill of Materials*, BOM) a la lista subensamblajes, componentes o piezas (y sus cantidades exactas) de un producto final. En el caso del A350, el BOM consta de infinitud de piezas. Sin embargo, como ya ha sido comentado, se divide la aeronave en los subensamblajes (sistemas) que se describen en la Figura 1.2. Los objetos que aparecen en el BOM pueden estar definidos como:

- *as designed* (*Engineering Bill of Materials*, EBOM).
- *as planned* (*Sales Bill of Materials*, SBOM).
- *as built* (*Manufacturing Bill of Materials*, MBOM).
- *as maintained* (*Service Bill of Materials*, SBOM).

Durante la realización del proyecto se supone que se tiene el diseño de la aeronave previo a su fabricación, por lo que se trata de un EBOM (*as designed*), esto es, un nodo de producto.

El objetivo principal del módulo es el de, a partir del EBOM, crear un MBOM. El uso práctico de este último es la definición de las relaciones jerárquicas entre los sistemas que componen el producto a nivel de procesos de fabricación, con ello se crea un nuevo nodo denominado nodo de proceso.

En el *Manufactured Item Definition* se hace uso de los llamados *scopes*, los cuales forman un vínculo que liga el nodo de producto con el de proceso. Este paso es de vital importancia para que la plataforma sea capaz posteriormente de reconocer la secuencia de ensamblaje que se imponga en los siguientes módulos de DELMIA.

Los *scopes* pueden tener distintos niveles, es decir, pueden relacionar el producto completo y el ensamblaje final o los sistemas individuales del producto con los subgrupos del proceso completo. El utilización de los niveles de los *scopes* se justifica en la existencia de diferentes productos fabricados

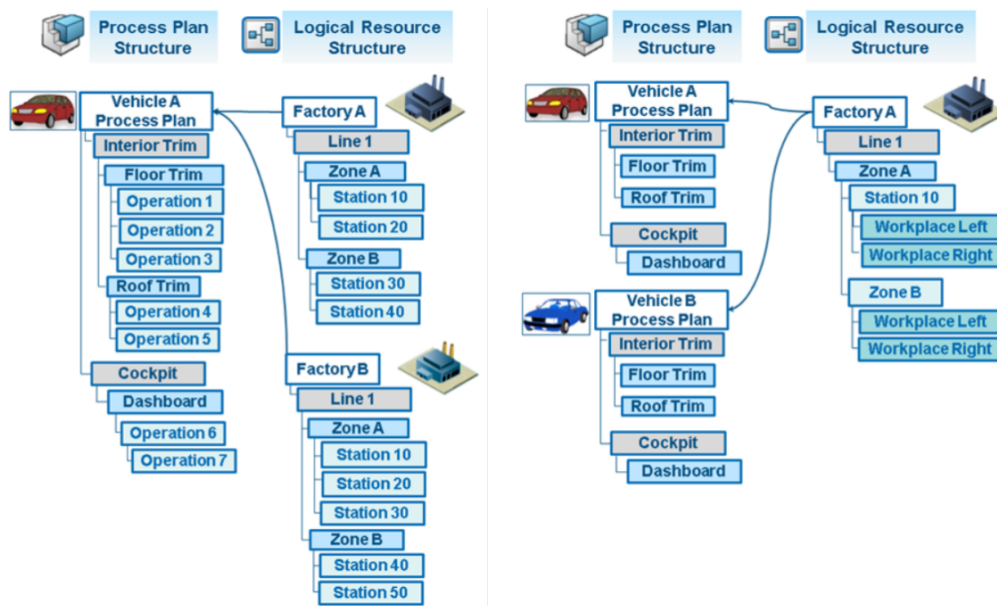


Figura 4.5: Producción multimodelo (izquierda) y multilocalización (derecha) (Dassault Systèmes, 2019).

en una misma planta (producción multi-modelo) o de un mismo producto cuya fabricación se realiza en más de una planta (producción multi-localización) (Figura 4.5). Mediante los niveles antes comentados es posible asociar cada uno de los procesos a una planta de producción concreta o incluso el uso de un *scope* común en dos productos distintos.

La estructura de un MBOM se compone de objetos, los cuales se relacionan entre si formando ensamblajes y grupos. Los objetos ayudan a la definición del producto componente a componente. Con el apoyo de la Figura 4.6, se pretende hacer una clasificación de estos:

- *Manufacturing Assembly*: ensamblaje compuesto de varias piezas o subensamblajes.
- *Manufacturing Installation*: se refiere a un estado intermedio del producto en el que piezas o subensamblajes se instalan como un producto mayor pero no generan un nodo de ensamblaje.
- *Manufacturing Kit*: componentes o piezas que no se ensamblan con otros elementos, sino a la estructura principal o célula.
- *Manufactured Part*: indica las condiciones y especificaciones de un componente cuando la pieza diseñada en el modelo difiere de la que se fabrica en la realidad.
- *Manufactured Material*: similar a un *Manufacturing Assembly* pero con el objetivo de generar una pieza completamente nueva. Para ejemplificarlo mejor, se puede visualizar como una receta, en la que los ingredientes forman un nuevo conjunto mediante cierta interacción entre ellos.
- *Continuous Manufactured Material*: similar a *Manufactured Material*, pero se crea un conjunto que se cuantifica de forma continua.
- *Provided Part*: producto o pieza individual, necesario para la creación de *Manufacturing Assemblies*.
- *Continuous Provided Material*: similar a *Provided Part*, cuantifica elementos que se especifican con unidades continuas, como volumen o masa.

- *Fasten*: elementos de unión (tornillos, remaches, etc), van asociados al *Manufacturing Assembly* en el que se emplean.
- *Transform*: estación de transformación de un ensamblaje o producto y de la que se quiere dejar constancia. Un ejemplo de ello sería la estación de pintado.
- *Remove Material*: se refiere al proceso de eliminación de material sobre alguna pieza.

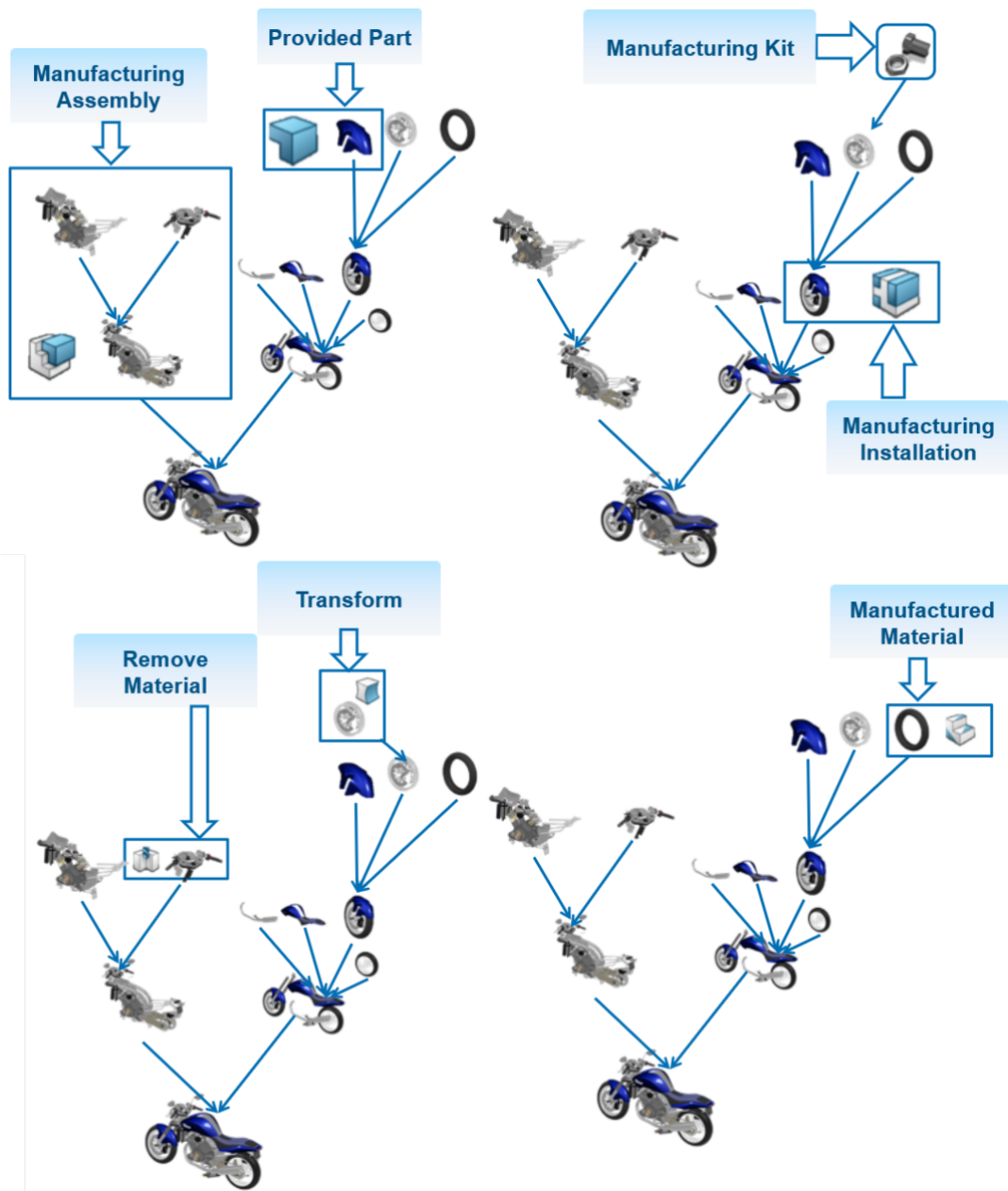


Figura 4.6: Tipos de objeto presentes en un MBOM (Dassault Systèmes, 2019).

Con los objetos y operaciones disponibles en el módulo se puede descomponer el proceso de fabricación de cualquier producto en estaciones por niveles que se secuencian de la manera deseada, por lo que se obtiene una estructura esquematizada del proceso.

En el modelo del A350 que se posee el MBOM será diferente para cada una de las alternativas, ya que los ensamblajes intermedios que se forman en cada caso son distintos. Tras desarrollarlo en 3DEXperience se obtiene lo mostrado en las Figuras 4.7 y 4.8.

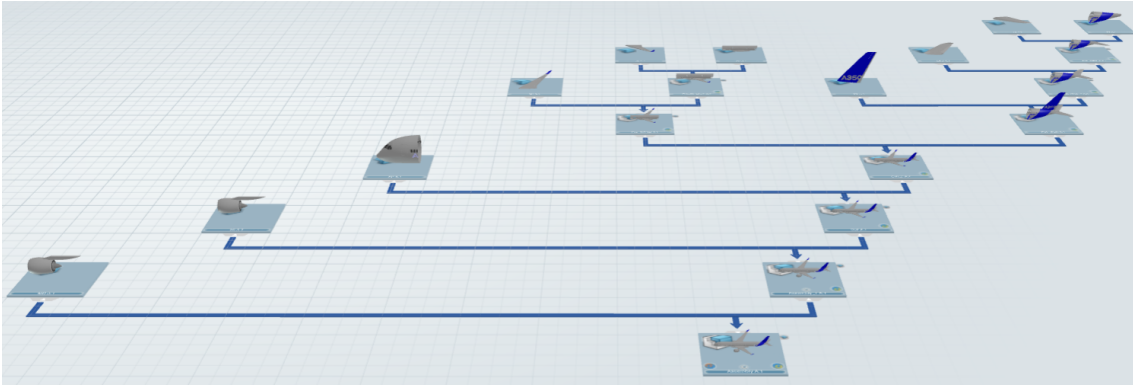


Figura 4.7: Nodos de proceso del MBOM del A350 XWB en la FAL I (fuente: elaboración propia).

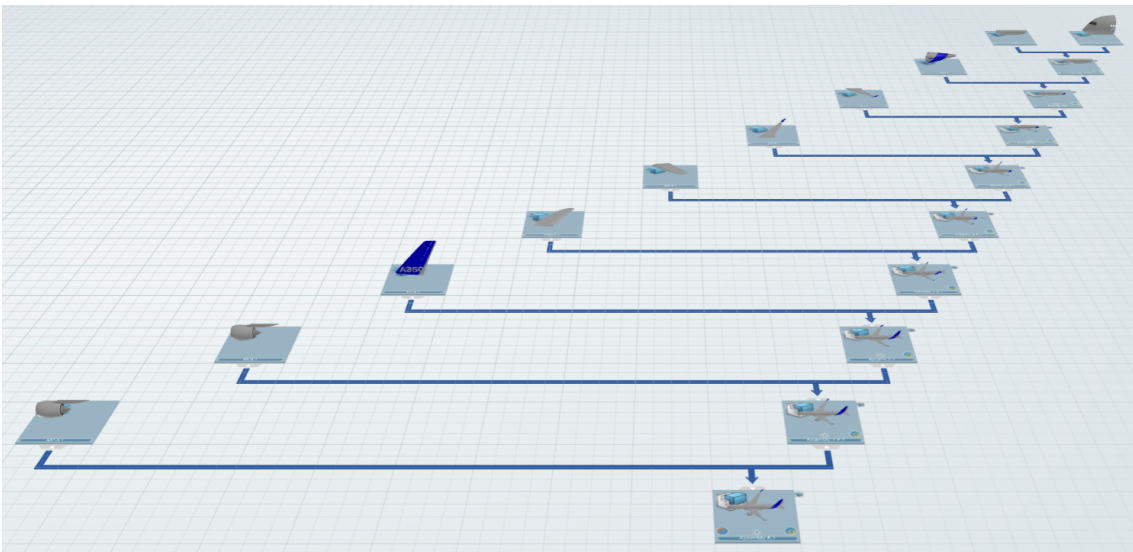


Figura 4.8: Nodos de proceso del MBOM del A350 XWB en la FAL II (fuente: elaboración propia).

Este es un procedimiento en el que se vincula el diseño del modelo que se tiene (EBOM) con el producto que se desea ensamblar (MBOM). Constituye, por tanto, un escalón intermedio necesario para la posterior definición de los procesos de montaje deseados.

Debido a la extensión original de los archivos empleados para la realización del proyecto, la estructura más simplificada que se tiene de cada uno de los sistemas es la que se expone en el esquema de la Figura 1.2. Las consecuencias de esto son nulas para la realización del presente proyecto, ya que cada uno de los sistemas se introduce como un *Manufacturing Assembly*, el cual contiene los componentes como *Provided Parts* (un ejemplo del fuselaje se muestra en Figura 4.9). En el caso de que se deseara una descomposición mayor de los sistemas en subsistemas y piezas individuales, se haría uso de *Manufacturing Installations*.

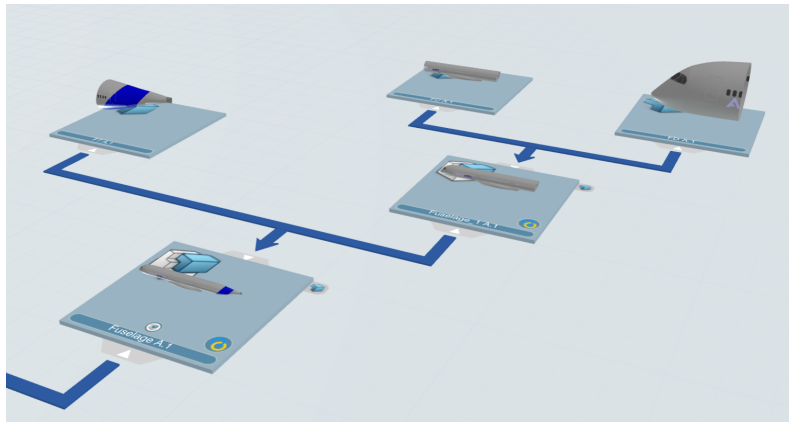


Figura 4.9: *Provided parts* asociadas a sus *manufacturing assemblies* (fuente: elaboración propia).

4.3.2 DELMIA Process Planning

El módulo *Process Planning* permite crear los sistemas de fabricación, gestionarlos y modificar su estructura de forma que se puede equilibrar el número de productos fabricados y las operaciones a realizar. Todo ello dando lugar al nodo de sistema.

En este módulo se parte del nodo de proceso y se definen las operaciones y su secuenciación, tomando como base el MBOM creado anteriormente. Además, a cada operación se le asignará un tiempo de realización, modelándose así el proceso de ensamblaje deseado.

El nodo de sistema es una representación de la estructura del proceso de ensamblaje adoptado y es independiente de la distribución en planta que este tenga posteriormente. Permite analizar las propiedades del proceso planteado y compararlas con otras estructuras.

Análogamente a como ocurría con el módulo *Manufacturing Item Definition*, es necesario establecer *scopes* que relacionen el nodo de sistema con el de proceso en este caso. En la Figura 4.10 se presenta un ejemplo de un nodo de sistema, se muestra la asociación de un mismo diseño a dos factorías, compuestas por estaciones, en cada una de las cuales se realiza una operación concreta.

Para crear los *scopes* ha de definirse previamente un *system tile*, una casilla a la que se le asignará el producto. Una vez todas han sido asignadas, la estructura del proceso ya se habrá fijado. Cabe destacar que únicamente se habrá determinado la estructura, pero aún será necesario adjudicar la secuencia de operaciones entre casillas. Se muestra un ejemplo de ello en la Figura 4.11.

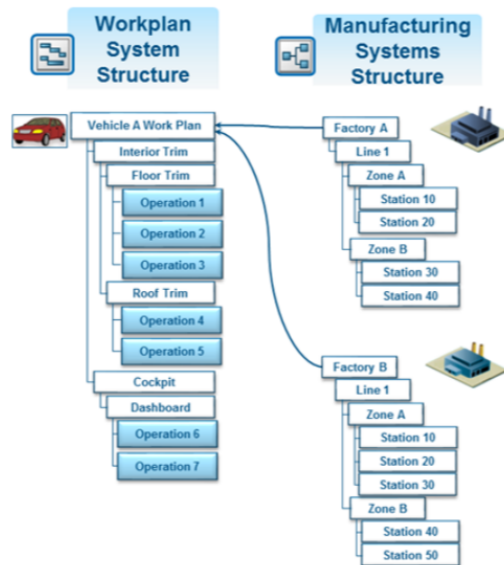


Figura 4.10: Nodo de sistema (Dassault Systèmes, 2019).

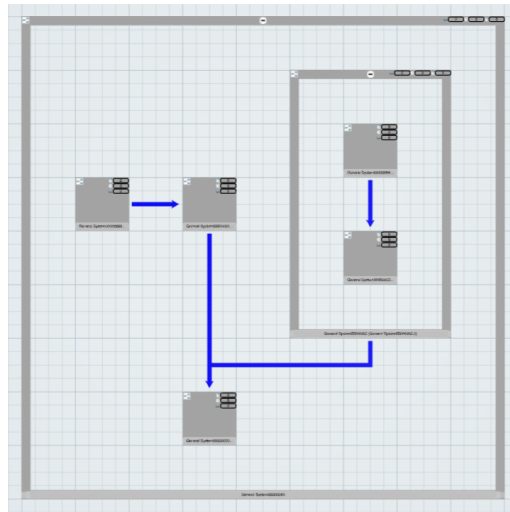


Figura 4.11: Ejemplo de *system tiles* con una secuencia establecida (fuente: elaboración propia).

4.3.2.a Flujo del proceso

El término *Process Flow* engloba tanto a la creación de la estructura de *system tiles* en pantalla como al establecimiento del orden en el que se desea que las aplicaciones sean realizadas.

Los *system tiles* se clasifican según la función que tienen dentro del sistema global, en la Tabla 4.4 se exponen los tipos existentes así como una breve descripción de los mismos.






| Tipo de sistema | | Descripción |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>General</i> |  | Usado como sistema general. |
| <i>Transfer</i> |  | Empleado para modelar el transporte de productos entre sistemas. |
| <i>Source</i> |  | Simula la llegada de productos al sistema de producción. |
| <i>Sink</i> |  | Modela el despacho de productos acabados del sistema de producción. |
| <i>Buffer</i> |  | Representa el almacenamiento de productos a la espera de que otro sistema lo requiera. |

Tabla 4.4: Tipos de *system tiles* disponibles (fuente: elaboración propia).

Con la aplicación se pretende analizar las características del proceso de ensamblaje diseñado. Para poder llevar a cabo dicho análisis es necesaria la definición de las operaciones a realizar, ya que el programa posteriormente les adjudicará un tratamiento en las simulaciones según el tipo de actividad de la que se trate. Con este objeto, el módulo pone a disposición del usuario la clasificación mostrada en la Tabla 4.5.








| Tipo de operación | | Descripción |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>General</i> |  | Usado en operaciones de adición de material (Loading/Fastening). |
| <i>Loading</i> |  | Operación básica usada muchas veces como operación de ensamblaje. |
| <i>Point Fastening</i> |  | Empleada en operaciones de soldadura, atornillado o remachado puntuales. |
| <i>Curve Fastening</i> |  | Empleada en operaciones de soldadura, atornillado o remachado de a lo largo de una línea. |
| <i>Unloading</i> |  | Usada para eliminar partes de un ensamblaje (permanente). |
| <i>Transfer</i> |  | Operación de desplazamiento de un punto a otro. |
| <i>Remove Material</i> |  | Operaciones de fresado, torno, taladrado. |

Tabla 4.5: Operaciones del módulo *Process Planning* (fuente: elaboración propia).

En las líneas de ensamblaje propuestas únicamente se van a modelar las operaciones de carga y ensamblaje de componentes, sin describir ninguna actividad de eliminación de material ni de descarga. En consecuencia, de todas las operaciones y sistemas existentes, para el desarrollo del proyecto serán necesarias exclusivamente las listadas a continuación:

- Sistemas:
 - *General System*: para modelar las estaciones que contienen las operaciones.
 - *Transfer System*: para el desplazamiento de las estructuras ensambladas entre estaciones de la FAL.
 - *Source System*: para modelar la llegada de los componentes necesarios durante el ensamblaje.
 - *Sink System*: para simular la salida de las aeronaves de la planta de montaje.
- Operaciones:
 - *Loading*: para simular el posicionamiento de los sistemas en cada estación. Se emplea en la carga de los sistemas en cada una de las estaciones.
 - *General operation*: usada para la unión de los sistemas formando ensamblajes o subensamblajes.

En el caso de estudio, al ser el nodo de sistema representativo del proceso de ensamblaje, existirá uno por cada una de las propuestas de FAL que aparecen en el Apartado 4.2. El resultado se exhibe en las Figuras 4.12 y 4.13.

En la Figura 4.14 puede observarse una vista en detalle de la estación de ensamblaje de la cola de la FAL I, donde es posible apreciar el uso que se hace de las operaciones y estaciones antes mencionadas.

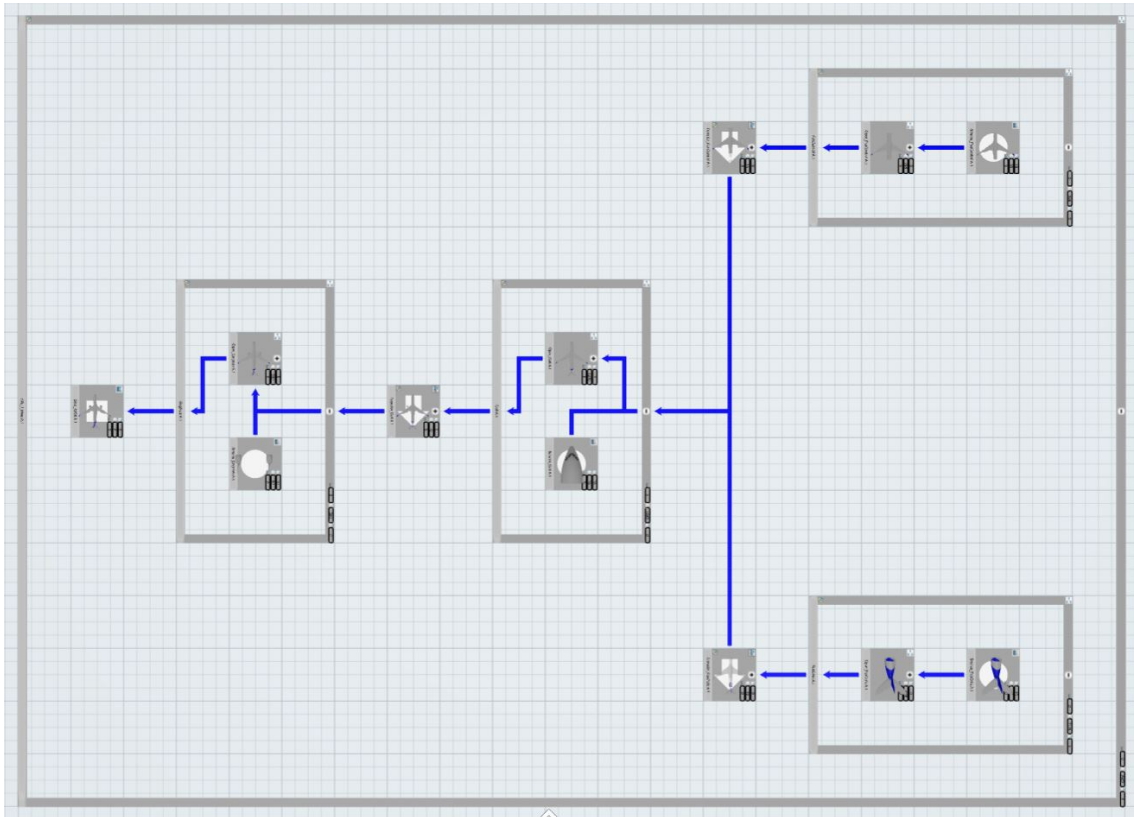


Figura 4.12: *Process Planning* de la FAL I (fuente: elaboración propia).

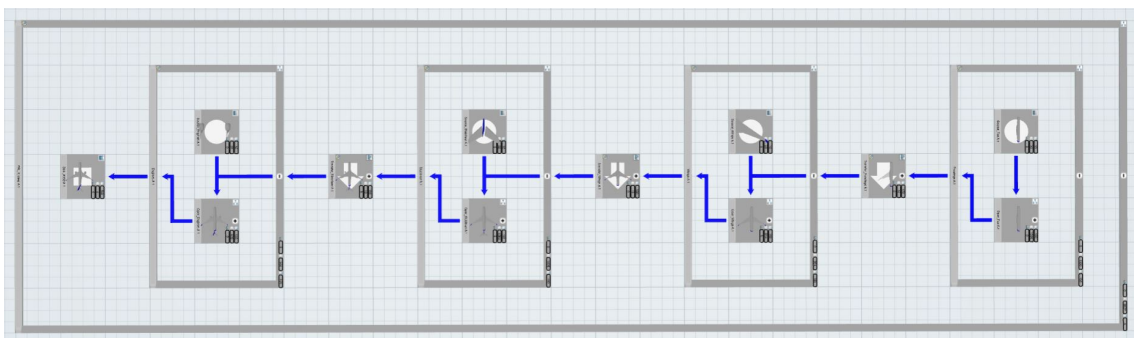


Figura 4.13: *Process Planning* de la FAL II (fuente: elaboración propia).

El sistema *source* se emplea por tanto para cargar en el sistema los productos que van a ser ensamblados en la estación. Hay uno de estos sistemas en cada estación.

Tal y como se aprecia en las imágenes, la secuencia a seguir entre las operaciones ya se ha establecido en la aplicación, en pantalla se visualiza mediante un flecha azul oscuro que parte de cierta casilla y apunta a la siguiente a realizar, pudiendo ordenar las estaciones de ensamblaje según la cronología deseada.

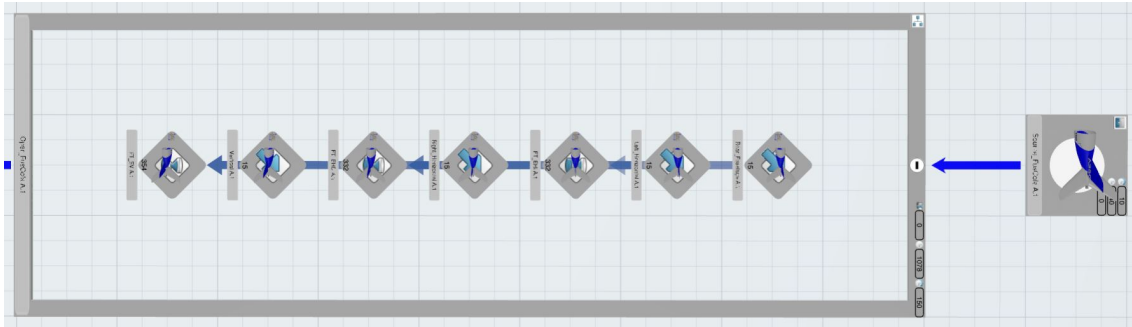


Figura 4.14: Operaciones de la estación de cola en la FAL I (fuente: elaboración propia).

La limitación de este procedimiento radica en que la plataforma 3DExperience, para dos estaciones independientes entre sí, asigna un instante inicial común. Por lo tanto, si se desea que una comience en otro momento es necesario crear una cronología más específica con leyes de inicio o final de las operaciones (flechas azul traslúcidas). Además, se secuenciarán también las operaciones dentro de cada estación. Con dicha intención se realiza un diagrama de Gantt del sistema.

4.3.2.b Gestión del proyecto

Para la gestión de las actividades del proceso de ensamblaje, se halla a disposición del usuario una herramienta que permite generar un diagrama de Gantt. Mediante el cual se van a secuenciar las operaciones incluidas en una misma estación, así como también se definirán los tiempos dedicados a cada actividad (si no se ha hecho en la determinación de la estructura del proceso).

Del Anexo II se extraen los tiempos a emplear para cada una de las operaciones de ensamblaje. A estos se les añaden también los tiempos de transporte entre estaciones y carga de componentes (los cuales se van a considerar iguales para todas las instancias).

| Unión a realizar | Tiempo estimado (h) |
|------------------------------------|---------------------|
| Fuselaje central - Fuselaje cola | 702 |
| Fuselaje central - Fuselaje cabina | 553 |
| Ala - Fuselaje central | 442 |
| Estab. vertical - Fuselaje cola | 354 |
| Estab. horizontal - Fuselaje cola | 332 |
| Motor - Ala | 250 |

| Operación | Tiempo estimado (h) |
|-----------------------------|---------------------|
| Carga de componente | 15 |
| Transporte entre estaciones | 10 |

Tabla 4.6: Tiempo estimado de las operaciones (fuente: elaboración propia).

Se dispone de una herramienta específica para la secuenciación de las operaciones, que propor-

ciona las siguientes opciones para modificar el momento en el que estas comienzan o finalizan:

- Enlace de precedencia: cuando finaliza una operación comienza la siguiente sin ningún tipo de retraso.
- Enlace de final común: las dos operaciones seleccionadas acaban en el mismo instante.
- Enlace de inicio común: los dos operaciones seleccionadas empiezan en el mismo instante.
- Enlace de final-inicio: similar al de precedencia, pero el inicio de la segunda operación lleva un determinado retraso respecto del final de la primera.

Debido a la naturaleza de la línea de ensamblaje, únicamente se emplean los enlaces de inicio común (para el comienzo de las estaciones en paralelo de la propuesta I) y de precedencia.

Tras asignar los tiempos y ordenar las operaciones según la cronología deseada, se obtiene el diagrama asociado en pantalla, se muestra el resultado de la FAL I en la Figura 4.15.

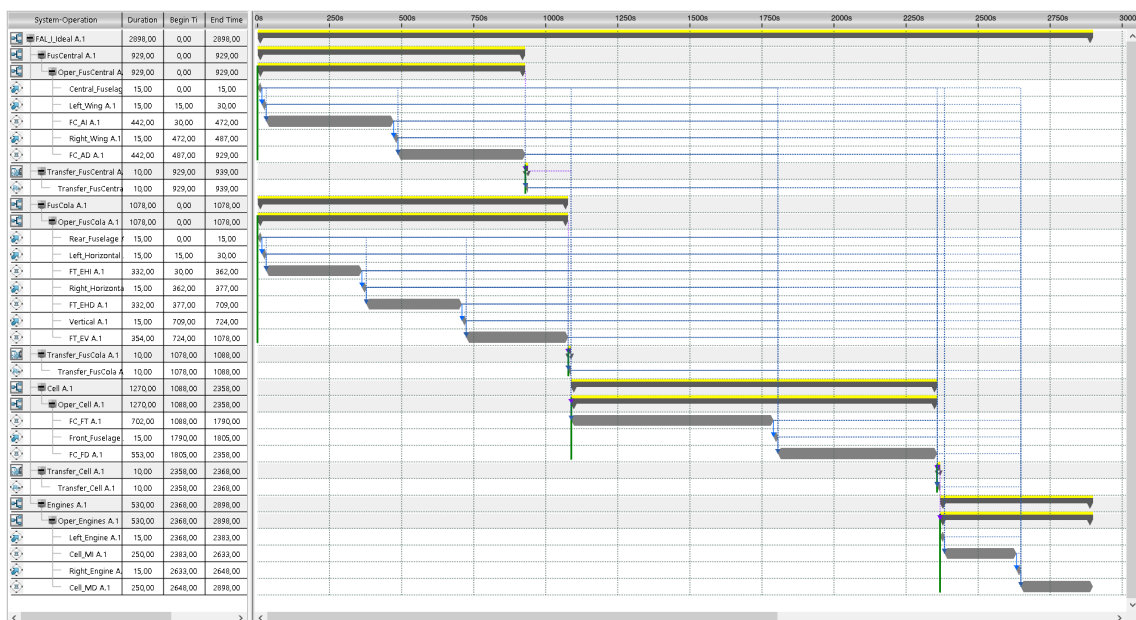


Figura 4.15: Diagrama de Gantt de la la FAL I (fuente: elaboración propia).

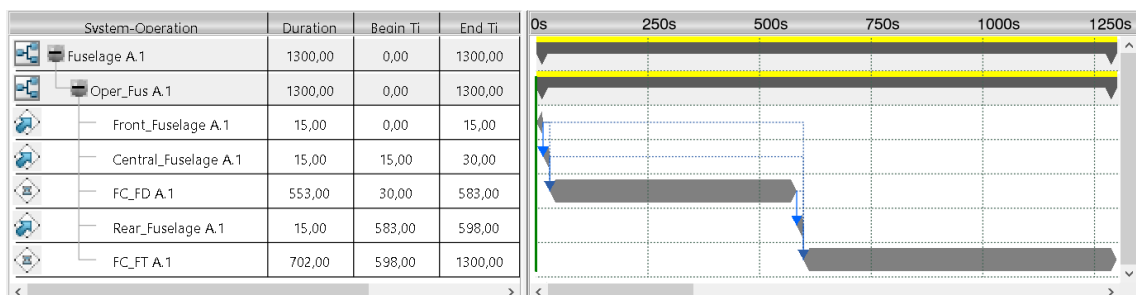


Figura 4.16: Detalle del diagrama de Gantt de la la FAL I (fuente: elaboración propia).

Con la finalidad de mostrar el diagrama completo no se aprecian correctamente los los tiempos de carga y transporte ya que, en comparación con los de ensamblaje, son muy pequeños y la escala del diagrama no permite que se observen. Una vista en detalle con estas operaciones se adjunta en la Figura 4.16.

Cabe destacar que para desarrollar el proceso se ha cambiado la unidad de tiempo a segundos para una mejor visualización y conseguir un importante ahorro computacional. Este hecho no afecta a los resultados ya que todas las medidas de tiempo son proporcionales entre sí, por lo que la magnitud de tiempo relativa al ciclo del proceso global es lo que caracteriza a cada operación.

En la Figura 4.17 se expone, con la intención de mostrar la secuencia establecida de ambas propuestas, el diagrama de Gantt de la FAL II.

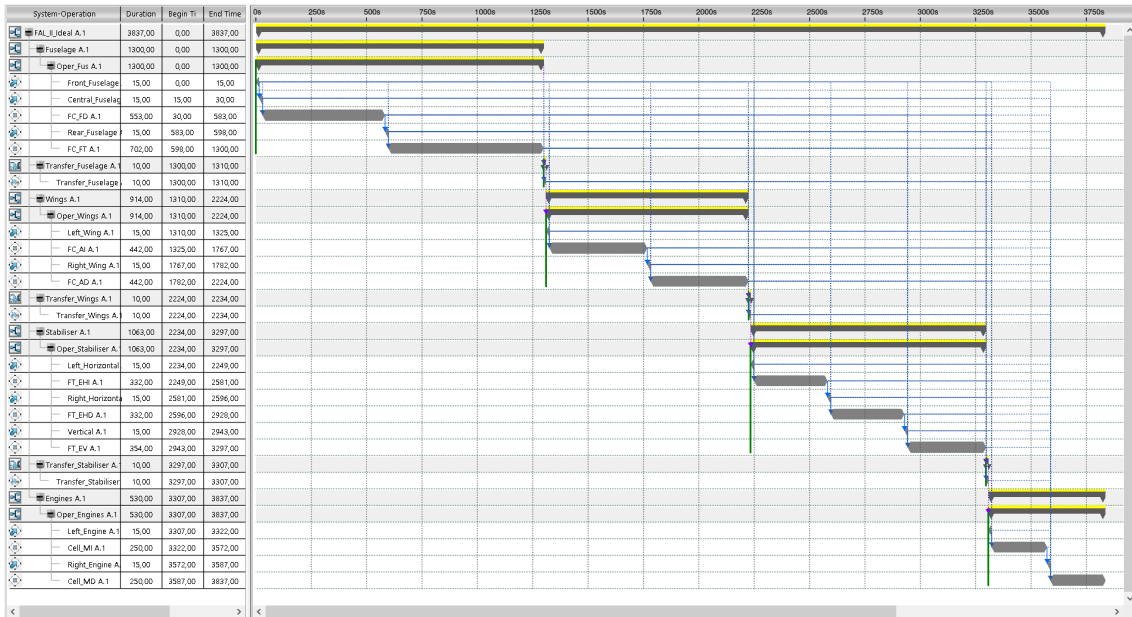


Figura 4.17: Diagrama de Gantt de la la FAL II (fuente: elaboración propia).

Como se aprecia de los diagramas de las dos propuestas, ya se ha diferenciado entre las estaciones de trabajo en paralelo de la FAL I y las estaciones independientes de la FAL II.

4.3.3 DELMIA Process Flow Simulation

DELMIA proporciona un módulo capaz de analizar el comportamiento dinámico del nodo de sistema mediante el planteamiento de distintos escenarios, los cuales se simulan posteriormente. Este módulo se denomina *Process Flow Simulation*.

Este entorno hace posible la definición de algunos tipos de operaciones adicionales, que completan el plan de proceso del sistema y permiten simular el almacenamiento de componentes, averías y reparaciones. Se muestran en la Tabla 4.7.

En este paso de definición, a cada operación se le asigna del MBOM el producto necesario para poder llevarla a cabo y obtenido posteriormente. Esto es fundamental para la correcta conexión de las operaciones ya que posibilita el flujo de información entre las distintas casillas del sistema.





| Tipo de operación | | Descripción |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Source</i> |  | Define las propiedades de un producto que llega al sistema de producción a través de un sistema tipo <i>source</i> (de carga). |
| <i>Sink</i> |  | Define las propiedades de un producto que abandona el sistema de producción a través de un sistema tipo <i>sink</i> (de despacho). |
| <i>Buffer</i> |  | Define las propiedades de los productos que se almacenan en distintos lugares a través de un sistema tipo <i>buffer</i> (de almacenamiento). |
| <i>Interrupt</i> |  | Define las propiedades de los fallos o paradas de mantenimiento que se introducen en el sistema. |

Tabla 4.7: Operaciones del módulo *Process Flow Simulation* (fuente: elaboración propia).

4.4 Modelado del proceso y diseño de las simulaciones

Se pretende simular para cada propuesta de FAL un caso ideal y otro real. En el ideal las estaciones no tienen fallos y las operaciones se llevan a cabo en un tiempo concreto establecido (Tabla 4.6), mientras que en el caso real existen periodos de mantenimiento de las estaciones y el tiempo que ocupa cada operación tiene un comportamiento normal. El propósito de esta diferenciación es comprobar la posibilidad que proporciona el programa de simular eventos discretos (los fallos) y poder comparar los resultados obtenidos al introducir parámetros con características más realistas.

Para realizar las simulaciones se supondrá conocido el modelo probabilístico de cada una de las operaciones empleadas durante el montaje. Se han planteado los valores de tiempo reflejados en la Tabla 4.8 en base a estimaciones de artículos de divulgación y consultas (Anexo II).

| Distribución normal | | |
|---------------------|-----------|------------------|
| Operación | Media (h) | Desv. típica (h) |
| Unión FC-FT | 702 | 140 |
| Unión FC-FD | 553 | 111 |
| Unión FC-Ala | 442 | 88 |
| Unión FT-EV | 354 | 71 |
| Unión FT-EH | 332 | 66 |
| Unión Ala-Motor | 250 | 50 |
| Carga de componente | 15 | 3 |
| Transporte | 10 | 2 |

Tabla 4.8: Modelo probabilístico para el caso real (fuente: elaboración propia).

Los periodos de mantenimiento y su duración también se suponen conocidos y se muestran en la Tabla 4.9. Como se observa, para poder comparar las FAL en igualdad de condiciones, se han impuesto valores equitativos a las estaciones en las que se realizan las mismas operaciones de ensamblaje a pesar de que en cada FAL el nombre de la misma sea distinto.

A la hora de seleccionar las propiedades de los periodos de mantenimiento, se dispone de dos opciones en la definición del instante en el que estos tienen lugar. La primera es que el tiempo se cuente en tiempo global de simulación (sin tener en cuenta la naturaleza de las operaciones que tengan lugar), la segunda es la seleccionada y únicamente tiene en consideración el tiempo de

procesado de las operaciones. Además, también se puede elegir los efectos de la reparación en el sistema. En este aspecto puede determinarse que, una vez finalizada la operación de mantenimiento, el producto que estaba siendo ensamblado sea rechazado, que se reinicie el proceso de ensamblaje o que se continúe desde el punto en el que se encontraba. Se opta por la tercera posibilidad.

| | FAL I | | | FAL II | | |
|--------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Sistema | MTBF (h) | MTTR (h) | Sistema | MTBF (h) | MTTR (h) |
| 1ª estación: | Alar | 1080 | 24 | Fuselaje | 1200 | 36 |
| 2ª estación: | Cola | 960 | 18 | Alas | 1080 | 24 |
| 3ª estación: | Célula | 1200 | 36 | Cola | 960 | 18 |
| 4ª estación: | Motores | 1440 | 12 | Motores | 1440 | 12 |

Tabla 4.9: Tiempo medio entre fallos (MTBF) y de reparación (MTTR) de las estaciones (fuente: elaboración propia).

De las estaciones de transporte no se realiza un estudio de las paradas de mantenimiento debido a que estas se realizan por tiempo acumulado de proceso, como estas operan durante periodos muy reducidos, no se llegan a dar las paradas durante la simulaciones.

Previamente a la realización de cada simulación han de fijarse las condiciones de la misma. Para poder realizar un análisis de los resultados obtenidos comparando las propuestas, se fijan las mismas condiciones para todas ellas.

Se impone un tiempo de simulación de 3 años, que en horas implica:

$$\text{Tiempo} = 3 \text{ años} \cdot 365 \text{ días/año} \cdot 24 \text{ h/día} = 26280 \text{ horas}$$

Como ya se ha comentado, las unidades de tiempo se pasan a segundos, por lo que el tiempo final de simulación será de 26280 segundos.

El resto de parámetros se exponen en la Tabla 4.10.

| Parámetros | | |
|----------------------|--------|----------|
| Descripción | Valor | Unidades |
| Tiempo de simulación | 26280 | segundos |
| <i>Step size</i> | 1 | segundos |
| Leyenda de color | Activa | - |
| Muestra de gráficas | Activa | - |

Tabla 4.10: Parámetros de las simulaciones (fuente: elaboración propia).

La leyenda de color (Figura 4.18) permite, durante la simulación, observar el estado de las casillas. Esto posibilita visualizar el correcto funcionamiento del sistema, corroborando que cada estación se realiza la función correspondiente en el instante oportuno. Se muestra una captura durante la simulación de la FAL II en Figura 4.19, donde se puede observar que las estaciones de unión del fuselaje y las de la cola están procesando mientras que las *sources* y la casilla de transferencia de las alas están a la espera de pasar el producto que contienen a la siguiente casilla.

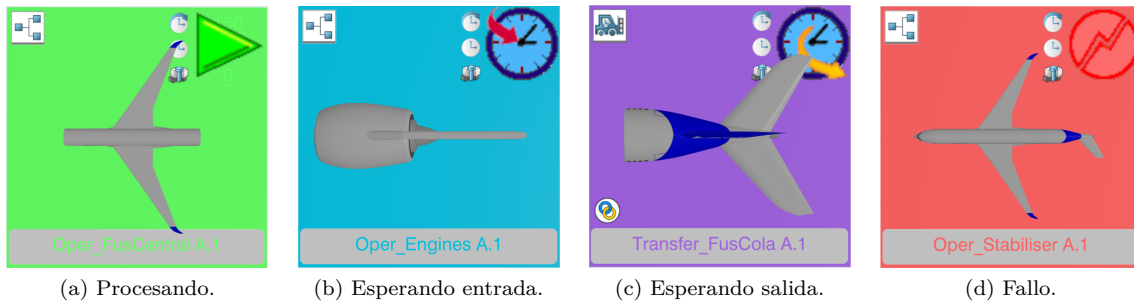


Figura 4.18: Leyenda de colores durante la simulación (fuente: elaboración propia).

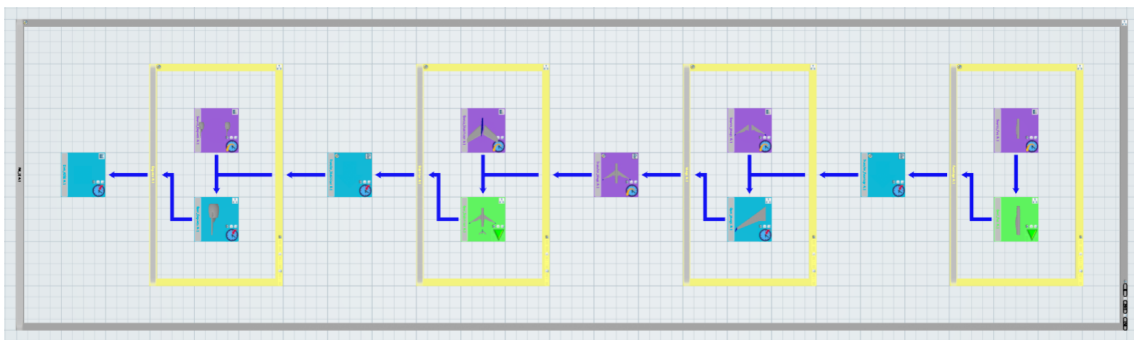


Figura 4.19: Simulación de la FAL II (fuente: elaboración propia).

Mientras se ejecuta la simulación numérica, la plataforma muestra los resultados parciales desde distintas perspectivas como:

- Utilización de los sistemas.
- Inventario por sistemas.
- Ciclo de tiempo medio.
- Cuello de botella medio.

Estas gráficas son en tiempo real, por lo que se puede seguir la evolución del sistema conforme avanza en el tiempo. Se muestra un ejemplo en la Figura 4.20.

Como se observa de las gráficas mostradas en la Figura 4.20, la representación de las mismas cambia según sea la información expuesta. La gráfica 1 muestra la utilización de los sistemas, es una representación que engloba a todo el sistema de producción que se está simulando en pantalla mientras que el resto de gráficas de la Figura muestran información correspondiente única casilla.

Los códigos de colores de las gráficas de utilización del sistema (3,7 y 10) emplean el mismo código de colores que la simulación (Figura 4.18) e indican el porcentaje de tiempo que el sistema se dedica a cada una de las actividades de procesado, espera o fallo. Las gráficas de tiempo de operación (2) muestran la evolución de las operaciones realizadas en la casilla seleccionada. En el caso de la Figura, se muestra la estación de fuselaje y se observa como a principios de una de las operaciones de unión ha tenido lugar un fallo del sistema (mostrado en rojo). Los diagramas de barras 4, 5 y 9 muestran los productos del sistema, las barras en azul indican los componentes que llegan y las verdes, los subensamblajes que salen. En cambio, los diagramas de barras de inventario (6) muestran en azul el tiempo medio en el que los productos están en el estado inicial y en rosa

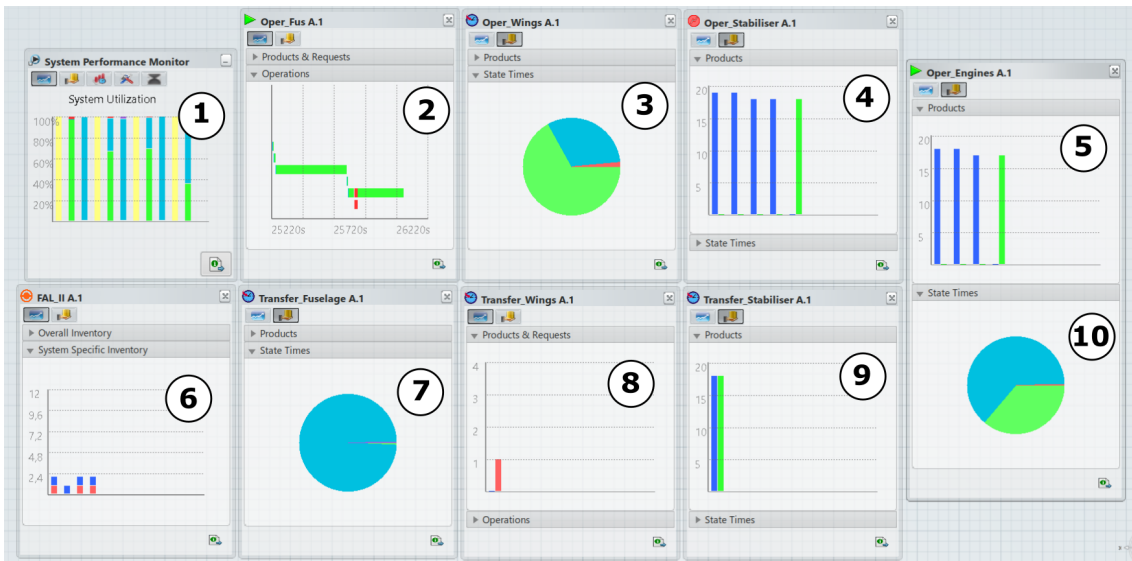


Figura 4.20: Gráficas durante la simulación de la FAL II (fuente: elaboración propia).

el tiempo medio en el que se hayan ensamblados a otros componentes. Por último, las gráficas de productos y solicitudes (8), propias solo de los sistemas de transferencia, muestran los productos transferidos y los que está a la espera de recibir.

De forma adicional, también es posible extraer la información expuesta en las gráficas en forma de tablas, como se observa en la Figura 4.21.

La principal ventaja de representar los resultados con una tabla radica en que se consiguen los datos numéricos exactos, que pueden ser posteriormente post-procesados con cualquier otro tipo de *software*.

Productions

| System | Products | | | | | | State Times (Second) | | | | | Average Processing Time (Second) | Average Requirement Time (Second) | Utilization (%) | |
|---------------------|----------|----------|----------|--------|--------------------|----------|----------------------|------------|-------------------|---------|---------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|---|
| | Input | Produced | Consumed | Output | Assembled / Packed | Rejected | Idle | Processing | Wait for Input(s) | Failed | | | | | |
| Fuselage A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Fus A.1 | 60 | 39 | 0 | 19 | 78 | 0 | 0 | 25502,117 | 1 | 776,883 | 215,568 | 0,007 | 97,04 | | |
| Wings A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Oper_Wings A.1 | 58 | 38 | 0 | 19 | 76 | 0 | 0 | 17596,552 | 8304,146 | 379,301 | 193,289 | 72,515 | 66,958 | | |
| Stabiliser A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Oper_Stabiliser A.1 | 74 | 54 | 0 | 18 | 108 | 0 | 0 | 18286,709 | 7646,026 | 347,265 | 145,326 | 51,316 | 69,584 | | |
| Engines A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Oper_Engines A.1 | 53 | 34 | 0 | 17 | 68 | 0 | 0 | 9514,925 | 16691,907 | 73,168 | 127,358 | 177,573 | 36,206 | | |

Transfers

| System | Products | | Content | | Waiting Time (Second) | | | State Times (Second) | | | Utilization (%) |
|-------------------------|----------|--------|---------|-------|-----------------------|---------|--------|----------------------|--------------------|-------------------|-----------------|
| | Input | Output | Max | Avg | Min | Max | Avg | Transporting | Wait for Input (s) | Wait to Output(s) | |
| Transfer_Fuselage A.1 | 19 | 19 | 1 | 0,011 | 6,589 | 87,326 | 14,646 | 199,857 | 26001,733 | 78,409 | 0,76 |
| Transfer_Wings A.1 | 19 | 19 | 1 | 0,031 | 5,815 | 258,434 | 43,243 | 200,739 | 25458,377 | 620,884 | 0,764 |
| Transfer_Stabiliser A.1 | 18 | 18 | 1 | 0,007 | 6,255 | 12,809 | 9,952 | 179,128 | 26100,872 | 0 | 0,682 |

Figura 4.21: Tabla de resultados de simulación de la FAL II (fuente: elaboración propia).

Los resultados de las cuatro simulaciones se muestran en el Anexo III y se analizan en el siguiente capítulo.

5 Análisis de los casos de estudio

5.1 Caso de estudio I

Los resultados de las simulaciones, tanto del modelo ideal como del real, muestran que la primera propuesta de FAL tiene una capacidad de producción de 19 aeronaves durante un periodo de tiempo de 3 años (ver Anexo III).

En cuanto a la utilización de cada uno de los sistemas, en la Figura 5.1 y la Tabla 5.1 se presentan las actuaciones de cada estación de la línea.

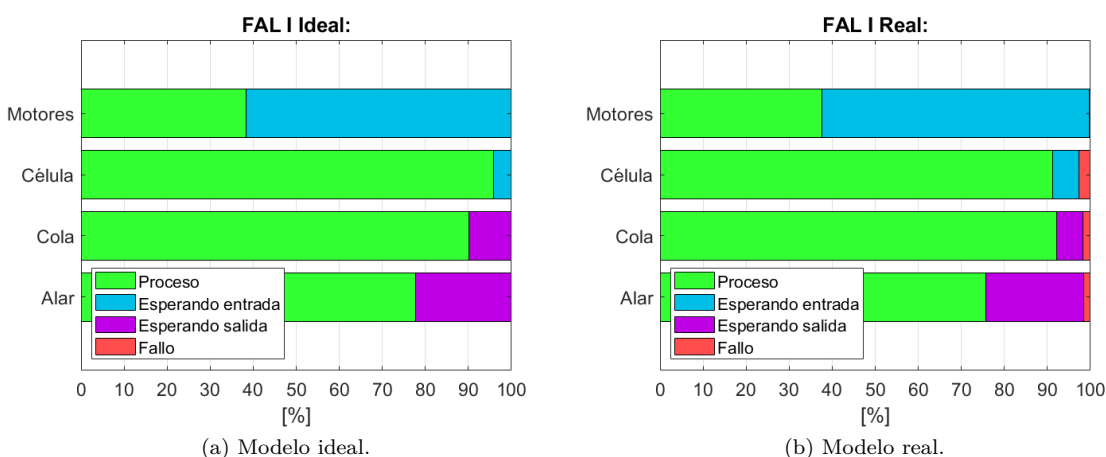


Figura 5.1: Diagrama de utilización de estaciones en la FAL I (fuente: elaboración propia).

| Estación | Actividad | FAL I Ideal | FAL I Real |
|----------|-------------------|-------------|------------|
| Motores | Procesado | 38.4 % | 37.7 % |
| | Esperando entrada | 61.6 % | 62.0 % |
| | Esperando salida | 0 % | 0 % |
| | Fallo | 0 % | 0.3 % |
| Célula | Procesado | 95.9 % | 91.3 % |
| | Esperando entrada | 4.1 % | 6.0 % |
| | Esperando salida | 0 % | 0 % |
| | Fallo | 0 % | 2.7 % |
| Cola | Procesado | 90.2 % | 92.1 % |
| | Esperando entrada | 0 % | 0 % |
| | Esperando salida | 9.8 % | 6.3 % |
| | Fallo | 0 % | 1.7 % |
| Alar | Procesado | 77.8 % | 75.8 % |
| | Esperando entrada | 0 % | 0 % |
| | Esperando salida | 22.2 % | 22.7 % |
| | Fallo | 0 % | 1.5 % |

Tabla 5.1: Utilización de estaciones en la FAL I (fuente: elaboración propia).

Como se puede observar, el cuello de botella de esta FAL se encuentra en la estación de la célula, en la que se unen las secciones del fuselaje. El largo tiempo necesario para llevar a cabo el proceso de la estación provoca elevados periodos de espera en la fase de montaje anterior (estaciones de ensamblado del grupo alar y de la cola).

Este hecho puede ser beneficioso a pesar de no parecerlo a simple vista. Como consecuencia de contar con procesos de transporte entre estaciones, cuando una de las estaciones de grupo alar o de cola finaliza su tarea, envía el producto ensamblado a su estación de transporte correspondiente, donde espera para ser usado por la estación de montaje de la célula mientras que la estación inicial queda libre para continuar con el montaje de un nuevo sistema.

Junto con el factor de disponer de las dos primeras estaciones en paralelo, la secuencia de trabajo arriba descrita permite reducir aún más el ciclo de tiempo necesario para ensamblar una aeronave.

Las diferencias entre el modelo ideal y el real en cuanto al nivel de efectividad de las estaciones (tiempo de funcionamiento útil respecto al total) son poco evidentes. La aparición de periodos de fallo es absorbida en mayor o menor medida por el resto de actividades de la estación, reduciendo por lo tanto el tiempo de procesado de las estaciones.

Una excepción a lo comentado es la estación de cola, en cuyo caso el tiempo de fallo ha sido absorbido (debido a estar ligada a la estación de ensamblaje del grupo alar) por el periodo de espera de salida, por lo que se produce un aumento de la producción.

5.2 Caso de estudio II

Una vez simulados los dos modelos propuestos de la FAL II, el número de aeronaves producidas en el modelo ideal es de 18 mientras que en el real es de 17.

En la Figura 5.2 y la Tabla 5.2 se procede a exponer la utilización de cada una de las estaciones que componen la línea y a comparar entre los dos modelos realizados.

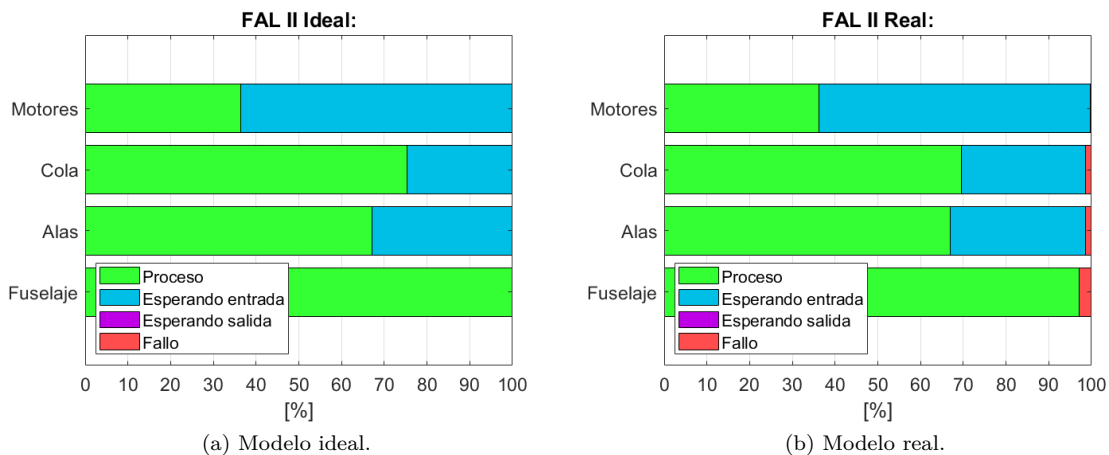


Figura 5.2: Diagrama de utilización de estaciones en la FAL II (fuente: elaboración propia).

De los resultados obtenidos destaca la habilidad del sistema para asimilar el proceso de ensamblaje sin que se produzcan pausas a la espera de enviar a su siguiente destino los sistemas una vez han sido ensamblados en su estación correspondiente. Esto es debido la secuencia de las operaciones adoptada. Como consecuencia de un mayor tiempo de proceso, la estación del fuselaje es el cuello de botella de la línea. Una vez ha pasado el sistema a la estación de montaje de las alas, esta siempre está disponible para recibir el producto. Cuando esta segunda acaba las tareas encomendadas, transmite el sistema a la estación de cola que igualmente se halla libre ya que tiene un menor tiempo de montaje que la primera.

Este llamativo hecho implica que la línea de ensamblaje final tenga unos niveles de producción más bajos, ya que se ve forzada a seguir el ritmo de ensamblaje de la estación de unión del fuselaje.

| Estación | Actividad | FAL II Ideal | FAL II Real |
|----------|-------------------|--------------|-------------|
| Motores | Procesado | 36.4 % | 36.2 % |
| | Esperando entrada | 63.6 % | 63.5 % |
| | Esperando salida | 0 % | 0 % |
| | Fallo | 0 % | 0.3 % |
| Cola | Procesado | 75.4 % | 69.6 % |
| | Esperando entrada | 24.6 % | 29.1 % |
| | Esperando salida | 0 % | 0 % |
| | Fallo | 0 % | 1.3 % |
| Alas | Procesado | 67.2 % | 67.0 % |
| | Esperando entrada | 32.8 % | 31.6 % |
| | Esperando salida | 0 % | 0 % |
| | Fallo | 0 % | 1.4 % |
| Fuselaje | Procesado | 100 % | 97.0 % |
| | Esperando entrada | 0 % | 0 % |
| | Esperando salida | 0 % | 0 % |
| | Fallo | 0 % | 3 % |

Tabla 5.2: Utilización de estaciones en la FAL II (fuente: elaboración propia).

Como se aprecia, al igual que ocurría en la FAL I, la introducción de distribuciones de probabilidad y de periodos de mantenimiento en el sistema conlleva la reducción de la efectividad de las estaciones, ya que se encuentran procesando durante una menor cantidad de tiempo debido a los fallos que tienen lugar. En este caso, dicha diferencia de efectividad conlleva incluso una reducción en el número de unidades producidas.

5.3 Comparación de propuestas

Como se observa en la Tabla 5.3, la FAL I es capaz de producir un mayor número de aeronaves en un mismo periodo de tiempo.

| Unidades producidas | | |
|---------------------|--------|-------|
| Sistema | Modelo | Valor |
| FAL I | Ideal | 19 |
| | Real | 19 |
| FAL II | Ideal | 18 |
| | Real | 17 |

Tabla 5.3: Unidades producidas en 3 años por FAL (fuente: elaboración propia).

La eficiencia de la actividad de ensamblaje de cada estación se muestra en la Figura 5.3.

Se observa que todas las estaciones de la FAL I realizan su tarea de manera más eficiente que en la FAL II, es decir, dedican una mayor parte de su actividad al ensamblaje y no a la espera o el mantenimiento. Con esto se explica la mayor producción de la primera propuesta frente a la segunda.

Como se ha comentado anteriormente, la primera propuesta emplea las estaciones de transferencia entre las primeras fases como forma de almacenar los productos a la espera de que la estación de la célula finalice. Dicho efecto se puede observar en la Figura 5.4, donde se aprecia como una significativa parte del tiempo las fases de transferencia se hallan en estado de espera de salida.

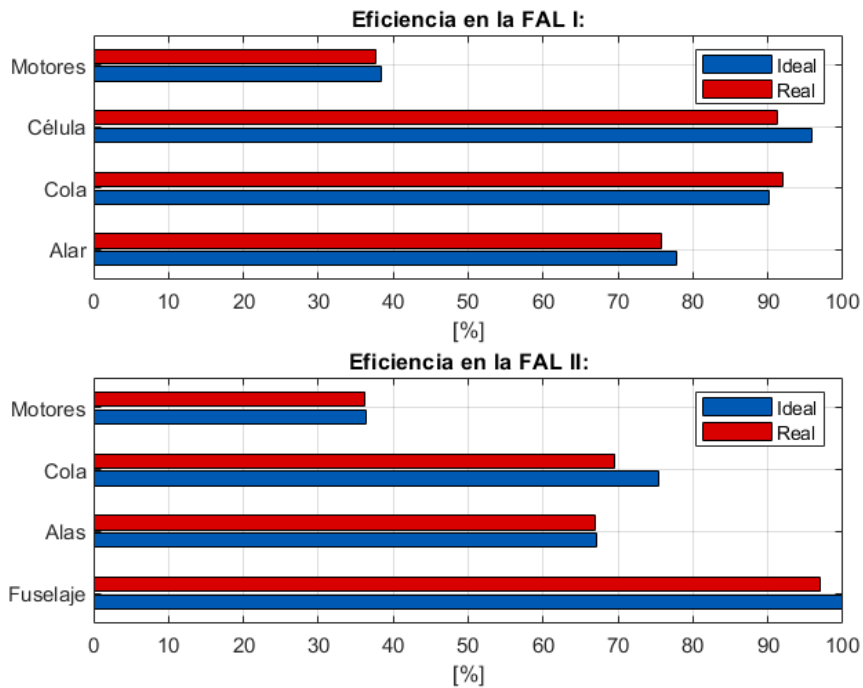


Figura 5.3: Diagrama de la eficiencia de estaciones por FAL. Color claro el modelo ideal, color oscuro el modelo real. (fuente: elaboración propia).

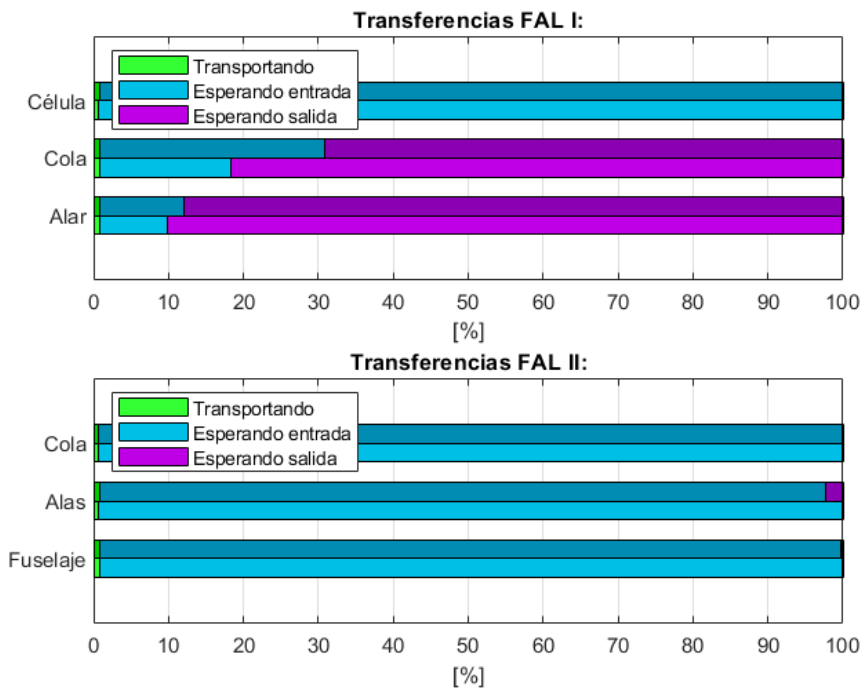


Figura 5.4: Diagrama de utilización de transferencias por FAL. Color claro el modelo ideal, color oscuro el modelo real. (fuente: elaboración propia).

También se obtiene de la Figura 5.4 una comprobación de que en la segunda propuesta la secuencia de las estaciones provoca que no sea necesario emplear las estaciones de transferencia como almacén, sin embargo se reduce la producción como consecuencia. Posiblemente, esto sea lo ocurrido en la realidad, ya que una fase de transporte entre estaciones no tiene la función de almacenar.

Para finalizar, los resultados indican que la primera propuesta tiene unos niveles de productividad mayores con los datos empleados. No obstante, las tendencias obtenidas son únicamente una muestra del tipo de análisis que la plataforma 3DExperience puede ayudar a realizar, el uso de datos más realistas permitiría obtener conclusiones más precisas y ajustadas a la realidad.

Queda por tanto validada la utilidad de la plataforma como herramienta, tanto en el ámbito académico como industrial, para la definición y análisis de los procesos de ensamblaje de un sistema.

6 Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

El proyecto académico elaborado en el contexto del Trabajo de Fin de Grado "Planificación y desarrollo del proceso de fabricación y ensamblaje de aeronaves integrado en plataformas PLM" ha posibilitado la integración de las competencias del Grado en Ingeniería Aeroespacial de manera práctica, incorporando los conocimientos propios de la titulación al marco de la fabricación digital y la gestión del Ciclo de Vida del Producto.

El principal propósito del trabajo ha sido concretar el proceso de ensamblaje de los sistemas de una aeronave suponiendo que se parte de la fase de diseño en detalle. Para ello se ha realizado un estudio teórico de los procedimientos seguidos en la producción de estructuras aeronáuticas, así como de la vinculación de las nuevas tecnologías y metodologías de trabajo en el desarrollo de una aeronave.

Se han propuesto dos alternativas a la Línea de Ensamblaje Final de un A350, las cuales se han analizado posteriormente con la plataforma 3DExperience, observando las características de cada una de ellas. Para alcanzar estos resultados, mediante el programa se ha detallado cada uno de los procesos necesarios en la creación de la representación del sistema de producción. Con dicha finalidad, a partir del nodo de diseño, se ha establecido una estructura MBOM (nodo de proceso) para cada una de las propuestas así como su consecutivo nodo de sistema.

A pesar de las dificultades encontradas a la hora de obtener información acerca de los tiempos dedicados al ensamblaje de los sistemas, se ha realizado una estimación de los mismos en base a diversos criterios aproximados a falta de datos reales. Como consecuencia, los resultados logrados no tienen un carácter definitivo, sino que simplemente muestran el potencial de la herramienta y el tipo de análisis que se puede llevar a cabo con ella.

Se concluye por tanto que se han alcanzado los objetivos planteados inicialmente en cuanto a la definición de procesos de ensamblaje en plataformas PLM, haciendo uso específico de una herramienta de última generación como es la plataforma 3DExperience de Dassault Systèmes.

6.2 Valoración del proyecto

En cuanto al *software* empleado durante la realización del trabajo, se han encontrado los problemas típicos de una tecnología recién plateada y que aún se halla fase de desarrollo. El hecho de que la plataforma 3DExperience sea relativamente reciente, hace que nuevas actualizaciones del sistema aparezcan con una periodicidad muy alta, cambiando en algunas ocasiones hasta la interfaz de usuario de alguna de las aplicaciones. Esto ha dificultado el seguimiento de los tutoriales en las primeras fases del proyecto y la posterior implementación del sistema de producción en los módulos correspondientes.

La gran potencia exigida por el programa en cuanto a capacidad computacional y tarjeta gráfica es uno de los mayores inconvenientes que han surgido a la hora de llevar a cabo un uso fluido del mismo. Es cierto que las herramientas disponibles se pueden ejecutar en ordenadores con tarjetas gráficas no recomendadas (como es el caso de los ordenadores empleados), sin embargo el rendimiento proporcionado no es el esperado en cuanto a agilidad del programa y este se bloquea con mucha facilidad, resultando en largos periodos de espera. Además, se producen ciertos errores de visibilidad con algunas funcionalidades que interactúan con la interfaz gráfica, así como diferencias en los códigos de colores por defecto de algunas aplicaciones. A pesar de ello, se obtienen los mismos resultados que se obtendrían con un ordenador de mayor capacidad o con una tarjeta gráfica compatible.

Desde el punto de vista de la funcionalidad de la plataforma, esta se ha desarrollado con una clara orientación al diseño detallado de componentes de cualquier tipo, y así se hace mostrar en

las aplicaciones de modelado y fabricación con infinidad de soluciones adaptables a todo ámbito de la industria. No obstante, a la hora del modelado de sistemas de producción, se dificulta en gran medida la implementación de sistemas de producción reducidos, la plataforma está encaminada al tratamiento y desarrollo de la producción en serie o por lotes. Un caso como el tratado, en el que la planta se encarga del ensamblaje de un solo producto tan específico, presenta dificultades para definir las características del producto. Dichas dificultades se han solventado con el uso de distintos módulos, como se ha expuesto a lo largo del documento.

Uno de los aspectos positivos que más destaca es la distinción de 3DExperience en cuanto a la metodología de gestión de la información, la cual es muy innovadora. En un primer instante, se complicada, precisamente debido a su carácter innovador, el uso de la plataforma ya que la forma de almacenar los archivos y de visualizarlos es distinta a cualquier otro sistema operativo existente. No obstante, con la práctica y el uso continuo se hace rápidamente visible la facilidad de acceder a cualquier archivo desde cualquier lugar y de poder combinar y vincular información entre proyectos.

En relación a las competencias colaborativas y sociales del entorno, al haber llevado a cabo el proyecto en solitario no se puede hacer una valoración en profundidad. Sin embargo, en el uso cotidiano de la plataforma web para acceder a los datos y cursos de auto-aprendizaje, se observa el gran potencial social que le han proporcionado. Desde la creación de un módulo de discusión de problemas entre usuarios de la aplicación, hasta la posibilidad de compartir las carpetas de trabajo y los archivos creados con cualquier usuario con un rol establecido, el sistema está pensado para la colaboración de distintas personas en un mismo producto y su posterior exposición en el mundo de las redes sociales.

En consideración a la metodología seguida durante el proyecto, creo que se ha adecuado a las necesidades y al nivel de profundidad que se pretendía alcanzar. Valorando que era la primera vez que se usaba el programa, la realización de los cursos de auto-aprendizaje previos al desarrollo del trabajo como tal han sido una gran ventaja, ya que de otra forma habría resultado imposible comprender el funcionamiento del *software*.

Posteriormente a los cursos, el estudio teórico del problema planteado ha permitido adquirir los conocimientos necesarios para contextualizar las tareas a realizar y a crear una estructura del proceso a seguir en los siguientes apartados. El nivel de detalle y de investigación de esta parte podría haberse enfocado más hacia los procesos y tecnologías de ensamblaje empleados en la actualidad, pero teniendo en cuenta que el sistema de producción propuesto tiene una profundidad limitada al carácter académico y la extensión de un Trabajo de Fin de Grado, se consideró que era conveniente enfocarlo al proceso de definición mediante herramientas PLM, que es el objetivo final del trabajo.

La metodología seguida para definir las propuestas de FAL ha facilitado reproducir de una forma estructurada (dentro de la complejidad que implica la plataforma) cada una de las estaciones que se habían planteado de forma conceptual. El hecho de crear un mapa e ir desarrollándolo paso a paso en el programa ha hecho más sencilla la comprensión de las tareas realizadas y de la utilidad de las mismas.

La baja disponibilidad de los datos encontrados para estimar el tiempo de ensamblaje de cada operación ha limitado en gran medida el análisis de los resultados obtenidos. A pesar de ello, el objetivo del Trabajo de Fin de Grado es el de mostrar el potencial de la herramienta para definir y analizar el funcionamiento de un sistema de fabricación, en concreto una línea de ensamblaje final. Se considera que dicho objetivo se ha alcanzado aunque los resultados que se obtengan sean simplemente una muestra de lo que la plataforma es capaz de realizar.

El reducido número de componentes a ensamblar en el sistema de producción diseñado ha hecho que las propuestas presentadas hayan sido dos, se podrían haber simulado más casos para realizar una comparación mayor si el modelo 3D hubiera sido más detallado.

6.3 Trabajos futuros

Este apartado final tiene como meta el planteamiento de nuevas vías de trabajo para ampliar o complementar el presente proyecto con otros de naturaleza similar.

Fuera del alcance de este Trabajo de Fin de Grado han quedado la fase previa de diseño del modelo y la posterior de definición de los utillajes empleados en la Línea de Ensamblaje Final junto con su distribución en la planta de trabajo.

Se propone como trabajo futuro la realización de un modelo detallado de un sistema mediante el uso del módulo CATIA, posibilitando así la implementación de un modelo más realista y la determinación de las actividades de fabricación necesarias para industrializarlo. Mediante el módulo SIMULIA se realizarían los análisis estructurales necesarios sobre el diseño para verificar el cumplimiento de las especificaciones requeridas. Y posteriormente, llevando a cabo la definición de un inventario de piezas y componentes que pueda asociarse al sistema de producción, se propone continuar con las oportunidades que el módulo DELMIA proporciona a la hora de simular la planta de fabricación.

Con estas contribuciones se completa el ciclo de vida del producto en el entorno de la fabricación digital, conformando el iDMU del producto.

Otra línea de progreso puede enfocarse a la formación por parte del alumno en otros entornos de trabajo ofrecidos por la plataforma y que son de gran interés en el ámbito aeronáutico. Un ejemplo de esto puede ser ENOVIA, un módulo dedicado a la coordinación y monitorización de tareas entre departamentos y el tratamiento de la información desde la nube. Este módulo permite llevar el concepto de ingeniería concurrente/colaborativa a su máximo exponente y ayudará, sin duda, a que 3DExperience se convierta a medio o largo plazo en un referente del panorama industrial.

Referencias

- (Airbus, 2012) Airbus (2012) *A350 XWB final assembly: a step-by-step overview*. YouTube video, added by Airbus [Online]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=W0jlu0ghNIg> (Acceso: 16 Mayo 2019).
- (Airbus, 2017) Airbus (2017) *Final Assembly and Tests* [Online]. Disponible en: <https://www.airbus.com/aircraft/how-is-an-aircraft-built/final-assembly-and-tests.html> (Acceso: 14 Mayo 2019).
- (BNAE, 1999) Bureau de normalisation de l'aéronautique et de l'espace (1999) RG-AERO-000-40A *General recommendation for the programme management specification*. Bureau de normalisation de l'aéronautique et de l'espace.
- (Canaz, 2017) Canaz, M. (2017) *Airbus A350*, GrabCAD [Online]. Disponible en: <https://grabcad.com/library/airbus-a350-2> (Acceso: 30 Mayo 2019).
- (Dassault Systèmes, 2017) Dassault Systèmes (2017) *Plataforma 3DEXPERIENCE* [Online]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/3dexperience> (Acceso: 23 Mayo 2019).
- (Dassault Systèmes, 2019) Dassault Systèmes (2019) *Peer Learning EXPERIENCE* [Online]. Disponible en: <https://peerlearningexperience.3ds.com/totara/program/index.php> (Acceso: 26 Mayo 2019).
- (Davies, 2013) Davies, A. (2013) *Here's Why Damage To The 787 Is So Difficult To Repair* [Online]. Disponible en: <https://www.businessinsider.com.au/787-damage-poses-new-challenge-for-boeing-2013-7> (Acceso: 30 Mayo 2019).
- (European Commission, 2010) European Commission (2010) *Aeronautics and Air Transport: Beyond vision 2020 (Towards 2050)*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- (Mas et al., 2013a) Mas, F. et al. (2013) *A process-oriented approach to modeling the conceptual design of aircraft assembly lines* [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4521-5> (Acceso: 10 Mayo 2019).
- (Mas et al., 2013b) Mas, F. et al. (2013) *Collaborative engineering: An airbus case study*. *Procedia Engineering* [Online]. Elsevier B.V., 63, pp. 336–345. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.180> (Acceso: 16 Mayo 2019).
- (Pardessus, 2004) Pardessus, T. (2004) *Concurrent engineering development and practices for aircraft design at Airbus*. Yokohama: 24th International Congress of the Aeronautical Sciences.
- (Ríos et al., 2016) Ríos, J. et al. (2016) *Framework to support the aircraft digital counterpart concept with an industrial design view* [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.1504/IJASM.2016.079934> (Acceso: 30 Mayo 2019).
- (Sarh et al., 2009) Sarh, B. et al. (2009) *Áircraft Manufacturing and Assembly* in Nof, S. (Ed.) *Springer Handbook of Automation*. Germany: Springer International Publishing, pp 893-910.
- (Stark, 2015) Stark, J. (2015) *Product Lifecycle Management (Volume 1), Decision Engineering*. 3rd edn. Switzerland: Springer International Publishing.
- (Stark, 2016) Stark, J. (2016) *Product Lifecycle Management (Volume 2), Decision Engineering*. 3rd edn. Switzerland: Springer International Publishing.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Grado en Ingeniería Aeroespacial

Parte II

ANEXOS

**PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO DEL PROCESO DE
FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE DE AERONAVES
INTEGRADO EN PLATAFORMAS PLM**

Samuel Molina Casino

Índice

| | |
|-------------------------------------------|-----------|
| Anexo I: Nomenclatura | 65 |
| Anexo II: Tiempos de ensamblaje | 66 |
| Anexo III: Cálculos y simulaciones | 69 |
| Resultados FAL I ideal | 72 |
| Resultados FAL I real | 74 |
| Resultados FAL II ideal | 76 |
| Resultados FAL II real | 78 |
| Referencias | 79 |

Índice de tablas

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1. Tiempos de ensamblaje para el fuselaje (Aparicio, 2013). | 67 |
| II.2. Tiempos de ensamblaje de las secciones de fuselaje (fuente: elaboración propia). | 67 |
| II.3. Tiempos de ensamblaje de los sistemas definidos (fuente: elaboración propia). | 68 |

Anexo I: Nomenclatura

ACE: Airbus Concurrent Engineering
BOM: Bill of Materials
CAD: Computer-Aided Design
CAM: Computer-Aided Manufacturing
CAPP: Computer-Aided Process Planning
DMU: Digital Mock-Up
EBOM: Engineering Bill of Materials (as designed)
FAL: Final Assembly Line
MBOM: Manufacturing Bill of Materials (as built)
MTBF: Mean Time Between Failure
MTTR: Mean Time To Repair
PDM: Product Data Management
PLM: Product Lifecycle Management
SBOM: Sales Bill of Materials (as planned)
SBOM: Service Bill of Materials (as maintained)
UI: User Interface

Anexo II: Tiempos de ensamblaje

Como primera aproximación a los tiempos empleados en el ensamblaje de sistemas, se obtienen los del fuselaje de una aeronave de tamaño similar, un avión C-295 (Aparicio, 2013).

Estos tiempos se usarán para estimar el tiempo dedicado a cada una de las tareas que componen el ensamblaje de las tres secciones del fuselaje.

| TIEMPOS DE ENSAMBLAJE PARA EL FUSELAJE | |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Descripción de la tarea | Tiempo (h) |
| Trazado previo contorno fuselaje. central. zona C.13 | 4 |
| Taladrado previo en abierto zona C.13 | 8 |
| Recanteado previo contorno fuselaje central anterior zona C.13 | 6 |
| Cerrar grada | 8 |
| Nivelar avión (comprobar) | 10 |
| Taladrado previo C.13 | 12 |
| Taladrado previo zona fuselaje central C.13: barquilla | 8 |
| Situar Y taladrado previo tabiques C.13 - C.14 | 16 |
| Taladrado previo fuselaje central zona C.13: lateral izquierdo | 12 |
| Taladrado previo fuselaje central zona C.13: lateral derecho | 8 |
| Taladrado previo fuselaje central zona C.13: superior | 8 |
| Taladrado previo fuselaje central zona C.13: barquilla (2ª hilera) | 4 |
| Taladrado previo fuselaje central zona C.13: lateral izq. (2ª hilera) | 4 |
| Taladrado previo fuselaje central zona C.13: lateral der. (2ª hilera) | 4 |
| Taladrado previo fuselaje central zona C.13: superior (2ª hilera) | 4 |
| Taladrado definitivo fuselaje central zona C.13: barquilla | 10 |
| Taladrado definitivo fuselaje central zona C.13: lateral izquierdo | 8 |
| Taladrado definitivo fuselaje central zona C.13: lateral derecho | 8 |
| Taladrado definitivo fuselaje central zona C.13: superior | 8 |
| Taladrado definitivo tabiques C.13 - C.14 | 8 |
| Trazar contorno, despinzar y rebabar conectores y tabiques | 14 |
| Abrir grada zona C.13 | 2 |
| Verificar C.13 | 3 |
| Trazar definitivo contorno fuselaje central zona C.13 | 4 |
| Rebabar y recanteado def. contorno fuselaje central zona C.13 | 14 |
| Remachar en abierto: tabique C.14 | 6 |
| Sellar, cerrar grada y pinzar zona C.13 | 16 |
| Remachar fuselaje en zona C.13: barquilla | 32 |
| Remachar tabiques C.13 - C.14 | 16 |
| Remachar fuselaje en zona C.13: lateral izquierdo | 16 |
| Remachar fuselaje en zona C.13: lateral derecho | 18 |
| Remachar fuselaje en zona C.13: superior | 32 |
| Remachar conectores a larguerillos | 22 |
| Operaciones HNCS | 24 |
| Desmontaje de zona posterior de góndola | 2 |
| Cerrar y taladrado previo C.24.3 | 16 |
| Trazar contorno fuselaje central y cola | 8 |
| Recantar contorno fuselaje zona C.24.3 | 12 |
| Taladrado previo platabanda fuselaje central C.24.3: barquilla | 32 |
| Situar y taladrado previo tabiques y conectores P20/P21 C.24.3 | 32 |
| Taladrado previo fuselaje central zona C.24.3: lateral izquierdo | 12 |
| Taladrado previo fuselaje central zona C.24.3: lateral derecho | 12 |

Continúa en la página siguiente.

| Descripción de la tarea | Tiempo (h) |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| Taladrado previo fuselaje central zona C.24.3: superior | 12 |
| Taladrado definitivo fuselaje central zona C.24.3: barquilla | 12 |
| Taladrado definitivo fuselaje central zona C.24.3: lateral izquierdo | 12 |
| Taladrado definitivo fuselaje central zona C.24.3: lateral derecho | 12 |
| Taladrado definitivo tabiques C.24.3 - C.25 | 8 |
| Taladrado definitivo fuselaje central zona C.24.3: superior | 8 |
| Comprobar interferencias y despinzar zona C.24.3 | 8 |
| Abrir grada zona C.24.3 y recantar definitivo | 8 |
| Verificar C.24.3 | 3 |
| Rebabar contorno fuselaje cola zona C.24.3, conectores y tabiques | 16 |
| Remachar en abierto: tabiques en C.25 y conectores | 16 |
| Sellar, cerrar grada y pinzar C.24.3 | 24 |
| Remachar fuselaje central zona C.24.3: barquilla | 56 |
| Remachar tabiques | 16 |
| Remachar en grada: lateral derecho | 32 |
| Remachar fuselaje central en zona C.24.3: lateral izquierdo | 32 |
| Remachar fuselaje zona C.24.3: superior | 26 |
| Remachar uniones a larguerillos | 32 |
| Remachar conectores a larguerillos | 32 |
| Nivelar avión (cumplimentar) | 4 |
| Continuidad estructural | 2 |
| Taladrado lapses-pisos y montar lapses-fuselaje central lateral izq. | 32 |
| Taladrado lapses-pisos y montar lapses-fuselaje central lateral izq. | 32 |
| Montar previo raíles en proa | 16 |
| Montar previo raíles en cola | 32 |
| Avellanado de raíles | 8 |
| Taladrado lapses-pisos y montar lapses-fuselaje central lateral der. | 32 |
| Taladrado lapses-pisos y montar lapses-fuselaje central lateral der. | 32 |
| Taladrado lapses y pisos y montar lapses | 38 |
| Montar definitivo raíles en proa | 16 |
| Montar definitivo raíles en cola | 32 |
| Remachar raíles en zona de unión | 8 |
| Montar herrajes y suplementos | 32 |
| Montar herrajes y suplementos | 10 |
| Montar Conector GPU proa | 12 |
| Montar sondas de temperatura | 16 |
| Montar Sistema ventilación avión cabina | 10 |
| Desmontar zócalos y colectores | 4 |

Tabla II.1: Tiempos de ensamblaje para el fuselaje (Aparicio, 2013).

Debido a que en el proyecto únicamente se hace referencia a la unión como única operación (no se estudian en profundidad cada una de las operaciones llevadas a cabo para realizar dicha unión), se obtiene un tiempo estimado para el ensamblaje completo de las secciones (Tabla II.2).

| Unión a realizar | Tiempo estimado (h) |
|------------------------------------|---------------------|
| Fuselaje central - Fuselaje cola | 702 |
| Fuselaje central - Fuselaje cabina | 553 |

Tabla II.2: Tiempos de ensamblaje de las secciones de fuselaje (fuente: elaboración propia).

A partir de los datos del fuselaje, por comparación en tamaño y complejidad, se estiman los tiempos empleados en el resto de procesos de interés (Tabla II.3).

| Unión a realizar | Tiempo estimado (h) |
|------------------------------------|---------------------|
| Fuselaje central - Fuselaje cola | 702 |
| Fuselaje central - Fuselaje cabina | 553 |
| Ala - Fuselaje central | 442 |
| Estab. vertical - Fuselaje cola | 354 |
| Estab. horizontal - Fuselaje cola | 332 |
| Motor - Ala | 250 |

Tabla II.3: Tiempos de ensamblaje de los sistemas definidos (fuente: elaboración propia).

Cabe destacar que estos datos no son reales (debido a la confidencialidad por parte de los fabricantes), por lo que los resultados que se obtendrán de ellos no lo son tampoco plenamente. Sin embargo, el proceso realizado es común para cualquier base de datos proporcionada, por lo que el análisis realizado y la metodología empleada para éste son extrapolables.

Anexo III: Cálculos y simulaciones

Operations

| Operation | System | Count | Rejected | Processing Time (Second) | | | Requirement Time (Second) | | |
|----------------------|--------|-------|----------|--------------------------|-----|-----|---------------------------|------|---------|
| | | | | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg |
| Central_Fuselage A.1 | | 22 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 1 | 0,045 |
| Left_Wing A.1 | | 22 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| FC_AI A.1 | | 22 | | 442 | 442 | 442 | 0 | 0 | 0 |
| Right_Wing A.1 | | 22 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| FC_AD A.1 | | 22 | | 442 | 442 | 442 | 0 | 0 | 0 |
| Rear_Fuselage A.1 | | 22 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 1 | 0,045 |
| Left_Horizontal A.1 | | 22 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| FT_EHI A.1 | | 22 | | 332 | 332 | 332 | 0 | 0 | 0 |
| Right_Horizontal A.1 | | 22 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| FT_EHD A.1 | | 22 | | 332 | 332 | 332 | 0 | 0 | 0 |
| Vertical A.1 | | 22 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| FT_EV A.1 | | 21 | | 354 | 354 | 354 | 0 | 0 | 0 |
| FC_FT A.1 | | 20 | | 702 | 702 | 702 | 0 | 1089 | 54,45 |
| Front_Fuselage A.1 | | 20 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| FC_FD A.1 | | 19 | | 553 | 553 | 553 | 0 | 0 | 0 |
| Left_Engine A.1 | | 20 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 3 | 0,15 |
| Cell_MI A.1 | | 19 | | 250 | 250 | 250 | 740 | 2351 | 824,789 |
| Right_Engine A.1 | | 19 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| Cell_MD A.1 | | 19 | | 250 | 250 | 250 | 0 | 0 | 0 |

Product Inventory

| System | Raw Material | | | Work In Process | | | Finished Product | | |
|-------------------------|--------------|-----|-------|-----------------|-----|-------|------------------|-----|-----|
| | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg |
| Oper_FusCentral A.1 | 0 | 2 | 1,16 | 1 | 2 | 0,605 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_FusCentral A.1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,91 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_FusCola A.1 | 1 | 2 | 1,192 | 1 | 2 | 0,697 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_FusCola A.1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,825 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Cell A.1 | 1 | 1 | 0,424 | 1 | 3 | 1,498 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_Cell A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,007 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Engines A.1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0,372 | 0 | 1 | 0 |

Cycle Time

| System | Count | Cycle Time (Second) | | |
|---------------------|-------|---------------------|------|----------|
| | | Min | Max | Avg |
| Oper_FusCentral A.1 | 22 | 929 | 930 | 929,045 |
| Oper_FusCola A.1 | 21 | 1078 | 1079 | 1078,048 |
| Oper_Cell A.1 | 19 | 1270 | 2359 | 1327,316 |
| Oper_Engines A.1 | 19 | 1270 | 2884 | 1354,947 |

Systems Products Operations AS n RWC

Arrival & Dispatch

| System | Products Arrived |
|-----------------------|------------------|
| Source_FusCentral A.1 | 26280 |
| Source_FusCola A.1 | 26280 |
| Source_Cell A.1 | 26280 |
| Source_Engines A.1 | 26280 |

| System | Products Dispatched |
|---------------|---------------------|
| Sink_A350 A.1 | 19 |

Productions

| System | Products | | | | | | State Times (Second) | | | | | Average Processing Time (Second) | Average Requirement Time (Second) | Utilization (%) | |
|---------------------|----------|----------|----------|--------|--------------------|----------|----------------------|------------|-------------------|--------------------|---------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|---|
| | Input | Produced | Consumed | Output | Assembled / Packed | Rejected | Idle | Processing | Wait for Input(s) | Wait to Output (s) | Failed | | | | |
| FusCentral A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_FusCentral A.1 | 66 | 44 | 0 | 21 | 88 | 0 | 0 | 19909,165 | 1 | 5969,426 | 400,409 | 159,918 | 0,007 | 75,758 | |
| FusCola A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Oper_FusCola A.1 | 88 | 65 | 0 | 21 | 130 | 0 | 0 | 24195,877 | 1 | 1645,254 | 437,869 | 136,974 | 0,005 | 92,07 | |
| Cell A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Oper_Cell A.1 | 60 | 39 | 0 | 19 | 78 | 0 | 0 | 23981,677 | 1576,11 | 0 | 722,213 | 312,012 | 15,761 | 91,254 | |
| Engines A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Oper_Engines A.1 | 58 | 38 | 0 | 19 | 76 | 0 | 0 | 9904,271 | 16300,104 | 0 | 75,625 | 120,24 | 152,694 | 37,687 | |

Transfers

| System | Products | | Content | | Waiting Time (Second) | | | State Times (Second) | | | Utilization (%) |
|-------------------------|----------|--------|---------|-------|-----------------------|----------|----------|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | Input | Output | Max | Avg | Min | Max | Avg | Transporting | Wait for Input(s) | Wait to Output(s) | |
| Transfer_FusCentral A.1 | 21 | 20 | 1 | 0,887 | 10,339 | 1714,055 | 1113,958 | 211,519 | 2977,816 | 23090,665 | 0,805 |
| Transfer_FusCola A.1 | 21 | 20 | 1 | 0,7 | 9,193 | 1574,866 | 879,401 | 216,487 | 7883,019 | 18180,493 | 0,824 |
| Transfer_Cell A.1 | 19 | 19 | 1 | 0,008 | 8,113 | 11,972 | 10,521 | 199,893 | 26080,107 | 0 | 0,761 |

Products

| Product | Waiting Time (Second) | | | Initial | Input | Consumed | Assembled / Packed | Produced | Output |
|--------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|---------|-------|----------|--------------------|----------|--------|
| | Min | Max | Avg | | | | | | |
| Fuselage_Central.1 | 505,222 | 25636,439 | 12626,337 | 0 | 8779 | 0 | 22 | 0 | 0 |
| Fuselage_Rear.1 | 436,439 | 25726,5 | 12794,575 | 0 | 6512 | 0 | 22 | 0 | 0 |
| Fuselage_Front.1 | 2445,943 | 25237,981 | 13891,087 | 0 | 26280 | 0 | 19 | 0 | 0 |
| Engine.2 | 2709,692 | 25412,216 | 14139,015 | 0 | 13191 | 0 | 19 | 0 | 0 |
| Wing_Right.1 | 1044,966 | 26013,776 | 13080,925 | 0 | 8730 | 0 | 22 | 0 | 0 |
| Engine.1 | 2972,975 | 25656,002 | 14401,851 | 0 | 13089 | 0 | 19 | 0 | 0 |
| Wing_Left.1 | 502,222 | 25653,439 | 12636,246 | 0 | 8771 | 0 | 22 | 0 | 0 |
| Symmetry of Horiz_Stabiliser.1 | 430,439 | 25708,5 | 12771,802 | 0 | 6567 | 0 | 22 | 0 | 0 |
| Horiz_Stabiliser.1 | 794,214 | 25883,728 | 13126,752 | 0 | 6595 | 0 | 22 | 0 | 0 |
| Vert_Stabiliser.1 | 1189,623 | 25372,03 | 12891,454 | 0 | 6606 | 0 | 21 | 0 | 0 |
| Fus_Stab_2 A.1 output | 230,229 | 546,699 | 368,223 | 0 | 0 | 0 | 22 | 22 | 0 |
| Fus_Wings_1 A.1 output | 288,915 | 623,32 | 444,815 | 0 | 0 | 0 | 22 | 22 | 0 |
| Fus_Stab_1 A.1 output | 247,638 | 467,862 | 372,558 | 0 | 0 | 0 | 21 | 22 | 0 |
| Fus_Wings A.1 output | 909,498 | 3037,799 | 2110,202 | 0 | 0 | 0 | 20 | 22 | 0 |
| Fus_Stab A.1 output | 611,724 | 2564,757 | 1645,558 | 0 | 0 | 0 | 20 | 21 | 0 |
| Cell_1 A.1 output | 389,726 | 830,241 | 576,664 | 0 | 0 | 0 | 19 | 20 | 0 |
| Cell A.1 output | 164,56 | 311,72 | 258,506 | 0 | 0 | 0 | 19 | 19 | 0 |
| Physical Product00033324 A.1 | 188,054 | 319,936 | 260,889 | 0 | 0 | 0 | 19 | 19 | 0 |
| Physical Product00033325 A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 | 19 |

Operations

| Operation | System | Count | Rejected | Processing Time (Second) | | | Requirement Time (Second) | | |
|----------------------|--------|-------|----------|--------------------------|---------|---------|---------------------------|-----|-------|
| | | | | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg |
| Central_Fuselage A.1 | | 22 | | 8,427 | 22,249 | 15,575 | 0 | 1 | 0,045 |
| Left_Wing A.1 | | 22 | | 9,564 | 18,099 | 14,232 | 0 | 0 | 0 |
| FC_AI A.1 | | 22 | | 310,147 | 632,218 | 440,711 | 0 | 0 | 0 |
| Right_Wing A.1 | | 22 | | 10,591 | 23,026 | 15,64 | 0 | 0 | 0 |
| FC_AD A.1 | | 22 | | 252,82 | 578,358 | 418,805 | 0 | 0 | 0 |
| Rear_Fuselage A.1 | | 22 | | 6,996 | 21,48 | 14,487 | 0 | 1 | 0,045 |

| | | | | | | | | |
|----------------------|--|----|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| Left_Horizontal A.1 | | 22 | 10,88 | 17,869 | 14,058 | 0 | 0 | 0 |
| FT_EHI A.1 | | 22 | 244,175 | 475,485 | 346,047 | 0 | 0 | 0 |
| Right_Horizontal A.1 | | 22 | 11,537 | 20,45 | 15,443 | 0 | 0 | 0 |
| FT_EHD A.1 | | 22 | 217,717 | 506,846 | 348,919 | 0 | 0 | 0 |
| Vertical A.1 | | 22 | 8,544 | 19,534 | 14,427 | 0 | 0 | 0 |
| FT_EV A.1 | | 21 | 229,026 | 448,915 | 350,909 | 0 | 0 | 0 |
| FC_FT A.1 | | 20 | 346,282 | 923,432 | 666,383 | 0 | 1208,816 | 78,806 |
| Front_Fuselage A.1 | | 20 | 9,374 | 22,151 | 15,388 | 0 | 0 | 0 |
| FC_FD A.1 | | 19 | 376,604 | 777,583 | 541,648 | 0 | 0 | 0 |
| Left_Engine A.1 | | 20 | 9,746 | 24,481 | 14,965 | 0 | 1 | 0,05 |
| Cell_MI A.1 | | 19 | 152,588 | 301,724 | 245,227 | 351,985 | 2440,415 | 827,708 |
| Right_Engine A.1 | | 19 | 12,285 | 22,771 | 15,928 | 0 | 0 | 0 |
| Cell_MD A.1 | | 19 | 174,825 | 299,911 | 244,369 | 0 | 0 | 0 |

Product Inventory

| System | Raw Material | | | Work In Process | | | Finished Product | | |
|-------------------------|--------------|-----|-------|-----------------|-----|-------|------------------|-----|-----|
| | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg |
| Oper_FusCentral A.1 | 0 | 2 | 1,159 | 1 | 2 | 0,6 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_FusCentral A.1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,887 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_FusCola A.1 | 1 | 2 | 1,247 | 1 | 2 | 0,679 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_FusCola A.1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,7 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Cell A.1 | 1 | 1 | 0,42 | 1 | 3 | 1,48 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_Cell A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,008 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Engines A.1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0,368 | 0 | 1 | 0 |

Cycle Time

| System | Count | Cycle Time (Second) | | |
|---------------------|-------|---------------------|----------|----------|
| | | Min | Max | Avg |
| Oper_FusCentral A.1 | 22 | 763,313 | 1284,678 | 923,208 |
| Oper_FusCola A.1 | 21 | 933,578 | 1462,112 | 1134,561 |
| Oper_Cell A.1 | 19 | 899,734 | 2446,943 | 1329,315 |
| Oper_Engines A.1 | 19 | 790,568 | 2975,975 | 1352,211 |

Simulation Time 26280
 Warmup Time 0
 Run 1

FAL II Ideal

Time in Second
 Length in Meter

Systems Products Operations AS n RWC

Arrival & Dispatch

| System | Products Arrived |
|-----------------------|------------------|
| Source_Fus A.1 | 26280 |
| Source_Wings A.1 | 26280 |
| Source_Stabiliser A.1 | 26280 |
| Source_Engines A.1 | 26280 |

| System | Products Dispatched |
|---------------|---------------------|
| Sink_A350 A.1 | 18 |

Productions

| System | Products | | | | | | State Times (Second) | | | Average Processing Time (Second) | Average Requirement Time (Second) | Utilization (%) |
|---------------------|----------|----------|----------|--------|--------------------|----------|----------------------|------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| | Input | Produced | Consumed | Output | Assembled / Packed | Rejected | Idle | Processing | Wait for Input (s) | | | |
| Fuselage A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Fus A.1 | 62 | 40 | 0 | 20 | 80 | 0 | 0 | 26279 | 1 | 255,196 | 0,008 | 99,996 |
| Wings A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Wings A.1 | 59 | 38 | 0 | 19 | 76 | 0 | 0 | 17650 | 8630 | 225,727 | 88,061 | 67,161 |
| Stabiliser A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Stabiliser A.1 | 75 | 55 | 0 | 18 | 110 | 0 | 0 | 19809 | 6471 | 175,64 | 49,397 | 75,377 |
| Engines A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 26280 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Engines A.1 | 55 | 36 | 0 | 18 | 72 | 0 | 0 | 9555 | 16725 | 130,89 | 177,75 | 36,358 |

Transfers

| System | Products | | Content | | Waiting Time (Second) | | | State Times (Second) | | Utilization (%) |
|-------------------------|----------|--------|---------|-------|-----------------------|-----|-----|----------------------|-------------------|-----------------|
| | Input | Output | Max | Avg | Min | Max | Avg | Transporting | Wait for Input(s) | |
| Transfer_Fuselage A.1 | 20 | 20 | 1 | 0,008 | 10 | 10 | 10 | 200 | 26080 | 0,761 |
| Transfer_Wings A.1 | 19 | 19 | 1 | 0,007 | 10 | 10 | 10 | 190 | 26090 | 0,723 |
| Transfer_Stabiliser A.1 | 18 | 18 | 1 | 0,007 | 10 | 10 | 10 | 180 | 26100 | 0,685 |

Products

| Product | Waiting Time (Second) | | | Initial | Input Consumed | Assembled / Packed | Produced | Output |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------|-----------|---------|----------------|--------------------|----------|--------|
| | Min | Max | Avg | | | | | |
| Fuselage_Front.1 | 583 | 25224 | 12910,05 | 0 | 8806 | 0 | 20 | 0 |
| Wing_Left.1 | 1752 | 25120 | 13437 | 0 | 13103 | 0 | 19 | 0 |
| Vert_Stabiliser.1 | 3267 | 25297 | 14288,111 | 0 | 8806 | 0 | 18 | 0 |
| Engine.2 | 3527 | 25592 | 14560,611 | 0 | 13186 | 0 | 18 | 0 |
| Fuselage_Rear.1 | 1299 | 25942 | 13619,8 | 0 | 8772 | 0 | 20 | 0 |
| Wing_Right.1 | 2208 | 25566 | 13886 | 0 | 13177 | 0 | 19 | 0 |
| Horiz_Stabiliser.1 | 2897 | 24910 | 13900,889 | 0 | 8793 | 0 | 18 | 0 |
| Symmetry of Horiz_Stabiliser.1 | 2549 | 25915 | 14229,579 | 0 | 8681 | 0 | 19 | 0 |
| Engine.1 | 3790 | 25858 | 14823,389 | 0 | 13094 | 0 | 18 | 0 |
| Fuselage_Central.1 | 579 | 25226 | 12897,65 | 0 | 8702 | 0 | 20 | 0 |
| Fuselage_1 A.1 output | 717 | 717 | 717 | 0 | 0 | 0 | 20 | 20 |
| Physical Product00000091_D34EB3C6-0000-27E4-5D148B650002D8F6 A.1 | 452 | 452 | 452 | 0 | 0 | 0 | 19 | 20 |
| Physical Product00033279 A.1 | 457 | 457 | 457 | 0 | 0 | 0 | 19 | 19 |
| Fus-Wings A.1 output | 342 | 342 | 342 | 0 | 0 | 0 | 19 | 19 |

| | | | | | | | | | |
|------------------------------|-----|-----|-----|---|---|---|----|----|----|
| Airframe_2 A.1 output | 347 | 347 | 347 | 0 | 0 | 0 | 18 | 19 | 0 |
| Airframe_1 A.1 output | 369 | 369 | 369 | 0 | 0 | 0 | 18 | 18 | 0 |
| Physical Product00033280 A.1 | 260 | 260 | 260 | 0 | 0 | 0 | 18 | 18 | 0 |
| Physical Product00033281 A.1 | 265 | 265 | 265 | 0 | 0 | 0 | 18 | 18 | 0 |
| Physical Product00033282 A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 | 18 |

Operations

| Operation | System | Count | Rejected | Processing Time (Second) | | | Requirement Time (Second) | | |
|----------------------|--------|-------|----------|--------------------------|-----|-----|---------------------------|------|---------|
| | | | | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg |
| Front_Fuselage A.1 | | 21 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 1 | 0,048 |
| Central_Fuselage A.1 | | 21 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| FC_FD A.1 | | 20 | | 553 | 553 | 553 | 0 | 0 | 0 |
| Rear_Fuselage A.1 | | 20 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| FC_FT A.1 | | 20 | | 702 | 702 | 702 | 0 | 0 | 0 |
| Left_Wing A.1 | | 20 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 1 | 0,05 |
| FC_AI A.1 | | 19 | | 442 | 442 | 442 | 386 | 1295 | 431,45 |
| Right_Wing A.1 | | 19 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| FC_AD A.1 | | 19 | | 442 | 442 | 442 | 0 | 0 | 0 |
| Left_Horizontal A.1 | | 19 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 3 | 0,158 |
| FT_EHI A.1 | | 19 | | 332 | 332 | 332 | 237 | 2202 | 340,421 |
| Right_Horizontal A.1 | | 19 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| FT_EHD A.1 | | 18 | | 332 | 332 | 332 | 0 | 0 | 0 |
| Vertical A.1 | | 18 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| FT_EV A.1 | | 18 | | 354 | 354 | 354 | 0 | 0 | 0 |
| Left_Engine A.1 | | 19 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 1 | 0,053 |
| Cell_MI A.1 | | 18 | | 250 | 250 | 250 | 770 | 3262 | 908,444 |
| Right_Engine A.1 | | 18 | | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| Cell_MD A.1 | | 18 | | 250 | 250 | 250 | 0 | 0 | 0 |

Product Inventory

| System | Raw Material | | | Work In Process | | | Finished Product | | |
|-------------------------|--------------|-----|-------|-----------------|-----|-------|------------------|-----|-----|
| | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg |
| Oper_Fus A.1 | 1 | 2 | 1,442 | 0 | 2 | 0,546 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_Fuselage A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,008 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Wings A.1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0,66 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_Wings A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,007 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Stabiliser A.1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0,743 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_Stabiliser A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,007 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Engines A.1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0,353 | 0 | 1 | 0 |

Cycle Time

| System | Count | Cycle Time (Second) | | |
|---------------------|-------|---------------------|------|----------|
| | | Min | Max | Avg |
| Oper_Fus A.1 | 20 | 1300 | 1301 | 1300,05 |
| Oper_Wings A.1 | 19 | 1300 | 2210 | 1347,895 |
| Oper_Stabiliser A.1 | 18 | 1300 | 3268 | 1409,333 |
| Oper_Engines A.1 | 18 | 1300 | 3793 | 1438,5 |

Operations

| Operation | System | Count | Rejected | Processing Time (Second) | | | Requirement Time (Second) | | |
|----------------------|--------|-------|----------|--------------------------|---------|---------|---------------------------|----------|---------|
| | | | | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg |
| Front_Fuselage A.1 | | 20 | | 11,234 | 21,362 | 15,959 | 0 | 1 | 0,05 |
| Central_Fuselage A.1 | | 20 | | 11,734 | 22,344 | 16,042 | 0 | 0 | 0 |
| FC_FD A.1 | | 20 | | 304,867 | 723,814 | 533,875 | 0 | 0 | 0 |
| Rear_Fuselage A.1 | | 20 | | 8,462 | 20,617 | 14,897 | 0 | 0 | 0 |
| FC_FT A.1 | | 19 | | 273,095 | 949,775 | 709,254 | 0 | 0 | 0 |
| Left_Wing A.1 | | 20 | | 7,879 | 20,652 | 13,978 | 0 | 1 | 0,05 |
| FC_AI A.1 | | 19 | | 255,683 | 562,05 | 446,657 | 20,775 | 1224,669 | 431,221 |
| Right_Wing A.1 | | 19 | | 6,771 | 21,61 | 14,658 | 0 | 0 | 0 |
| FC_AD A.1 | | 19 | | 310,464 | 665,782 | 450,106 | 0 | 0 | 0 |
| Left_Horizontal A.1 | | 19 | | 5,021 | 24,751 | 14,963 | 0 | 1 | 0,053 |
| FT_EHI A.1 | | 18 | | 225,573 | 410,864 | 322,709 | 0 | 2073,159 | 402,37 |
| Right_Horizontal A.1 | | 18 | | 11,291 | 18,965 | 14,88 | 0 | 0 | 0 |
| FT_EHD A.1 | | 18 | | 174,181 | 499,091 | 304,286 | 0 | 0 | 0 |
| Vertical A.1 | | 18 | | 11,116 | 18,315 | 14,856 | 0 | 0 | 0 |
| FT_EV A.1 | | 18 | | 226,304 | 444,648 | 342,109 | 0 | 0 | 0 |
| Left_Engine A.1 | | 18 | | 10,869 | 20,824 | 16,676 | 0 | 2 | 0,111 |
| Cell_MI A.1 | | 17 | | 181,758 | 381,473 | 255,02 | 133,666 | 2874,89 | 927,217 |
| Right_Engine A.1 | | 17 | | 9,632 | 21,218 | 15,416 | 0 | 0 | 0 |
| Cell_MD A.1 | | 17 | | 171,583 | 396,011 | 269,477 | 0 | 0 | 0 |

Product Inventory

| System | Raw Material | | | Work In Process | | | Finished Product | | |
|-------------------------|--------------|-----|-------|-----------------|-----|-------|------------------|-----|-----|
| | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg | Min | Max | Avg |
| Oper_Fus A.1 | 1 | 2 | 1,432 | 1 | 2 | 0,556 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_Fuselage A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,011 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Wings A.1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0,673 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_Wings A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,031 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Stabiliser A.1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0,698 | 0 | 0 | 0 |
| Transfer_Stabiliser A.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,007 | 0 | 0 | 0 |
| Oper_Engines A.1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0,353 | 0 | 1 | 0 |

Cycle Time

| System | Count | Cycle Time (Second) | | |
|---------------------|-------|---------------------|----------|----------|
| | | Min | Max | Avg |
| Oper_Fus A.1 | 19 | 883,034 | 1685,435 | 1327,821 |
| Oper_Wings A.1 | 19 | 875,021 | 2083,73 | 1376,477 |
| Oper_Stabiliser A.1 | 18 | 784,188 | 2887,801 | 1457,333 |
| Oper_Engines A.1 | 17 | 685,376 | 3558,835 | 1509,051 |

Referencias

(Aparicio, 2013) Aparicio, G. (2013) *Secuenciación de operaciones de montaje de un avión C-295*. M.Eng. Thesis. Universidad de Sevilla, España.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Grado en Ingeniería Aeroespacial

Parte III

PLANOS

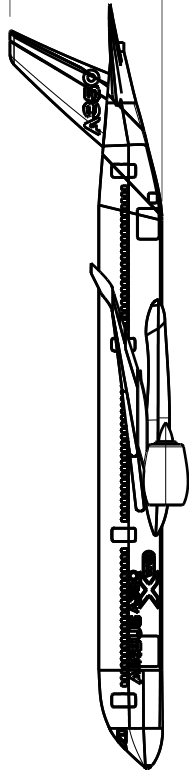
**PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO DEL PROCESO DE
FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE DE AERONAVES
INTEGRADO EN PLATAFORMAS PLM**

Samuel Molina Casino

Índice

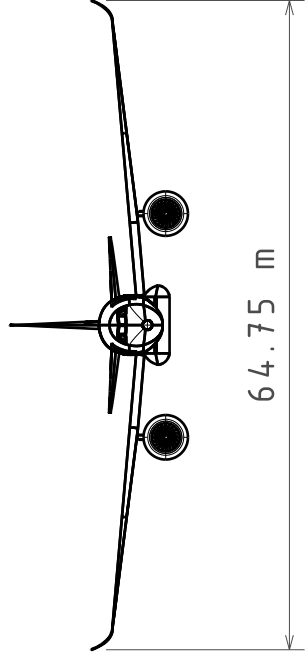
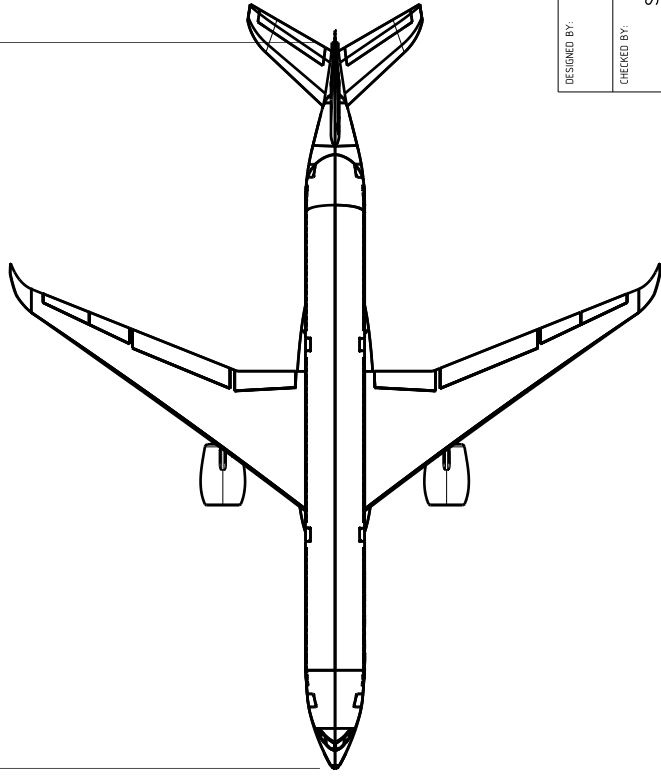
| | |
|------------------------------------------------|------------|
| Plano 1: Ensamblaje A350 XWB | 86 |
| Plano 2: Sección delantera del fuselaje | 88 |
| Plano 3: Sección central del fuselaje | 90 |
| Plano 4: Sección trasera del fuselaje | 92 |
| Plano 5: Ala izquierda | 94 |
| Plano 6: Ala derecha | 96 |
| Plano 7: Estabilizador horizontal | 98 |
| Plano 8: Estabilizador vertical | 100 |

1 2 3 4 5 6

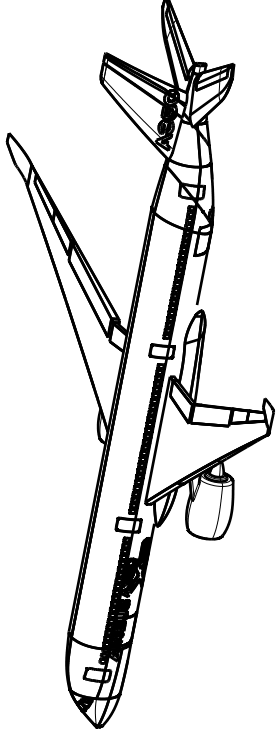


17.10 m

73.88 m



64.75 m



DESIGNED BY:

Mehmet Canaz

CHECKED BY:

Samuel Molina Casino

DATE:

23/06/2019

SIZE:

A4



COMPANY:

UPV

DRAWING NUMBER

1/9

SHEET

1 / 1

Este plano cumple con la norma ISO/FR 14638:1995

Ensamblaje A350 XWB

DASSAULT SYSTEMES



A4

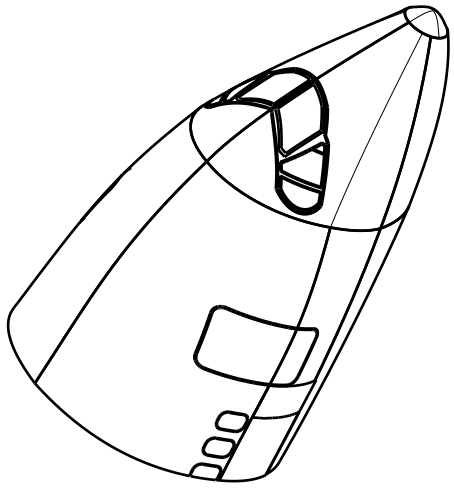
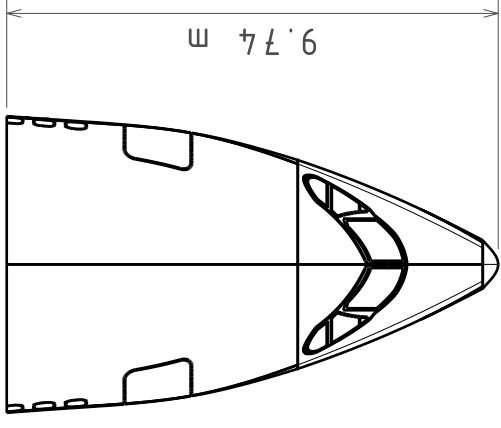
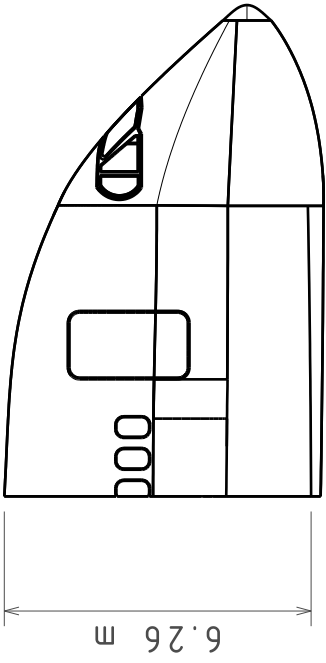
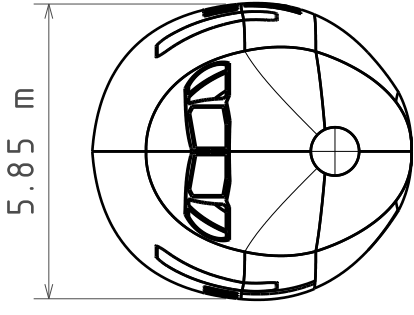
1 2 3 4 5 6

A

B

C

D



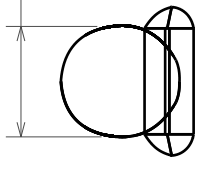
| | |
|--------------------------------------------------|----------------------|
| DESIGNED BY: | Mehmet Canaz |
| CHECKED BY: | Samuel Molina Casino |
| DATE: | 23/06/2019 |
| SIZE: | A4 |
| SCALE: | 1:150 |
| COMPANY: | UPV |
| Este plano cumple con la norma ISO/FD 14638:1995 | |

| | |
|--------------------------------|-------|
| Sección delantera del fuselaje | |
| DASSAULT SYSTEMES | |
| DRAWING NUMBER | 2/9 |
| SHEET | 1 / 1 |

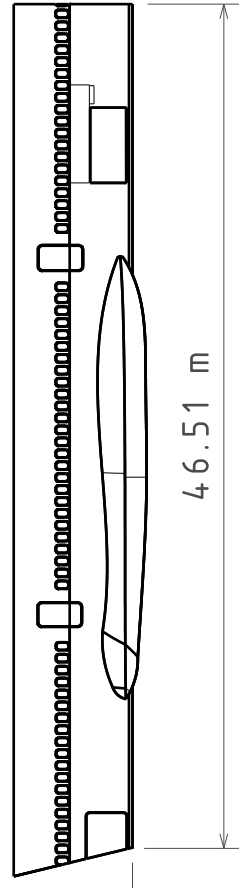
A4

1 2 3 4 5 6

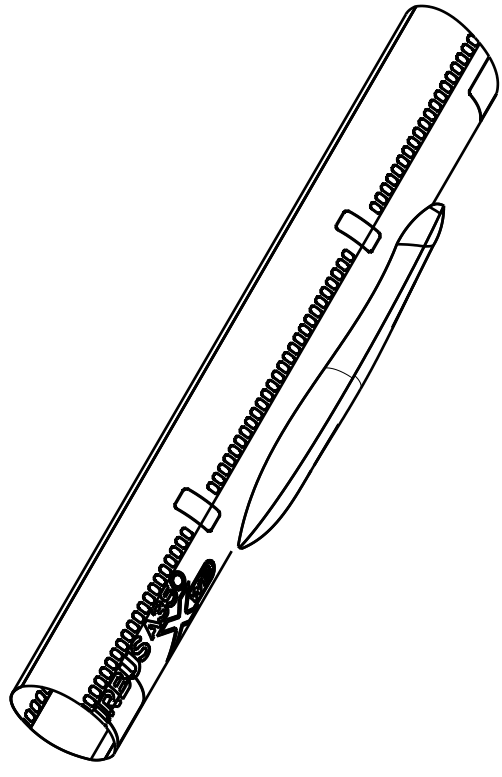
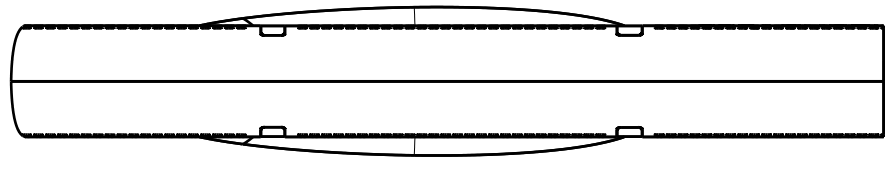
5.85 m



6.26 m



46.51 m



DESIGNED BY:

Mehmet Canaz

CHECKED BY:

Samuel Molina Casino

DATE:

23/06/2019

SIZE:

A4



COMPANY:

UPV

DRAWING NUMBER

3/9

SHEET

1 / 1

Este plano cumple con la norma ISO/FR 14638:1995

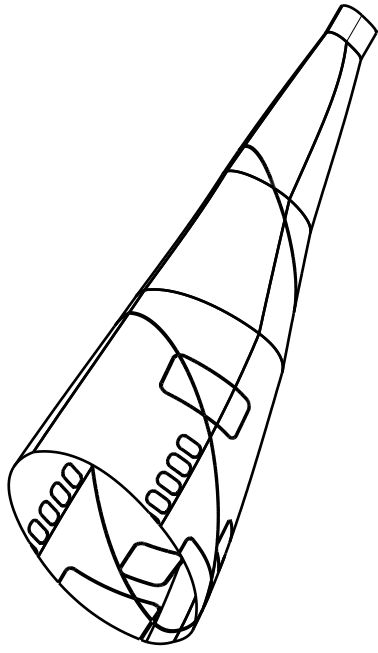
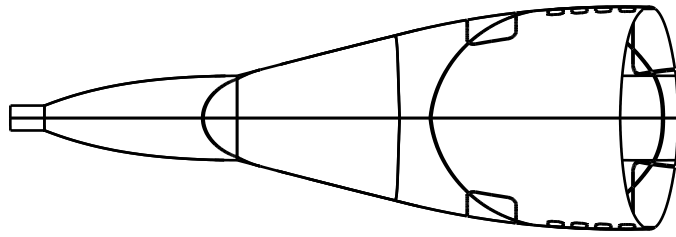
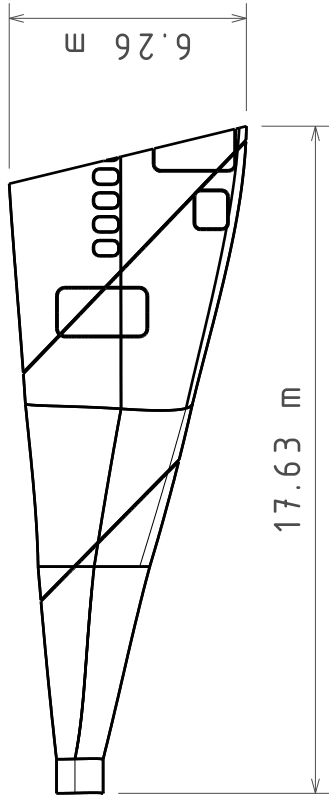
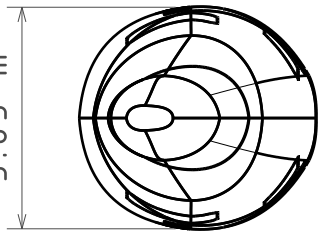
Sección central del fuselaje

DASSAULT SYSTEMES

A4

1 2 3 4 5 6

5.85 m



DESIGNED BY:

Mehmet Canaz

CHECKED BY:

Samuel Molina Casino

DATE:

23/06/2019

SIZE:

A4

COMPANY:

UPV

Este plano cumple con la norma ISO/FR 14638:1995

DESIGNED BY:

Mehmet Canaz

CHECKED BY:

Samuel Molina Casino

DATE:

23/06/2019

SIZE:

A4

COMPANY:

UPV

Este plano cumple con la norma ISO/FR 14638:1995

DESIGNED BY:

Mehmet Canaz

CHECKED BY:

Samuel Molina Casino

DATE:

23/06/2019

SIZE:

A4

COMPANY:

UPV

Este plano cumple con la norma ISO/FR 14638:1995

D

Sección trasera del fuselaje

DASSAULT SYSTEMES



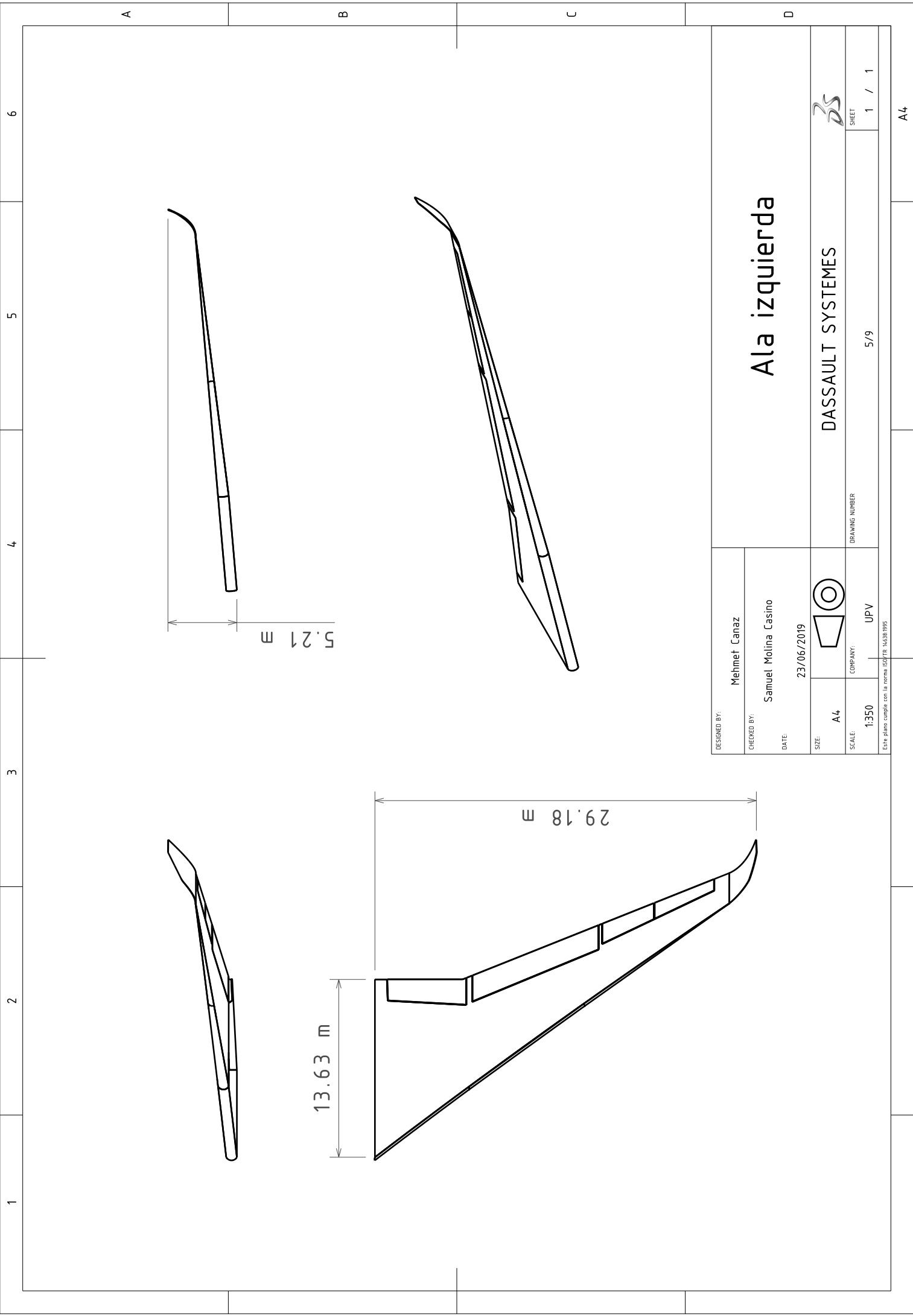
DRAWING NUMBER


4/9

SHEET

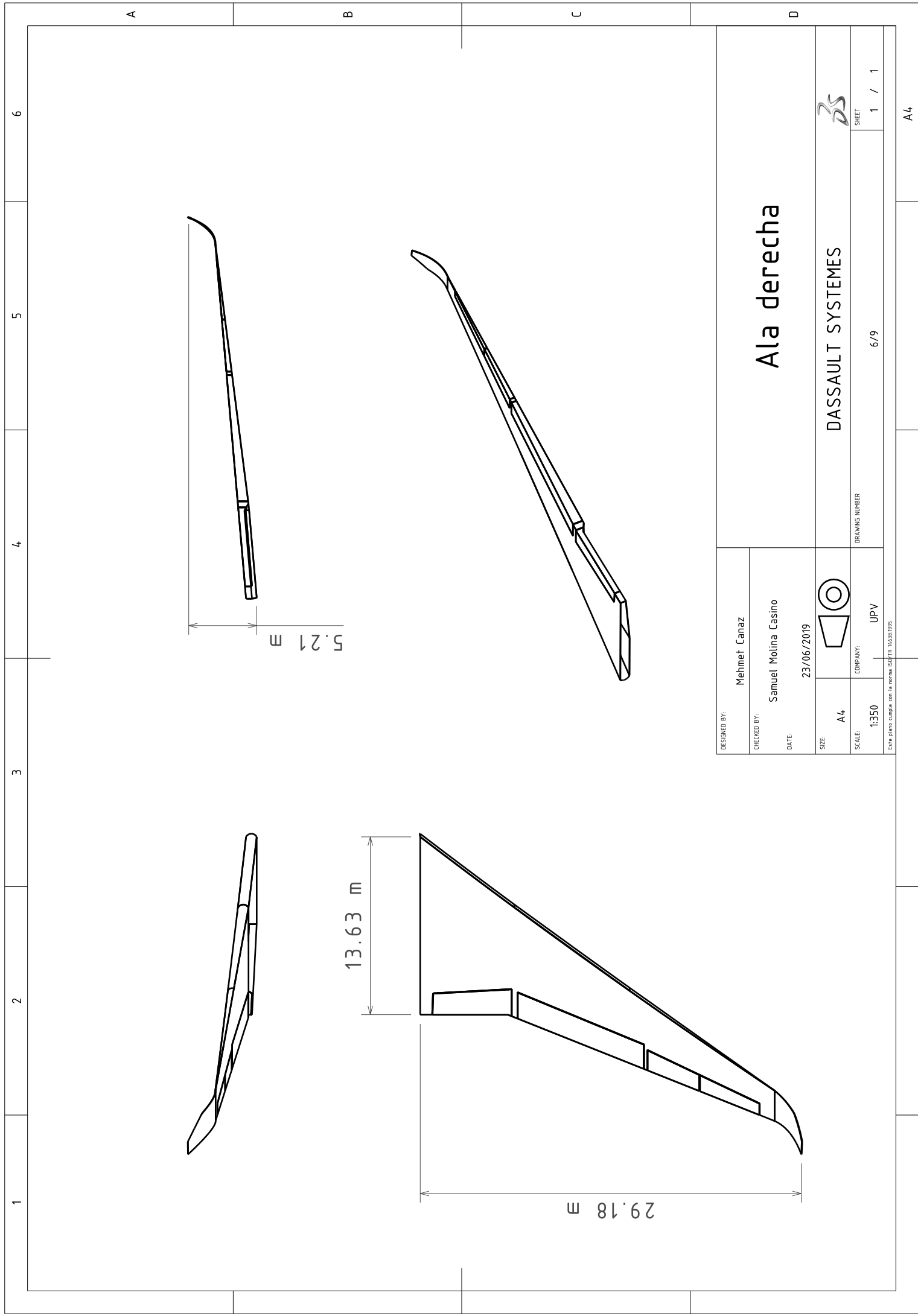
1 / 1


A4




| | | |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| DESIGNED BY: Mehmet Canaz | <h1 style="text-align: center;">Ala izquierda</h1> | |
| CHECKED BY: Samuel Molina Casino | | |
| DATE: 23/06/2019 |  | DASSAULT SYSTEMES DRAWING NUMBER 5/9 |
| SIZE: A4 | | |
| SCALE: 1:350 | COMPANY: UPV | SHEET 1 / 1 |
| <small>Este plano cumple con la norma ISO/FI 14638:1995</small> | | |

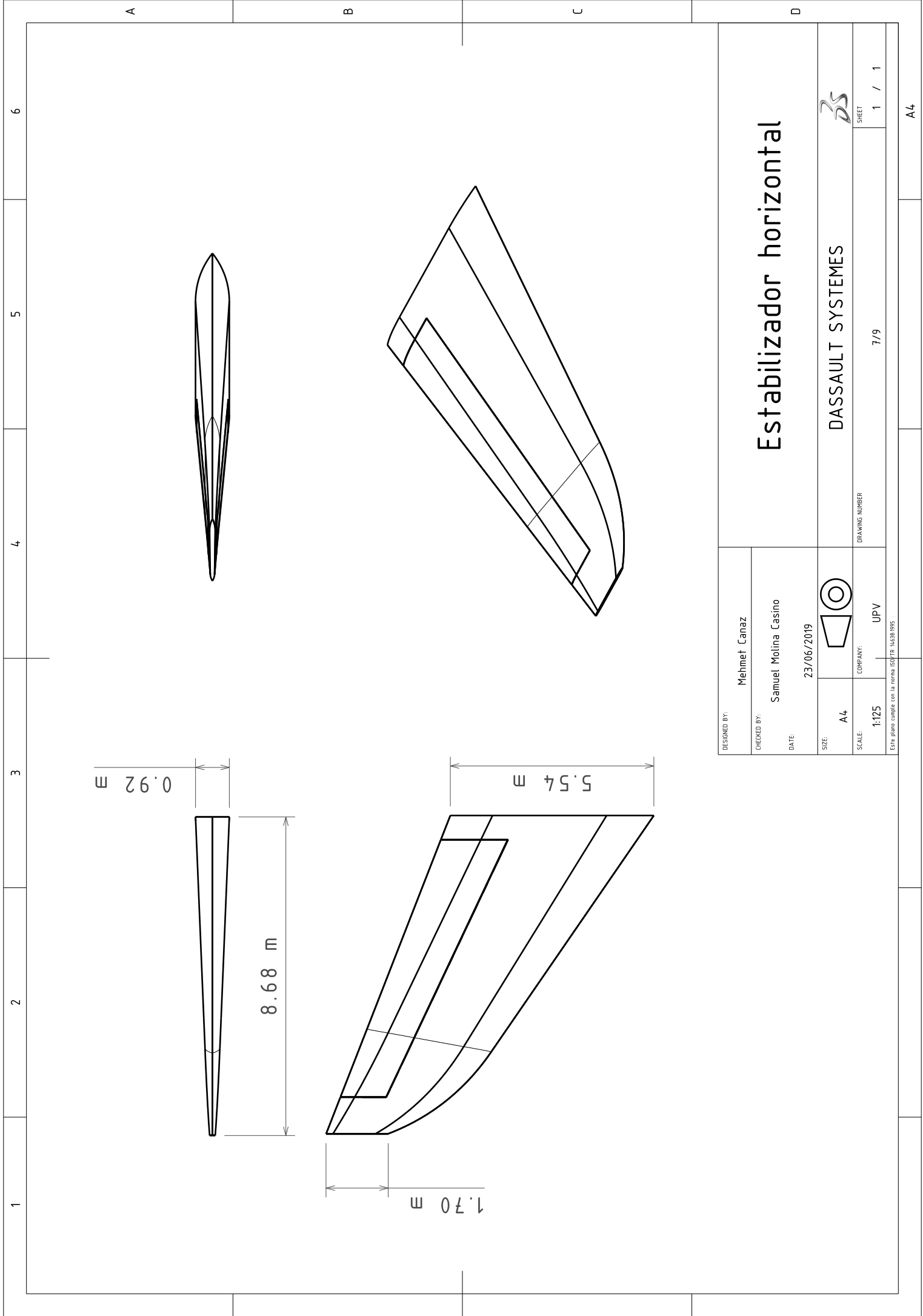
A4



| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| DESIGNED BY: | Mehmet Canaz |
| CHECKED BY: | Samuel Molina Casino |
| DATE: | 23/06/2019 |
| SIZE: | A4 |
| SCALE: | 1:350 |
| COMPANY: | UPV |
|  | |
| Este plano cumple con la norma ISO/FR 14638:1995 | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <h1>Ala derecha</h1> | |
| <h2>DASSAULT SYSTEMES</h2> | |
|  | |
| DRAWING NUMBER | 6/9 |
| SHEET | 1 / 1 |

A4



| | |
|--------------------------------------------------|----------------------|
| DESIGNED BY: | Mehmet Canaz |
| CHECKED BY: | Samuel Molina Casino |
| DATE: | 23/06/2019 |
| SIZE: | A4 |
| SCALE: | 1:125 |
| Este plano cumple con la norma ISO/FR 14638:1995 | |
| COMPANY: | UPV |
| DRAWING NUMBER | 7/9 |
| SHEET | 1 / 1 |

Estabilizador horizontal

DASSAULT SYSTEMES



1 2 3 4 5 6

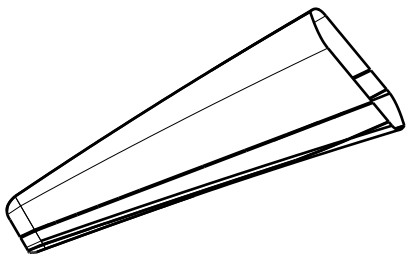
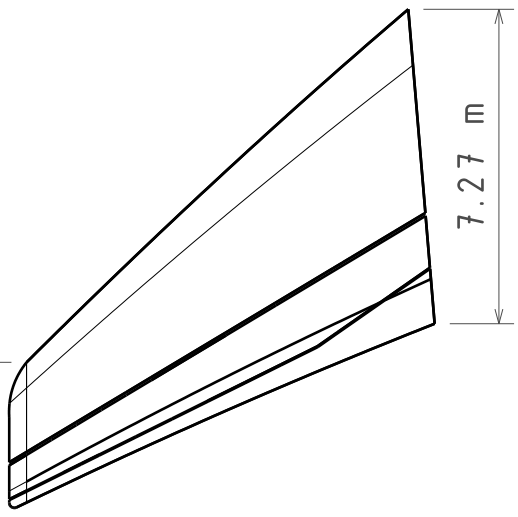
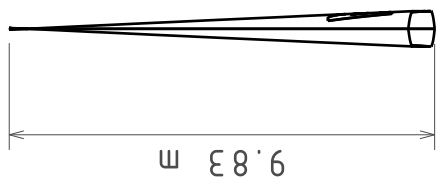
A



B

C

D

3.44 m



| | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------|
| DESIGNED BY: Mehmet Canaz | Estabilizador vertical | | |
| CHECKED BY: Samuel Molina Casino | DASSAULT SYSTEMES | | |
| DATE: 23/06/2019 |  | DRAWING NUMBER 8/9 | SHEET 1 / 1 |
| SIZE: A4 |  | COMPANY: UPV | |
| SCALE: 1:175 | Este plano cumple con la norma ISO/FR 14638:1995 | | |

A4

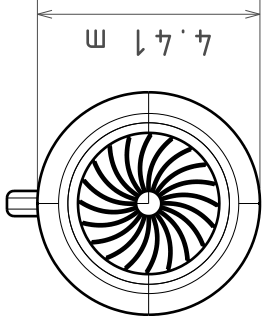
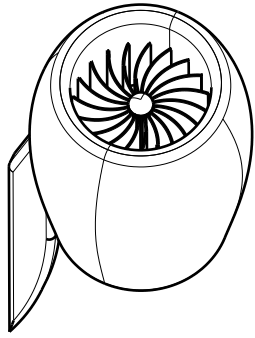
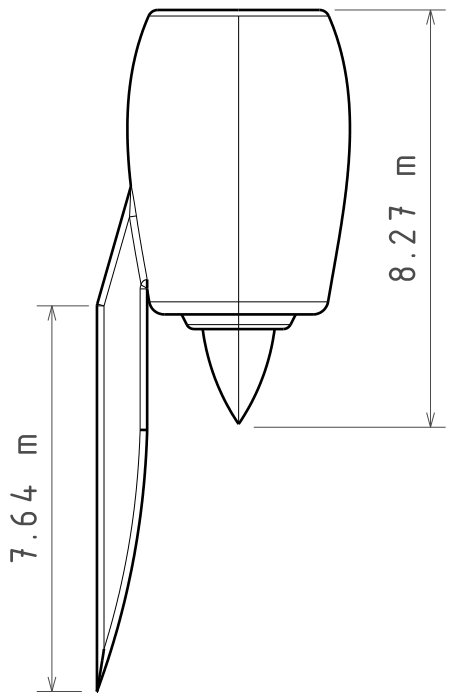
1 2 3 4 5 6

A

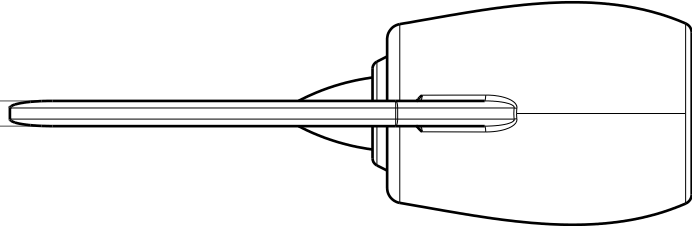
B

C

D



0.50 m



| | |
|---------------------------------------------------|----------------------|
| DESIGNED BY: | Mehmet Canaz |
| CHECKED BY: | Samuel Molina Casino |
| DATE: | 23/06/2019 |
| SIZE: | A4 |
| SCALE: | 1:150 |
| Este plano cumple con la norma ISO/IEC 15638:1995 | |



COMPANY: UPV

DRAWING NUMBER

9/9

SHEET 1 / 1

Motor

DASSAULT SYSTEMES



A4

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Grado en Ingeniería Aeroespacial

Parte IV

PLIEGO DE CONDICIONES

**PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO DEL PROCESO DE
FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE DE AERONAVES
INTEGRADO EN PLATAFORMAS PLM**

Samuel Molina Casino

Índice

| | |
|----------------------------------------------|------------|
| 1. Objeto del pliego de condiciones | 107 |
| 2. Documentos que definen el proyecto | 107 |
| 3. Condiciones generales | 107 |
| 3.1. Ejecución del proyecto | 107 |
| 3.2. Condiciones facultativas | 108 |
| 3.3. Condiciones económicas | 109 |
| 3.4. Condiciones legales | 109 |
| 4. Condiciones técnicas | 110 |
| 4.1. Especificaciones informáticas | 110 |

1 Objeto del pliego de condiciones

La final de este documento es especificar las condiciones técnicas, económicas y administrativas en las que se desarrolla el proyecto, y con las que se ha llegado a la resolución propuesta de los problemas planteados.

2 Documentos que definen el proyecto

La estructura del proyecto tiene los siguientes documentos:

- Memoria
- Anexos
- Planos
- Pliego de condiciones
- Presupuestos

Este conjunto de documentos conforma las prescripciones técnicas que sirven de base para la puesta en marcha y el correcto desarrollo del proyecto. En caso de contradicciones entre este pliego de condiciones y la memoria, prevalecerá lo escrito en el primero sobre la segunda. Aquello a lo que se hiciera mención únicamente en alguno de estos documentos y omitido en el resto, habrá de ser ejecutado como si estuviera presente en todos ellos.

La omisión y descripciones erróneas en este pliego de condiciones o en los planos de los detalles de los trabajos que sean manifiestamente indispensables para llevar a cabo el proyecto según la intención expuesta en estos, o que por usos y costumbres debieran ser realizadas, no eximen al operario de la obligación de ejecutarlos tal y como si hubieran sido completa y correctamente especificados.

3 Condiciones generales

En las condiciones generales del pliego de condiciones se recogen la propia ejecución del proyecto, las condiciones facultativas, las condiciones económicas y las condiciones legales.

3.1 Ejecución del proyecto

En la ejecución de este proyecto se deberán seguir las especificaciones e indicaciones técnicas recogidas en la memoria del proyecto y los anexos.

Los análisis y desarrollos justificativos de las simulaciones realizadas se describen en la memoria del proyecto. Las variables y características escogidas para las simulaciones se recogen en sus apartados correspondientes.

Si hubiera algún tipo de duda durante el transcurso de la realización del proyecto, esta habría de ser consultada con el proyectista.

3.2 Condiciones facultativas

En el desarrollo de este proyecto intervienen los siguientes agentes:

- Empresa contratante o cliente: es aquella que compra a la empresa contratista la ejecución del proyecto, y posee los fondos necesarios para llevarlo a cabo.
- Empresa contratista o proyectista: autora del proyecto y encargada de la ejecución del mismo. Tiene total conocimiento del proyecto y de las circunstancias que rodean al avance de su desarrollo.

3.2.1 Obligaciones y derechos de la empresa contratista

El incumplimiento de la siguiente serie de derechos y obligaciones de la empresa encargada del desarrollo del proyecto puede motivar la rescisión del contrato:

- La empresa proyectista se ha de ceñir a los requerimientos y especificaciones acordados con la empresa contratante.
- La empresa contratista ha de respetar la confidencialidad de toda aquella información suministrada por el cliente, así como de toda aquella generada durante el desarrollo del proyecto.
- Se deberá informar al cliente de todos los avances de las distintas fases del desarrollo del proyecto.
- La empresa proyectista tiene derecho a recibir toda la información que sea necesaria para la realización y puesta en marcha del proyecto.

3.2.2 Obligaciones y derechos de la empresa contratante

El cliente está igualmente sujeto a derechos y obligaciones, cuyo cumplimiento puede condicionar la extinción del contrato:

- La empresa contratante está obligada a cumplir con todas aquellas condiciones acordadas contractualmente, así como aquellas que, de mutuo acuerdo, pudieran establecerse entre ambos agentes.
- El cliente no se interpondrá en el normal desarrollo del proyecto por parte de la empresa proyectista, respetando en todo momento su trabajo.
- Está en su derecho de ser informada en todo momento del estado del proyecto.
- Podrá decidir sobre el inicio, ritmo y calidad del desarrollo de las distintas fases del proyecto, siempre y cuando se respeten los plazos y fechas fijados de manera contractual.

3.2.3 Plazos de ejecución del proyecto

Una vez se haya establecido una fecha de inicio de los trabajos, se habrá de fijar, mediante un acuerdo firmado, un plazo límite de finalización del proyecto.

Tras fijar la fecha límite de consecución del proyecto, habrá de entregarse al cliente un informe de planificación de la ejecución del proyecto.

3.3 Condiciones económicas

Aquí se establecen y regulan las relaciones de carácter económico entre la empresa contratante y la empresa contratista.

3.3.1 Fianza

El cliente habrá de depositar un porcentaje sobre el valor total del presupuesto como garantía a la firma del contrato.

La fianza se fijará en un 10 % del total presupuestado, que se deducirá del total a abonar en el momento de la consecución definitiva de los objetivos del proyecto.

3.3.2 Precios contradictorios

Aquellos precios no presupuestados inicialmente que pudieran aparecer durante el desarrollo y/o la ejecución del proyecto, habrán de ser aprobados por el cliente.

3.3.3 Mejoras y modificaciones

Aquellas mejoras o modificaciones que pudieran ser propuestas por la empresa contratante tras la firma del contrato correrán a su cargo. Las que se realizaran por iniciativa de la empresa proyectista no modificará el presupuesto inicialmente presentado.

3.3.4 Abono del coste del proyecto

El cliente dispondrá de 60 días para abonar el importe del proyecto, incluyendo tanto el coste presupuestado, como los costes adicionales que eventualmente pudieran serle imputados. Ambas partes acordarán previamente la modalidad en que se haya de efectuar el pago.

3.4 Condiciones legales

Aquí se establecen las condiciones de tipo legal que han de cumplir los agentes intervinientes en el presente proyecto, así como el tipo de proyecto.

3.4.1 Tipo de contrato

El tipo de contrato de aplicación al presente proyecto es el contrato a precio alzado. Esto significa que el precio fijado en él, no se podrá modificar posteriormente, salvo excepciones recogidas en este pliego de condiciones.

3.4.2 Arbitraje y jurisdicción competente

En caso de desavenencia entre ambas empresas, será el agente responsable del contrato quien arbitrará en la disputa para tratar de llegar a un acuerdo.

Si no fuera posible alcanzar ningún tipo de acuerdo, se designará un responsable por parte de cada una de las partes para tratar de solucionar la desavenencia. Finalmente, si aún no fuera posible lograr un acuerdo, deberá llevarse a juicio el litigio.

3.4.3 Responsabilidad de la empresa contratista

La empresa proyectista ha de asumir las siguientes responsabilidades durante la vigencia del contrato:

- Tener solvencia económica.
- Garantizar que la situación legal y laboral de los trabajadores es la adecuada.
- Garantizar una buena calidad del trabajo realizado.
- Cumplir con todos los plazos establecidos en el contrato.

3.4.4 Subcontrataciones

Se podrá subcontratar una parte de los trabajos de ejecución del proyecto a terceros, pero la empresa contratista será siempre el único responsable ante el cliente.

3.4.5 Rescisión del contrato

Las siguientes causas pueden ser motivo de rescisión del contrato:

- Demora excesiva sin causa justificada en la ejecución del proyecto.
- Abandono injustificado de los trabajos de ejecución.
- Causa administrativa.
- Defunción del proyectista.

En caso de ser el cliente quien rescindiera unilateralmente el contrato, deberá abonar a la empresa contratista el importe de los trabajos ejecutados hasta la fecha, así como el 50 % de los trabajos pendientes.

4 Condiciones técnicas

Aquí se detallan las características técnicas exigibles a los equipos necesarios para el correcto desarrollo y ejecución del proyecto.

4.1 Especificaciones informáticas

En este apartado se recogen las características de los equipos informáticos a utilizar en el desarrollo del proyecto, así como de las aplicaciones informáticas de las que se ha hecho uso o se prevé necesario para la ejecución del proyecto.

4.1.1 Especificaciones de *hardware*

El software 3DExperience requiere ejecutarse bajo alguno de los sistemas operativos Windows 10, Windows 8.1 o Windows 7 en sus ediciones de 64 bits.

Las especificaciones del sistema deben ser iguales o superiores a las siguientes:

- Velocidad CPU: 2 GHz
- Memoria RAM: 2 GB (32-bits) o 4 GB (64-bits)
- Memoria virtual: 2 GB
- Espacio libre en disco duro: 750 MB para instalación. Se recomienda 4 GB
- Tarjeta gráfica: 512 MB DRAM
- Resolución de pantalla recomendada: 24 bit – 1280x1024
- Conexión de red para acceso a servidor de licencias
- Teclado
- Ratón
- Adobe Flash Player 9

4.1.2 Aplicaciones informáticas

A continuación, se detallan las aplicaciones informáticas de las que se ha hecho uso para el desarrollo del proyecto:

- 3DExperience
- Matlab
- Inkscape
- Overleaf
- Lucidchart
- Microsoft Office

4.1.3 Licencias

Todas las aplicaciones informáticas empleadas para la consecución del proyecto deben disponer de una licencia académica o profesional o tratarse de aplicaciones de libre distribución.

La Universidad Politécnica de Valencia dispone de licencias académicas de 3DExperience para el diseño y simulación de los sistemas de producción, así como de Matlab para programación y post-procesado de los resultados. También se dispone de una licencia académica gratuita de Microsoft Office.

Inkscape, Lucidchart y Overleaf son aplicaciones de uso libre para la modificación de imágenes, creación de esquemas y redacción en LaTeX respectivamente.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Grado en Ingeniería Aeroespacial

Parte V

PRESUPUESTO

**PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO DEL PROCESO DE
FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE DE AERONAVES
INTEGRADO EN PLATAFORMAS PLM**

Samuel Molina Casino

Índice

| | |
|----------------------------------------------------------|------------|
| 1. Coste de mano de obra | 117 |
| 2. Coste de implementación de <i>software</i> PLM | 118 |
| 2.1. Inversión única | 119 |
| 2.2. Gastos anuales recurrentes | 120 |
| 2.3. Coste total de implementación | 121 |
| 3. Presupuesto global del proyecto | 121 |
| Referencias | 122 |

Índice de figuras

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1. Estación de trabajo PcCom Platinum RTX (PC Componentes, 2019). | 119 |
| 3.2. Distribución de costes (fuente: elaboración propia). | 121 |

Índice de tablas

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.4. Costes asociados al ingeniero (fuente: elaboración propia). | 117 |
| 1.5. Costes asociados al tutor (fuente: elaboración propia). | 117 |
| 1.6. Coste total de mano de obra (fuente: elaboración propia) | 118 |
| 2.7. Costes de <i>software</i> (ImmixonGroup, 2018). | 119 |
| 2.8. Costes de <i>hardware</i> (PC Componentes, 2019). | 119 |
| 2.9. Costes estimados del consultor PLM (fuente: elaboración propia) | 120 |
| 2.10. Costes estimados de formación (fuente: elaboración propia). | 120 |
| 2.11. Costes de mantenimiento y post-venta (ImmixonGroup, 2018). | 120 |
| 2.12. Costes de implementación de plataforma PLM (fuente: elaboración propia). . . | 121 |

1 Coste de mano de obra

La realización del trabajo ha conllevado el siguiente número de horas:

- Por el autor: 439 horas
 - Búsqueda bibliográfica: 70 horas
 - Formación: 144 horas
 - Realización del proyecto: 150 horas
 - Redacción del informe: 75 horas
- Por el tutor:
 - Orientación y revisión: 25 horas

Al autor se le atribuyen los costes propios de un ingeniero (Seguridad Social, 2019), al que le corresponden una base de cotización mínima de 1,466.40 € y una máxima de 4,070.10 €. Como valor conservador se va a tomar como base de cotización 2,500.00 €.

Para el cálculo del coste de mano de obra de un trabajador a tiempo completo se supondrá que las jornadas son de 8 horas y que se trabaja durante 11 meses, 5 días por semana, por lo tanto:

$$\text{Horas/año} = 8 \text{ horas/día} \cdot 5 \text{ días/semana} \cdot 4 \text{ semanas/mes} \cdot 11 \text{ meses/año} = 1760 \text{ horas/año}$$

El salario por hora del ingeniero será por lo tanto de 15.63 €/h. Teniendo esto en cuenta, el coste del ingeniero es:

| Ingeniero | | |
|--------------------------|-------|-------------------|
| Tarea | Horas | Coste |
| Búsqueda bibliográfica | 70 | 1,093.75 € |
| Formación | 144 | 2,250.00 € |
| Realización del proyecto | 150 | 2,343.75 € |
| Redacción del informe | 75 | 1,171.88 € |
| Total | | 6,859.38 € |

Tabla 1.4: Costes asociados al ingeniero (fuente: elaboración propia).

Suponiendo como salario del tutor la máxima base de cotización de un ingeniero, resulta de 25.44 €/h, con lo que se obtienen los siguientes costes:

| Tutor | | |
|------------------------|-------|-----------------|
| Tarea | Horas | Coste |
| Orientación y revisión | 25 | 635.95 € |
| Total | | 635.95 € |

Tabla 1.5: Costes asociados al tutor (fuente: elaboración propia).

Tras los cálculos realizados, se expone el coste debido a la mano de obra implicada en este Trabajo de Fin de Grado:

| Cargo | Coste |
|--------------|-------------------|
| Ingeniero | 6,859.38 € |
| Tutor | 635.95 € |
| Total | 7,553.14 € |

Tabla 1.6: Coste total de mano de obra (fuente: elaboración propia)

2 Coste de implementación de *software* PLM

El precio de una plataforma PLM depende de factores como el proveedor y de ciertas condiciones como el alcance de las aplicaciones, el número de usuarios o los objetivos comerciales de la adquisición.

El coste de una aplicación PLM se divide en 3 categorías (ImmixGroup, 2018):

- Inversión de capital única: contempla la obtención del *software* y *hardware* necesarios, oscila entre el 30 % y el 40 % del coste global. El valor real se ve influenciado por causas como el número y tipo de usuarios.
- Gastos generales únicos: implican aspectos que ayudan al comprador a optimizar el uso de la plataforma. Incluye, entre otros, capacitación de *software*, implementación o migración de datos. Supone aproximadamente el 50 % del precio total.
- Gastos recurrentes anuales: su función es asegurar el correcto funcionamiento del programa durante el mayor tiempo posible. Para ello se emplea mantenimiento continuo y soporte tras la venta. Representa cerca del 10 % del total.

Para realizar una estimación del presupuesto de implementación de la plataforma 3DExperience, se supodrá que no se tiene formación previa de la misma y que es necesaria la adquisición de las licencias de *software* y de un equipo informático con la tarjeta gráfica necesaria.

Teniendo en cuenta las tareas a desempeñar para la realización del proyecto que se plantea, será necesaria la adquisición de los distintos roles dentro de la plataforma:

- *Project manager* (PM): da acceso a ciertos módulos de CATIA, DELMIA y ENOVIA.
- *Design manager* (DM): da acceso a ciertos módulos de CATIA y ENOVIA.
- *Mechanical engineer* (ME): da acceso a ciertos módulos de CATIA y ENOVIA.
- *Manufacturing engineer* (MFE): da acceso a ciertos módulos de CATIA, DELMIA y ENOVIA.

Para esta sección se tiene en cuenta la adquisición de una licencia base perpetua con un mantenimiento anual. El coste de los roles depende de las funciones adquiridas con cada uno de ellos y son de pago único con un coste de mantenimiento por año del 18 % de su precio de compra.

La formación del usuario se considera presencial con un instructor y con apoyo de los cursos en línea de *Companion* y *Peer Learning*.

2.1 Inversión única

En esta sección se estimará el coste de pago único debido a *software*, *hardware* y la selección e implantación de estos.

2.1.1 Inversión de capital

En cuanto a *software*, se hace referencia a la compra de la licencia base perpetua y de los módulos dependientes de cada rol mencionado anteriormente.

| <i>Software</i> | Licencia base | Módulos funcionales | Coste total |
|-----------------|---------------|---------------------|--------------------|
| CATIA | 12,669.75 € | 6,769.84 € | 19,439.59 € |
| DELMIA | 7,177.44 € | 3,840.39 € | 11,017.83 € |
| ENOVIA | 3,015.85 € | 1,646.51 € | 4,662.36 € |
| Total | | | 35,119.78 € |

Tabla 2.7: Costes de *software* (ImmixGroup, 2018).

Respecto al *hardware*, se sugiere la compra de una estación de trabajo que incorpora una tarjeta gráfica suficientemente potente para el funcionamiento fluido de la plataforma.

| <i>Hardware</i> | Precio |
|----------------------------------------|------------------|
| Estación de trabajo PcCom Platinum RTX | 3330.09 € |

Tabla 2.8: Costes de *hardware* (PC Componentes, 2019).



Figura 2.1: Estación de trabajo PcCom Platinum RTX (PC Componentes, 2019).

2.1.2 Gastos generales

En los costes debidos a los gastos generales únicos se incluye el pago a un consultor PLM de Dassault Systèmes, encargado de la selección, optimización e implantación del *software* (Tabla 2.9).

| | Selección | Optimización | Implementación | |
|------------|------------|--------------|----------------|--------------------|
| Coste/hora | 35.00 €/h | 35.00 €/h | 50.00 €/h | |
| Horas | 100 | 100 | 150 | Total |
| Coste | 3,500.00 € | 3,500.00 € | 7,500.00 € | 14,500.00 € |

Tabla 2.9: Costes estimados del consultor PLM (fuente: elaboración propia)

En cuanto a la formación recibida, se estima el coste de los cursos realizados para conocer el funcionamiento de la plataforma y llevar a cabo las simulaciones (Tabla 2.10).

| | | Duración (h) | Coste/hora | Coste total |
|--------|-------------------------------------------|--------------|------------|-------------------|
| ENOVIA | <i>Project Execution Essentials</i> | 8 | 9.00 €/h | 72.00 € |
| | <i>Collaboration and Approvals</i> | 8 | 9.00 €/h | 72.00 € |
| | <i>Project Management Essentials</i> | 8 | 9.00 €/h | 72.00 € |
| CATIA | <i>Mechanical Design Fundamentals</i> | 32 | 12.00 €/h | 384.00 € |
| | <i>Part Design Fundamentals</i> | 16 | 12.00 €/h | 192.00 € |
| | <i>Part Design Expert</i> | 8 | 12.00 €/h | 96.00 € |
| | <i>Assembly Design Fundamentals</i> | 8 | 12.00 €/h | 96.00 € |
| | <i>Assembly Design Expert</i> | 16 | 12.00 €/h | 192.00 € |
| DELMIA | <i>Process Planning Essentials</i> | 8 | 12.00 €/h | 96.00 € |
| | <i>Plant Layout Design Essentials</i> | 8 | 12.00 €/h | 96.00 € |
| | <i>Time Motion Study Essentials</i> | 8 | 12.00 €/h | 96.00 € |
| | <i>Process Flow Simulation Essentials</i> | 8 | 12.00 €/h | 96.00 € |
| | | | Total | 1,656.00 € |

Tabla 2.10: Costes estimados de formación (fuente: elaboración propia).

2.2 Gastos anuales recurrentes

En esta sección se estiman los costes asociados al mantenimiento de la plataforma y los servicios post-venta (Tabla 2.11). Se tiene en cuenta que el coste anual de mantenimiento de cada módulo empleado es del 18 % del precio del mismo. Únicamente se calculará el presupuesto de un año, ya que es el periodo de tiempo que ha conllevado la realización del proyecto.

| <i>Software</i> | Mantenimiento base | Mantenimiento módulos | Coste total |
|-----------------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| CATIA | 2,267.64 € | 1,218.57 € | 3,486.21 € |
| DELMIA | 1,287.75 € | 691.27 € | 1,979.02 € |
| ENOVIA | 578.46 € | 296.37 € | 874.83 € |
| Total | | | 6,340.06 € |

Tabla 2.11: Costes de mantenimiento y post-venta (ImmixonGroup, 2018).

2.3 Coste total de implementación

Tras los cálculos realizados, el coste de implementación de la plataforma PLM para la realización del proyecto se muestra en la Tabla 2.12:

| Descripción | Coste total |
|-----------------|--------------------|
| <i>Software</i> | 35,119.78 € |
| <i>Hardware</i> | 3,330.09 € |
| Mantenimiento | 6,340.06 € |
| Consultor | 14,500.00 € |
| Formación | 1,656.00 € |
| Total | 60,945.93 € |

Tabla 2.12: Costes de implementación de plataforma PLM (fuente:elaboración propia).

3 Presupuesto global del proyecto

En la Figura 3.2 se muestra un diagrama de la distribución de los costes en el desarrollo del proyecto.

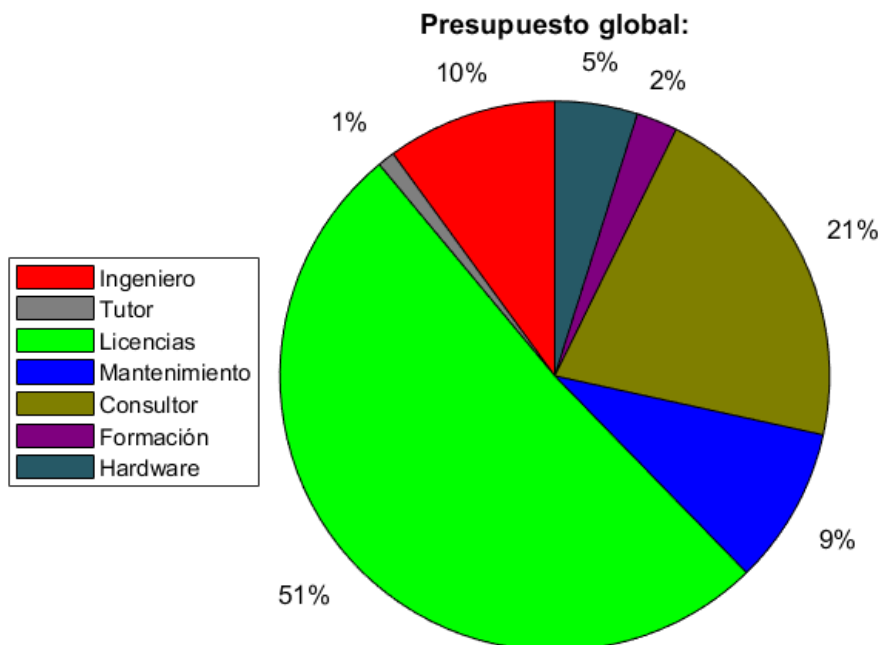


Figura 3.2: Distribución de costes (fuente: elaboración propia).

El presupuesto final del trabajo es de **68,499.07 €**.

Referencias

- (ImmixGroup, 2018) ImmixGroup (2018) *Products by contract* [Online]. Disponible en: https://www.immixgroup.com/uploadedFiles/Documents/Products_by_Contract/GS-35F-0265X_979.csv (Acceso: 4 Julio 2019).
- (PC Componentes, 2019) PC Componentes (2019) *PcCom Platinum RTX* [Online]. Disponible en: <https://www.pccomponentes.com/pccom-platinum-rtx-intel-core-i9-9900k-32gb-4tb-500gb-m2-rtx-2080ti> (Acceso: 4 Julio 2019).
- (Seguridad Social, 2019) Seguridad Social (2019) *Bases y tipos de cotización 2019* [Online]. Disponible en: <http://www.seg-social.es/wps/portal/wss/internet/Trabajadores/CotizacionRecaudacionTrabajadores/36537> (Acceso: 4 Julio 2019).

