

Trabajo Final de Grado

Ingeniería Aeroespacial

Planificación con 3DExperience del proceso de ensamblaje de las compuertas del tren de aterrizaje del Airbus A380

Autor: Guillermo Álvarez Murcia

Tutor: Domingo Morales Palma

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Final de Grado
Ingeniería Aeroespacial

Planificación con 3DExperience del proceso de ensamblaje de las compuertas del tren de aterrizaje del Airbus A380

Autor:

Guillermo Álvarez Murcia

Tutor:

Domingo Morales Palma

Profesor Contratado Doctor

Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Final de Grado: Planificación con 3DExperience del proceso de ensamblaje de las compuertas del tren de aterrizaje del Airbus A380

Autor: Guillermo Álvarez Murcia

Tutor: Domingo Morales Palma

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

*A mi familia y amigos, por creer
en mí*

A Rosa, por apoyarme siempre

Agradecimientos

Quisiera agradecer en este momento a todos los que han hecho posible, de forma directa o indirecta, la realización de este proyecto.

Para comenzar, quiero dar las gracias a mi tutor Domingo Morales Palma por su trato conmigo, su supervisión y guía, por confiar en mí y ofrecerme otra oportunidad, y ser una enorme ayuda a pesar de las circunstancias.

Quiero agradecer también a los miembros de mi familia, en especial a mis padres y hermana, por transmitirme su energía y animarme durante todo el transcurso de este proyecto, y por haber contribuido a ser como soy hoy en día.

Por último, quiero expresar mi más sincera gratitud a mis amigos, a Diego y a Mario, y a mi pareja Rosa, por su compañía y apoyo incuestionable en los momentos más difíciles.

Gracias a todos

Guillermo Álvarez Murcia

Sevilla, 2018

Resumen

El presente trabajo hace uso de una herramienta de planificación de procesos asistido por ordenador o CAPP (computer-aided process planning) de última generación, en concreto el *software* 3DExperience desarrollado por la empresa Dassault Systèmes, creadora de otros programas del mismo ámbito de conocido renombre, como CATIA o DELMIA. El objetivo de este proyecto es, por tanto, llevar a cabo un análisis de esta herramienta y emplearla en una aplicación práctica real, como puede ser el modelado del ensamblaje de componentes aeronáuticos.

Como aplicación práctica se ha elegido el ensamblaje de las compuertas del tren de aterrizaje de una aeronave emblemática a día de hoy, como es el A380. La elección de esta aplicación se debe a facilidades a la hora de realizar el apartado de diseño, y al hecho de tratarse de un producto cuyo número de elementales se sitúa a medio camino entre los ensamblajes más sencillos y los excesivamente complejos. De este modo, es posible abordar el problema sabiendo que existen diferentes alternativas para su montaje, y que no representa un proyecto de demasiada envergadura para ser acometido por una sola persona.

En cuanto a la metodología seguida, primero se lleva a cabo una evaluación inicial del producto, que junto a la definición del *Manufacturing Bill of Materials* (MBOM) permiten decidir la secuencia de ensamblaje final adoptada. Tras la definición del MBOM, se lleva a cabo un análisis de varios diseños de sistemas de producción, se determinan las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos y se escoge el que se considera óptimo para la aplicación elegida. Una vez determinados el proceso y el sistema, se realizan análisis posteriores sobre el propio sistema de producción, tales como el equilibrado de la carga de trabajo o la definición de los modelos de demanda o de jornadas laborales.

Los resultados obtenidos permiten concluir que, aunque se trata de una aplicación puntera, y por tanto presenta los problemas derivados de su carácter pionero, es un *software* con mucho potencial que puede ser un referente en el mercado en las actualizaciones futuras. No obstante, y a pesar de los obstáculos, ha sido posible realizar una construcción sólida del árbol principal, y llevar a cabo análisis valiosos para futuras aplicaciones. Se espera que este proyecto sirva como inspiración y punto de partida para investigaciones venideras, que profundicen en las posibilidades que la herramienta ofrece.

Abstract

The present work makes use of a computer-aided process planning tool or CAPP of last generation, specifically the 3DExperience software developed by the company Dassault Systèmes, creator of other well-known programs of the same field, such as CATIA or DELMIA. The objective of this project is, therefore, to carry out an analysis of this tool and use it in a real practical application, such as modeling the assembly of aeronautical components.

As practical application, it has been chosen the assembly of the landing gear gates of an emblematic aircraft nowadays, such as the A380. The choice of this application is due to facilities at the time of making the design section, and the fact that it is a product whose number of elementals is halfway between the simplest and the most complex assemblies. In this way, it is possible to approach the problem knowing that there are different alternatives for its assembly, and that it does not represent a project of too much scope to be undertaken by a single person.

Regarding the methodology followed, an initial evaluation of the product is carried out, which, together with the definition of the Manufacturing Bill of Materials (MBOM), allows deciding the sequence of final assembly adopted. After the definition of the MBOM, an analysis of several designs of production systems is performed, the advantages and disadvantages of each of them are determined and the one that is considered optimal for the chosen application is chosen. Once the process and the system have been determined, subsequent analyses are carried out on the production system itself, such as balancing the workload or defining the demand or shift models.

The results obtained allow us to conclude that, although it is a leading application, and therefore presents the problems derived from its pioneering nature, it is a software with lots of potential that can be leading in the market by future updates. However, and despite the obstacles, it has been possible to make a solid construction of the main tree, and carry out valuable analyses for future applications. It is hoped that this project will serve as an inspiration and starting point for future researches that will continue deeping in the tools offered by the program.

MOTIVACIÓN

Scientists discover the world that exists; engineers create the world that never was.

- Theodore von Karman -

El presente trabajo surge a raíz de un profundo interés personal en las tecnologías de diseño y fabricación asistidas por ordenador (CAD/CAM), sumado a la cada vez más creciente demanda de personal con conocimientos en dichos ámbitos en la industria, en concreto en la industria aeronáutica, siendo las tecnologías mencionadas un sector en auge en el panorama actual.

Las herramientas de diseño y fabricación con asistencia computerizada han permitido cambiar por completo la dinámica de trabajo en las plantas industriales de todo el mundo. Los nuevos métodos de diseño concurrentes permiten a varios profesionales revisar, verificar y modificar un mismo producto, en tiempo real y desde cualquier parte del globo, permitiendo una interacción colectiva nunca antes alcanzada. Por su parte, los mecanismos de simulación y planificación de la fabricación de dichos productos han conseguido prever con gran precisión diferentes escenarios productivos, permitiendo optimizar las configuraciones o *layouts* de las plantas industriales y evitando el impacto económico que de otro modo supondría la búsqueda de una distribución óptima de los recursos mediante prueba y error. Las herramientas de simulación permiten asimismo realizar tareas otrora complejas, como el balaceo de líneas de producción o la adecuación de la carga de trabajo entre operarios en la factoría.

En este trabajo se pretende del mismo modo apostar por la innovación y la tecnología más inmediata. Por este motivo se ha decidido optar por una herramienta puntera, desarrollada por un referente en el sector como es Dassault Systèmes. Las características del *software* en cuestión se presentarán en el capítulo de introducción.

OBJETIVOS

El trabajo que se presenta pretende ser una primera toma de contacto con un programa CAD/CAM de última generación, en concreto la plataforma 3DExperience. El *software* desarrollado por la compañía francesa ha revolucionado el sector de estas herramientas, con conceptos novedosos como la interacción en tiempo real entre miembros del grupo de trabajo, sistema de archivos alojados en la nube, permitiendo el acceso en cualquier parte a los ficheros de trabajo, o desarrollo de aplicaciones colaborativas expresas para revisar y mejorar los posibles errores o inconsistencias durante el desarrollo del producto y su fabricación.

Es este cambio de paradigma en el ámbito de las tecnologías CAD/CAM el que suscita el interés de este trabajo, teniendo como fin por tanto el ser un punto de partida para aquellos lectores interesados en adentrarse en plataformas de este estilo.

En concreto, el contenido del trabajo se centrará únicamente en las tecnologías enfocadas a la fabricación y la planificación de la producción (CAM). Con el fin de mostrar los conocimientos adquiridos se presenta un caso práctico que refleje las capacidades que la herramienta ofrece. A fin de dotar al proyecto de una temática aeronáutica, éste será la simulación del proceso de ensamblaje de los portones del tren de aterrizaje principal de un Airbus A380. El caso práctico comentado comprenderá tanto el estudio de la secuencia de montaje óptima como aspectos relacionados con el balanceo de la línea o la distribución de la carga de trabajo entre operarios, así como la determinación del número de trabajadores adecuado.

La elección de este caso práctico se debe por un lado al hecho de haber podido disponer de archivos CAD ya diseñados, permitiendo centrarse únicamente en el ámbito relacionado con la fabricación, y, por otro lado, por tratarse de un conjunto cuyo número de partes permite un montaje que, si bien no es excesivamente complejo, permite discutir diferentes alternativas en el proceso y la determinación de una secuencia óptima de ensamblaje.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xii
Motivación	xiii
Objetivos	xiv
Índice	xv
Índice de Figuras	xvi
1 Introducción	1
1.1 <i>Las herramientas CAD/CAM: Evolución histórica</i>	1
1.2 <i>3DExperience: Un nuevo salto en la concepción CAD/CAM</i>	3
2 Simulation Apps: Conceptos Generales	5
2.1 <i>Manufactured Item Definition</i>	6
2.2 <i>Process Planning</i>	12
2.3 <i>Planning Structure</i>	16
2.4 <i>Equipment Allocation</i>	16
2.5 <i>Assembly Evaluation</i>	21
2.6 <i>Plant Layout Design</i>	22
2.7 <i>Work Instructions</i>	26
3 Caso Práctico: Planificación del proceso de ensamblaje de un componente aeronáutico	29
3.1 <i>El producto: Compuertas del tren de aterrizaje del Airbus A380</i>	29
3.2 <i>Metodología de trabajo</i>	31
3.3 <i>Evaluación inicial del producto</i>	31
3.4 <i>Definición del MBOM</i>	33
3.5 <i>Evaluación del MBOM</i>	40
3.6 <i>Estudio previo del sistema de producción a implantar</i>	43
3.6.1 <i>Primer Caso: Sistema con una sola estación</i>	47
3.6.2 <i>Segundo Caso: Estaciones solo para el ensamblaje de grandes subconjuntos</i>	48
3.6.3 <i>Tercer Caso: Múltiples estaciones</i>	51
3.7 <i>Definición del sistema de producción</i>	54
3.8 <i>Simulación del proceso de ensamblaje</i>	57
3.9 <i>Análisis del sistema de producción</i>	61
4 Conclusiones y Trabajos Futuros	64
4.1 <i>Conclusiones</i>	64
4.2 <i>Opinión Personal</i>	67
4.2.1 <i>Acerca del software</i>	67
4.2.2 <i>Acerca de la metodología de trabajo</i>	68
4.2.3 <i>Acerca del modelado y simulación del MBOM</i>	68
4.2.4 <i>Acerca del modelado y simulación del sistema de producción</i>	69
4.3 <i>Trabajos Futuros</i>	69
Referencias	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Esquema principal de 3DExperience	3
Fig. 2. Vídeo explicativo para la creación de un MBOM	7
Fig. 3. Ejemplo de scope entre producto y procesos a distintos niveles	8
Fig. 4. Ejemplos de multimodelo (izquierda) y multilocalización (derecha)	8
Fig. 5. Creación de scope	9
Fig. 6. Reorganización de <i>manufacturing tiles</i>	10
Fig. 7. Empleo de B.I. Essentials con Product Assignment Status	11
Fig. 8. Código de colores de Product Assignment Status	11
Fig. 9. Esquema de metodología para crear un contexto PPSR	12
Fig. 10. Ejemplo de nodo de sistema	13
Fig. 11. Indicadores de scope	13
Fig. 12. Creación de <i>tiles</i> de sistema independientes	14
Fig. 13. Definición del <i>product flow</i>	15
Fig. 14. Tipos de operaciones implementados en el <i>software</i>	15
Fig. 15. Roles de la aplicación Planning Structure	16
Fig. 16. Tipos de recursos modelados por Equipment Allocation	17
Fig. 17. Ejemplo de inserción por catálogo paramétrico. Se hace uso de la librería de robots ACMA	18
Fig. 18. Ejemplo de scope en recursos	19
Fig. 19. Posicionamiento relativo del producto respecto al recurso (trabajador)	20
Fig. 20. Creación de caminos (<i>paths</i> o <i>tracks</i>) de las diferentes partes que componen un producto	21
Fig. 21. Catálogo en la herramienta (arriba), e inserción de recursos mediante catálogo paramétrico (abajo)	22
Fig. 22. Ejemplo de <i>footprint</i> para <i>layout</i> determinado	23
Fig. 23. Creación de <i>footprint</i> dentro del módulo	23
Fig. 24. Anotación para referencia en <i>footprint</i>	24
Fig. 25. <i>Snap</i> con respecto a un plano	24
Fig. 26. <i>Smart snap</i>	25
Fig. 27. Ejemplo de alineación de recursos	25
Fig. 28. Ejemplo de creación de patrón	26
Fig. 29. Ejemplo de secuencia de operaciones	26
Fig. 30. Ejemplo de creación de instrucción	27
Fig. 31. Secuencia de instrucciones completa para una operación	27
Fig. 32. Ejemplo de advertencia modificada	28
Fig. 33. Creación de instrucciones 3D	28
Fig. 34. Conjunto de tren y compuertas	30

Fig. 35. A380 completo (referencia)	30
Fig. 36. Ejemplo de creación de <i>tracks</i>	32
Fig. 37. Estructura básica del MBOM. Nótese los 5 scopes definidos como se ha indicado anteriormente	34
Fig. 38. Indicaciones visuales para <i>scopes</i> en árbol	34
Fig. 39. Detalle de <i>manufacturing tile</i> final. Se puede apreciar la escala del producto con respecto al <i>tile</i> , provocando la apariencia de estar vacío éste último	35
Fig. 40. Asignación de partes a tiles mediante B.I. Essentials	36
Fig. 41. MBOM antes de la eliminación de <i>scope</i>	37
Fig. 42. Eliminación de <i>scope</i>	37
Fig. 43. Asignación tras eliminación de <i>scope</i>	38
Fig. 44. MBOM final. Nótese la ausencia de <i>scope</i> en la puerta auxiliar	39
Fig. 45. Estructura del MBOM dentro del catálogo	39
Fig. 46. Conjunto de <i>tracks</i> para ensamblaje completo	40
Fig. 47. Proceso de exportación de <i>tracks</i>	41
Fig. 48. <i>Tracks</i> importadas en la nueva simulación	41
Fig. 49. Relación entre volumen de producción y variedad de productos en instalaciones de fabricación	43
Fig. 50. Tipos de <i>layout</i> según los parámetros	44
Fig. 51. Ejemplo de FAL. Instalaciones de Everett, Washington, durante el ensamblaje del Boeing B78745	
Fig. 52. Instalaciones de Broughton (Gales) en las que se produce la integración del grupo alar del A350XWB	46
Fig. 53. Operaciones en un único <i>tile</i> de sistema	47
Fig. 54. Definición de <i>scope</i> para el segundo caso	48
Fig. 55. Estructura principal de <i>tiles</i> para el segundo caso	49
Fig. 56. Sistema completo para varios <i>tiles</i>	50
Fig. 57. Segundo sistema con <i>tiles</i> expandidos	50
Fig. 58. Estructura básica del sistema para el tercer caso	51
Fig. 59. Sistema con grupos principales contraídos (arriba) y extendidos (abajo)	52
Fig. 60. Sistema tras la asignación de elementos de MBOM	53
Fig. 61. Diagrama de Gantt del sistema, tras la definición de las relaciones	54
Fig. 62. Diagrama de Gantt finalizado	54
Fig. 63. Uso de B.I. Essentials como herramienta de comprobación. Los <i>tiles</i> en verde indican que todo está correctamente realizado	55
Fig. 64. Cómputo del resultado de ensamblaje. Como puede verse, la correspondencia con el diseño es total	56
Fig. 65. Ensamblaje: Largueros horizontales totalmente colocados. Como puede verse, en subconjuntos de menor número de partes ya se ha avanzado en el montaje de los largueros verticales	58
Fig. 66. Ensamblaje: Largueros verticales totalmente colocados. De nuevo existen subproductos con mayor grado de avance	58
Fig. 67. Ensamblaje: Mecanismos de anclaje (<i>goosenecks</i>) en posición	59
Fig. 68. Ensamblaje: Mecanismos de unión y protección (bisagras y topes) en posición. Subconjuntos finalizados (nótese la omisión de montaje de las bisagras que forman parte de la puerta auxiliar)	59

Fig. 69. Ensamblaje: Puertas exterior y auxiliar ensambladas. Posicionado de las mismas y montaje de las bisagras antes omitidas. Montaje del cilindro actuador	60
Fig. 70. Ensamblaje: Puerta central posicionada. Producto final terminado. Fin del proceso de ensamblaje	60
Fig. 71. Modelo de demanda para conjunto principal	61
Fig. 72. Definición del <i>shift model</i>	62
Fig. 73. Carga de trabajo en diferentes estaciones	63
Fig. 74. Uso de la función de equilibrado para el primer caso	63

1 INTRODUCCIÓN

Coming together is a beginning; keeping together is progress; working together is success.

- Henry Ford -

El presente capítulo introduce los conceptos generales de las herramientas CAD/CAM. Con el fin de introducir un breve estado del arte, se incorpora también un breve recorrido cronológico en el desarrollo de dichas tecnologías, haciendo especial mención al *software* con el cual se ha llevado a cabo este trabajo y el cambio de paradigma que éste ha supuesto en la concepción clásica de diseño y fabricación computerizados.

1.1 Las herramientas CAD/CAM: Evolución histórica

Los fabricantes del sector del diseño asistido por computadora (CAD) siempre han sido punteros en aprovechar la tecnología informática más avanzada. El diseño con modelos 3D, las técnicas de diseño vectorial, la medición automatizada, el trabajo directo con objetos, la organización en capas de los proyectos o la ampliación de los programas con extensiones especializadas, tienen su origen en aplicaciones de CAD, aunque actualmente se pueden encontrar en otros tipos de programas.

Los avances en el sector informático siempre han estado muy relacionados con el desarrollo y evolución de las aplicaciones CAD. El génesis de los programas de diseño asistido por computadora se sitúa al final del periodo de los ordenadores de primera generación, pero adquiere su completo desarrollo a partir de la aparición de los ordenadores de cuarta generación, en que nacen los circuitos de alta escala de integración (LSI) y ya están desarrollados en su totalidad los lenguajes de alto nivel.

No puede entenderse la aparición de las herramientas CAD sin hablar primeramente del sistema *Sketchpad*. Desarrollado en 1962 por el integrante del MIT Ivan Sutherland, supuso el establecimiento de las bases de lo que hoy se entiende por gráficos interactivos por ordenador. Sutherland, quien propuso por primera vez emplear teclado y lápices ópticos para posicionar y dibujar conjuntamente una imagen en la pantalla, revolucionó la estructura en la que se presentaban los datos. Nació así la programación orientada a objetos, en la cual se describía con exactitud las relaciones entre las partes constituyentes del objeto, es decir, se basaba la programación en la propia topología del objeto a representar.

Paralelamente al proyecto *Sketchpad* se desarrollan en ITEK y General Motors aplicaciones similares. El de ITEK, *The Electronic Drafting Machine*, supone la base para la aparición del primer sistema CAD, en 1965. En ese mismo año se realiza el primer estudio de investigación con un CAD, en el cual se realiza la intersección de dos cilindros, a cargo de A.R. Forrest.

En 1969, Computervision realiza el primer plotter, y en 1970 grandes empresas de los sectores aeroespacial y automovilístico (General Motors, Lockheed, Ford, Chrysler) empiezan a usar sistemas CAD. En 1975 nace el primer sistema CAD/CAM de la mano de AMD, siendo Lockheed la primera empresa en adquirirlo.

La aparición de diversas empresas dedicadas a la creación de plataformas CAD supone un descenso en los precios de estas herramientas en un 75%, posibilitando abrir enormemente el rango de consumidores de esta tecnología, que aún sigue muy lejos del usuario particular.

En 1979, Boeing, General Electric y NIST desarrollan un formato neutral de intercambio de datos (IGES), y en 1980 nace Investrónica, empresa española con desarrollos CAD/CAM orientados al sector textil.

En 1981 se crea Dassault Systèmes, compañía tractora a día de hoy de herramientas CAD/CAM y ampliamente utilizada en el sector aeronáutico, concretamente con su *software* CATIA. Por otra parte, Unigraphics presenta Unisolid, el primer sistema de modelado sólido.

En los años 80, Jhon Walker y otros 12 colaboradores fundan AutoCAD, con objetivo de lograr un programa CAD para PC con un coste inferior a 1000 \$. En noviembre de 1982 se presenta el primer AutoCAD.

En la década de 1990, McDonnell Douglas elige Unigraphics para su empresa. En 1992 nace el primer AutoCAD para Sun, y en 1995 salta a la primera versión de Microsoft Windows. En ese mismo año se produce el salto a Windows de Unigraphics, suponiendo la firma del mayor contrato de la historia CAD/CAM entre dicha empresa y General Motors en 1996. En este panorama, el mercado CAD/CAM está copado por unas pocas empresas, lideradas por Parametric Technology y Dassault Systèmes, con Autodesk en un quinto lugar.

El nuevo siglo, vería la aparición de nuevos programas, como ArchiCAD orientado a un diseño por objetos paramétricos construidos en un medio integrado 2D/3D, de clara orientación a la arquitectura; o Sketchup, que revoluciona el concepto de CAD al incorporar la idea de la construcción intuitiva mediante líneas de los objetos, muy cerca del dibujo manual tradicional, pero con la aportación de una construcción tridimensional asociada. Asimismo, la aparición de mejores modeladores tridimensionales y de programas y plug-ins para la tarea de renderizado capaces de montarse sobre diversas plataformas de software ha construido un mercado variado e interconectado donde las soluciones propietarias únicas cada vez resultan menos flexibles y adaptables.

Los últimos años han visto la aparición del concepto BIM (Building Integrated Model), un modelo de intercambio e interoperatividad entre los programas de diseño asistido por computadora de tipo general (AutoCAD, ArchiCAD, Sketchup) y programas específicos de las especialidades.

El software CAD está en continua evolución, adaptándose cada vez más a los nuevos tiempos. El uso de las tres dimensiones es cada vez más frecuente, y por ello ese es un aspecto que se mejora en cada versión de los programas, ganando en estabilidad, velocidad y prestaciones.

1.2 3DExperience: Un nuevo salto en la concepción CAD/CAM

La evolución comentada hasta ahora de los *softwares* CAD/CAM pasa por una mejora continua en los entornos de creación, herramientas más potentes de renderizado que permitan realizar tareas más complejas y simulaciones más precisas, comandos cada vez más intuitivos con el fin de acelerar el proceso de aprendizaje y la adquisición de familiaridad con el programa, y mecanismos de detección de fallos o inconsistencias que eviten visitar proyectos debido a fallos humanos. En ese sentido, puede decirse que la línea de evolución seguida desde los inicios de estas herramientas está centrada en las mejoras del propio *software*. Dassault Systèmes, como empresa referente en este contexto, adoptó estas mismas líneas de desarrollo en su momento, con la creación de aplicaciones CAD empleadas aún hoy en grandes empresas del sector aeronáutico como Airbus. Se hace referencia a la plataforma CATIA, cuyas versiones v5 y v6 son de amplio uso tanto en el ya citado mundo aeronáutico como en mercados industriales de otra índole, tales como el automovilístico. La herramienta CATIA presenta en sus versiones más nuevas diversos módulos orientados a CAM, haciendo especial hincapié en la simulación de los procesos de torneado y mecanizado con fresadoras, mediante las extensiones de *lathe machining* o *prismatic machining*, respectivamente. A la creación de CATIA ha de sumarse la aparición de otras aplicaciones específicamente diseñadas para la simulación, como SIMULIA, o los procesos de fabricación, como DELMIA. Ya durante esta etapa Dassault apuesta por innovaciones tales como los estudios de ergonomía en las plantas de producción, dentro de DELMIA, o la creación de las llamadas “aplicaciones colaborativas”, como ENOVIA, que tienen como objetivo interconectar los departamentos de diseño, fabricación y planificación, acercando los diversos roles de los empleados de las empresas y dando un paso hacia adelante en la consecución de una ingeniería cada vez más concurrente.

Los pasos dados por la compañía francesa hacia una sola interfaz capaz de conectar todos los departamentos de una empresa, desde marketing y ventas hasta diseño e ingeniería culminan en el año 2012 con la creación de lo que la propia compañía califica como “Una plataforma profesional de experiencias, que permite crear experiencias de consumidor excepcionales como parte de su proceso de valor [...]. Basada en el *software* de diseño en 3D, análisis, simulación e inteligencia en un entorno interactivo de colaboración, está disponible en las instalaciones y en un entorno de nube pública o privada”. Esta herramienta recibe el nombre de 3DExperience, y como se ha descrito permite la interacción entre departamentos de un modo nunca antes visto, gracias a una interfaz unificada y al almacenamiento de contenido en la nube. La plataforma está integrada por cuatro subgrupos diferenciados, y mostrados en la Fig. 1

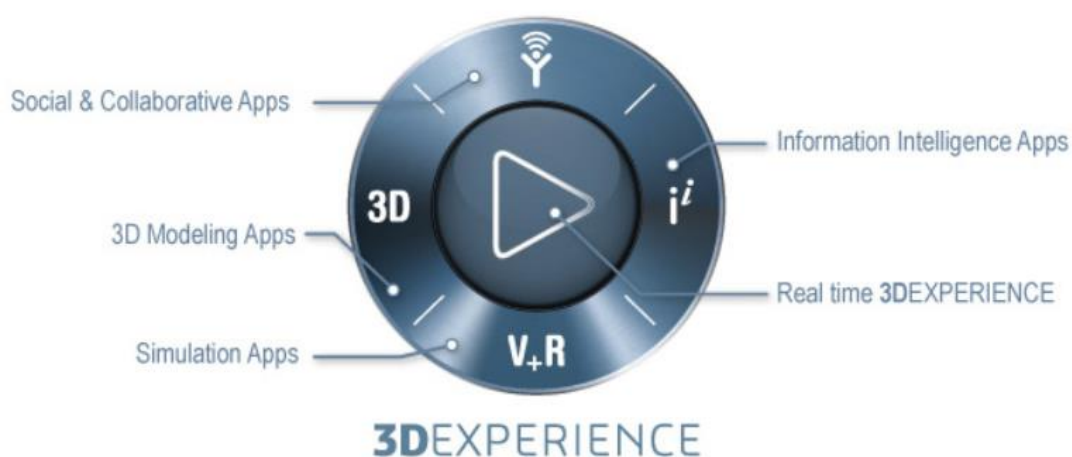


Fig. 1. Esquema principal de 3DExperience

Podría decirse que cada uno de los subgrupos se corresponde con las antiguas aplicaciones de Dassault, teniendo los módulos propios de la antigua CATIA en las 3D Modeling Apps, los correspondientes a DELMIA y SIMULIA en las Simulation Apps, o las características propias de ENOVIA en la pestaña de Social & Collaborative Apps. A estas funciones se han añadido otras como las Information Intelligence Apps, o la posibilidad de reproducir el entorno en tiempo real en todo momento con el Real Time 3DExperience.

La plataforma 3DExperience ofrece tal cantidad de contenido, con una infinidad de módulos dedicados a actividades de toda índole, que sería imposible pretender abarcarla al completo en este trabajo, quedando fuera del alcance del mismo. Puesto que, como se ha comentado, se hará énfasis en realizar una aplicación práctica propia del entorno CAM, se ha optado por emplearse varios de los módulos contenidos en las aplicaciones de simulación, todos ellos correspondientes a antiguas funciones de DELMIA. El aprendizaje del correcto uso y aprovechamiento de estos módulos se ha hecho a través de tutoriales interactivos puestos a disposición del estudiante por la propia Dassault. Cabe mencionarse del mismo modo la cesión al estudiante del uso de la nube privada de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), a su vez aprobada por la susodicha empresa, para la realización de este proyecto.

La próxima sección tiene como objetivo familiarizar al lector con la herramienta descrita. Para ello, se describen en primer lugar el entorno y los rasgos principales de las herramientas o módulos de CAM (Simulation Apps). Los módulos en cuestión serán detallados seguidamente: Se presentarán sus características, sus objetivos y capacidades, así como su uso final en la aplicación práctica.

2 SIMULATION APPS: CONCEPTOS GENERALES

Progress cannot be generated when we are satisfied with existing situations.

- Taiichi Ohno -

Ya desde las versiones anteriores de los programas creados por Dassault, esto es, las versiones de DELMIA o los módulos de CAM de CATIA, la estructura con la cual se presentan los datos del proyecto sigue lo que se denomina un entorno PPR. Esta forma de organizar la información consiste en un árbol con tres nodos bien diferenciados: Producto (*Product*), Proceso (*Process*), y Recursos (*Resources*). Son estos nodos los que justifican la denominación PPR. Por tanto, cada uno de los nodos recoge información relevante en el proyecto acometido en relación a su especificación: El nodo de producto recopila las diferentes partes que componen el producto, su geometría y las restricciones (*constraints*) que existen entre ellas y que definen el producto tal como es. En ese sentido, el nodo de producto almacena la información creada previamente por las herramientas CAD, ya sea CATIA o las 3D Modeling Apps en el caso de 3DEXperience. El nodo de proceso, por su parte, aglutina los distintos procedimientos que permiten llegar al producto en cuestión a partir de materias primas o de otros subproductos. En este nodo se almacenan los procesos de fabricación: mecanizado, taladrados, ensamblajes, remachados, eliminación de material, conformados, etc. Por último, el nodo de recursos agrupa todos los recursos que están presentes a la hora de fabricar el producto mediante las operaciones descritas en el proceso. Ejemplos de recursos son las herramientas de fabricación empleadas, el utillaje, los conveyors, los trabajadores, o los lugares físicos donde se almacenan piezas y herramientas. En este nodo se incluyen los diferentes tipos de recursos: *working*, *non-working* y *organizational*. Una explicación más detallada de los tipos de recursos se dará posteriormente.

Con la aparición del *software* 3DEXperience se produce un pequeño cambio en esta estructura, añadiéndose un nuevo nodo al árbol, y creando por tanto un nuevo entorno, llamado PPSR. El nodo en cuestión recibe el nombre de Sistema (*System*), y tal y como su nombre sugiere, permite partir de los procedimientos definidos en el nodo de proceso y crear el sistema de fabricación, agrupando operaciones en grupos o estaciones, y estableciendo una secuencia lógica en el flujo productivo, a fin de facilitar la posterior colocación de los recursos en el *layout* de la factoría.

Debido a la gran cantidad de tiempo que requeriría realizar un árbol PPSR completo para un proyecto de mediana envergadura, como es el seleccionado, se ha optado con el fin de limitar el alcance de este trabajo por omitir el estudio del nodo de recursos y dedicar la aplicación práctica a la creación de los primeros tres nodos, PPS. No obstante, con el fin de obtener una formación completa en los conocimientos CAM que 3DEXperience ofrece, y gracias a los tutoriales facilitados por la propia compañía, se ha querido seguir un proceso de aprendizaje de siete módulos diferentes, cubriendo los cuatro nodos ya citados. Estos módulos se listan y detallan a continuación:

- DELMIA Manufactured Item Definition
- DELMIA Process Planning
- DELMIA Planning Structure
- DELMIA Equipment Allocation
- DELMIA Assembly Evaluation
- DELMIA Plant Layout Design
- DELMIA Work Instructions

Debido a que todos los módulos se encuadran en el entorno de DELMIA, a partir de ahora y por brevedad se omite la referencia a dicho entorno.

2.1 Manufactured Item Definition

Con el fin de explicar en detalle las funciones del módulo Manufactured Item Definition, es necesario en primer lugar aclarar conceptos previos para el lector no familiarizado con el método seguido durante un proceso productivo empleando CAD/CAM.

Se denomina lista de materiales (BOM, *Bill of Materials*), a una lista de materias primas, ensamblajes intermedios, subcomponentes, partes diferentes y las cantidades precisas de cada uno de los ítems para crear un producto final. Un BOM puede definir los productos *as designed* (EBOM, *Engineering Bill of Materials*), *as planned* (SBOM, *Sales Bill of Materials*), *as built* (MBOM, *Manufacturing Bill of Materials*), o *as maintained* (SBOM, *Service Bill of Materials*). Los distintos tipos de BOM dependen de las necesidades de la empresa y del uso para el cual están concebidas. Es frecuente también el uso de “pseudo-BOM” para referirse a versiones más flexibles o simplificadas de un BOM.

Una vez aclarados los conceptos, se puede definir el objetivo principal del módulo que se está detallando como la creación de un MBOM a partir del EBOM presente en el nodo de producto. Por tanto, este módulo permite crear la estructura completa de ensamblaje de un producto. Su uso en la aplicación práctica es inmediato: Se emplea con el fin de crear la citada estructura, esto es, definir el nodo de proceso.

Para comprender el funcionamiento de dicho módulo se ha completado el tutorial “DELMIA Manufactured Item Definition Essentials”. En él, se hace en primer lugar una introducción a los conceptos de BOM, de un modo similar a la realizada en este documento, y a continuación, tras una breve exposición de la interfaz de usuario (UI) y los diferentes comandos que la componen, el alumno crea a modo de ejercicio un MBOM de un producto puesto a disposición por el curso, en este caso un motor de combustión interna. El ejercicio es guiado en todo momento mediante un vídeo explicativo y una serie de transparencias con las instrucciones paso a paso para lograr la creación completa del MBOM.

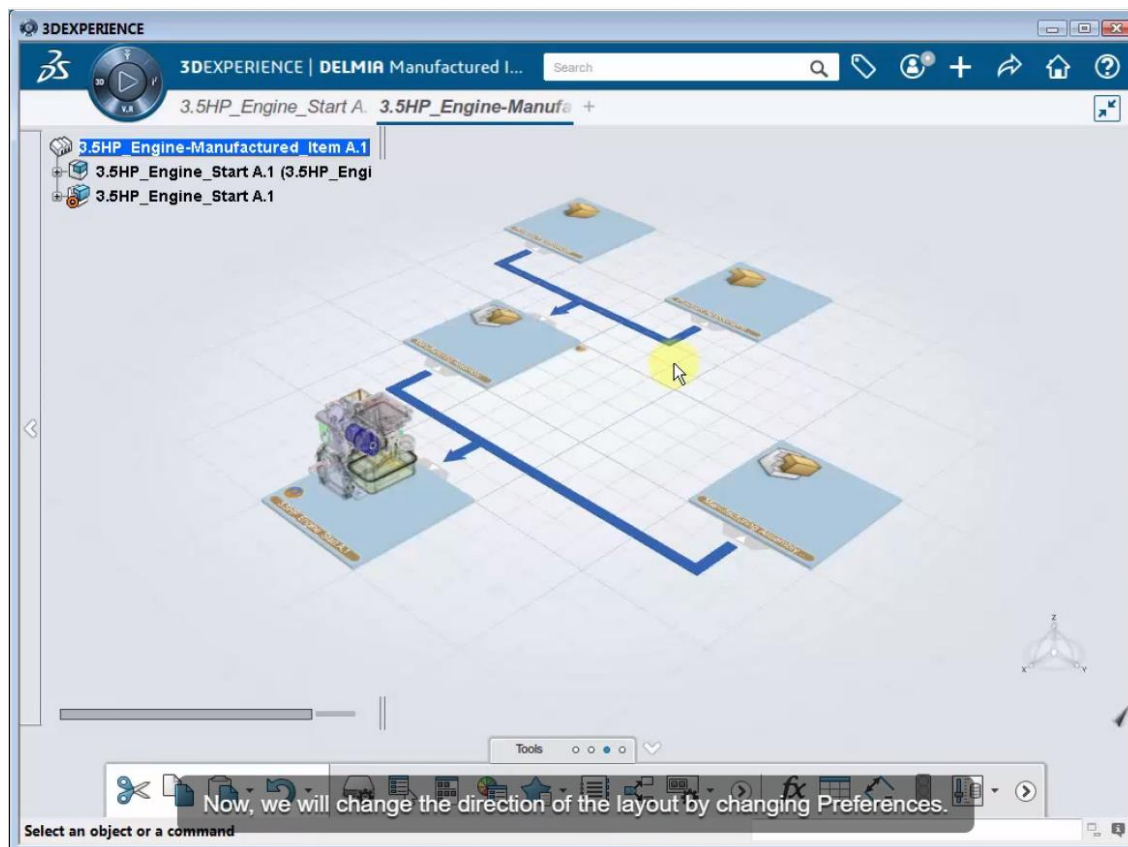


Fig. 2. Vídeo explicativo para la creación de un MBOM

Como puede observarse en la Fig. 2, los tutoriales exploran también las diferentes opciones ofrecidas por la herramienta modificando las preferencias de la aplicación, las diferentes opciones de visualización o de comportamiento del módulo a tratar. La estructura seguida por los tutoriales de los diferentes módulos es similar, existiendo ejercicios análogos y del mismo modo vídeos explicativos para cada uno de ellos.

Se procede seguidamente a explicar con brevedad el *modus operandi* que se ha seguido en la aplicación, partiendo de un nuevo proyecto, hasta lograr un MBOM completamente determinado.

En primer lugar, es necesario abrir los archivos de diseño suministrados por el tutorial los cuales son el punto de referencia para comenzar a elaborar el MBOM. En relación a esto último, se comenta que la extensión empleada a la hora de trabajar con la plataforma es .3dxml, y que ésta almacena toda la información pertinente para cada una de las aplicaciones. Es decir, un mismo archivo .3dxml guarda información de los nodos de diseño, proceso, sistema o recursos, así como otros aspectos de interés, tales como datos de simulación o análisis diversos del producto. No obstante, también es posible importar los ficheros de versiones anteriores de CATIA e incorporarlos a la nube de trabajo, quedando convertidos a extensiones .3dxml en caso de querer exportarlos de forma local.

Una vez abierto el producto en su versión CAD, siguiendo los comandos estándar de apertura de archivos de cualquier *software* similar, y habiendo seleccionado el entorno correcto (esto es, situarse dentro de la aplicación Manufactured Item Definition), la herramienta precisa, antes de comenzar a trabajar en la secuencia de fabricación propiamente dicha, de un vínculo que relacione los nodos de producto y proceso. Esta “ligadura”, denominada en el lenguaje de la plataforma *scope*, es imprescindible para que el programa reconozca la lógica que existe tras la secuencia que va a desarrollarse posteriormente, y permitir asignar con facilidad las partes físicas que componen el producto a los diferentes procesos que conforman el ensamblaje final. Cabe destacar que dichos *scope* pueden realizarse a distintos niveles, esto es, entre el producto completo y el ensamblaje final, o entre subcomponentes del producto y subgrupos dentro del proceso completo. Se pretende clarificar lo expuesto con la Fig. 3

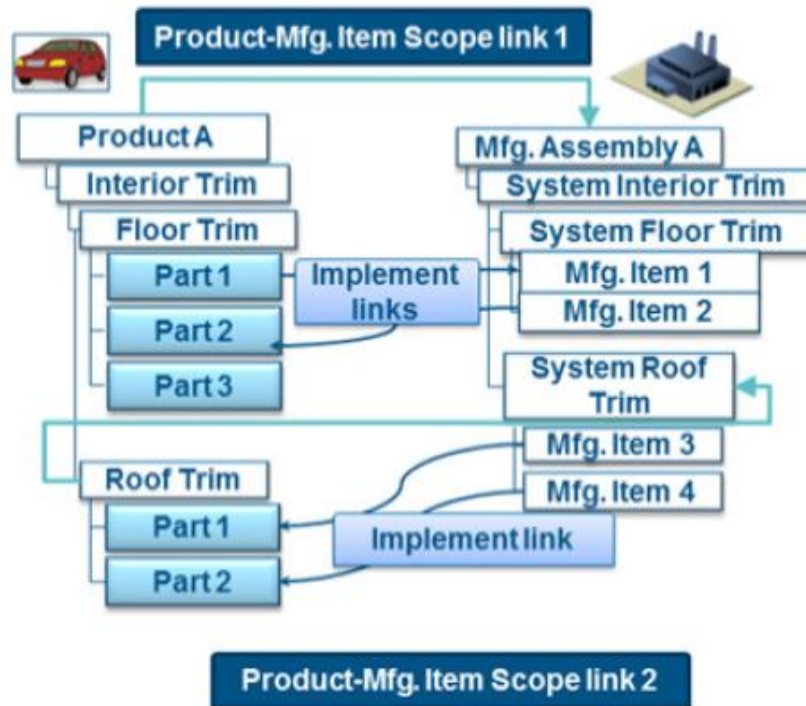


Fig. 3. Ejemplo de scope entre producto y procesos a distintos niveles

También es posible realizar los citados *scopes* para producción multimodelo y multilocalización. Esto es, permite simular una línea de producción en la cual se da el ensamblaje de más de un producto diferente, o una línea de producción que ensambla un mismo producto en localizaciones (factorías) distintas

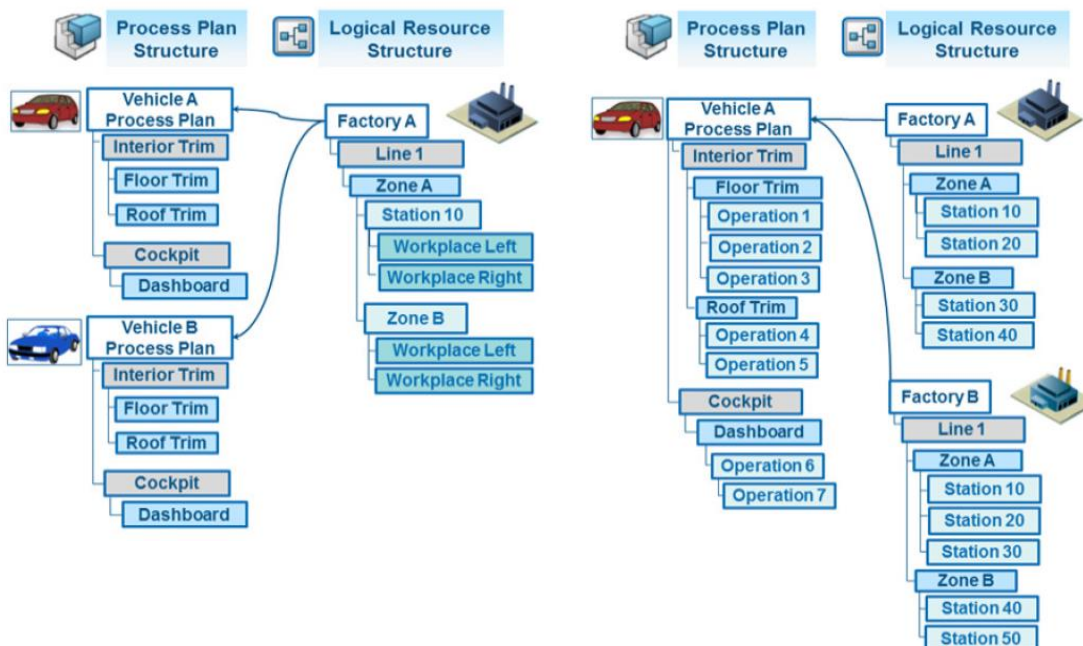


Fig. 4. Ejemplos de multimodelo (izquierda) y multilocalización (derecha)

La creación del *scope* en la herramienta es inmediata, sin más que hacer uso del comando apropiado. Por claridad, se recoge dicho proceso en la Fig. 5

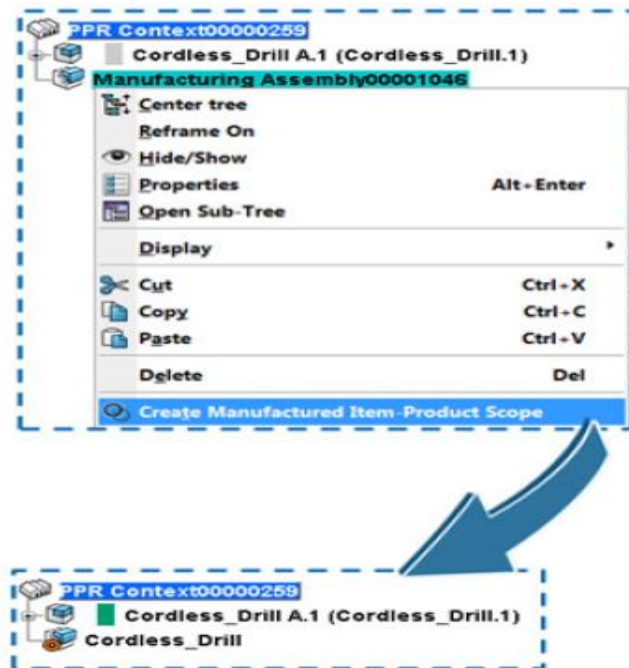


Fig. 5. Creación de scope

Como se puede comprobar, tras la creación de un *scope*, un marcador visual aparece junto al nodo de proceso, que permite al usuario comprobar al instante que la asignación se ha realizado correctamente.

Una vez completado este paso preliminar, puede darse comienzo a la creación de la secuencia de ensamblaje propiamente dicha. En la aplicación empleada, se sigue un método de fin a principio, esto es, se parte del producto final completamente ensamblado, y se dan pasos en dirección inversa hasta lograr llegar a los componentes primigenios. De este modo se logra obtener el proceso completo de montaje.

En el entorno del programa, los distintos pasos que se dan durante el ensamblaje se representan visualmente como casillas o *tiles*, que van añadiéndose partiendo de la que contiene el producto final, y que reciben el nombre de *tiles* predecesores. La inserción de estas casillas es inmediata, haciendo uso del comando oportuno. Tras crear las casillas que sean necesarias, la relación de precesión o sucesión entre ellas, así como su paralelismo o las restricciones que pueda haber entre ellas son modificables en cualquier momento sin más que seleccionarlas y arrastrarlas (mecanismo *drag & drop*) a la posición deseada. Es, por tanto, una forma muy intuitiva de organizar la información del proceso de ensamblaje.

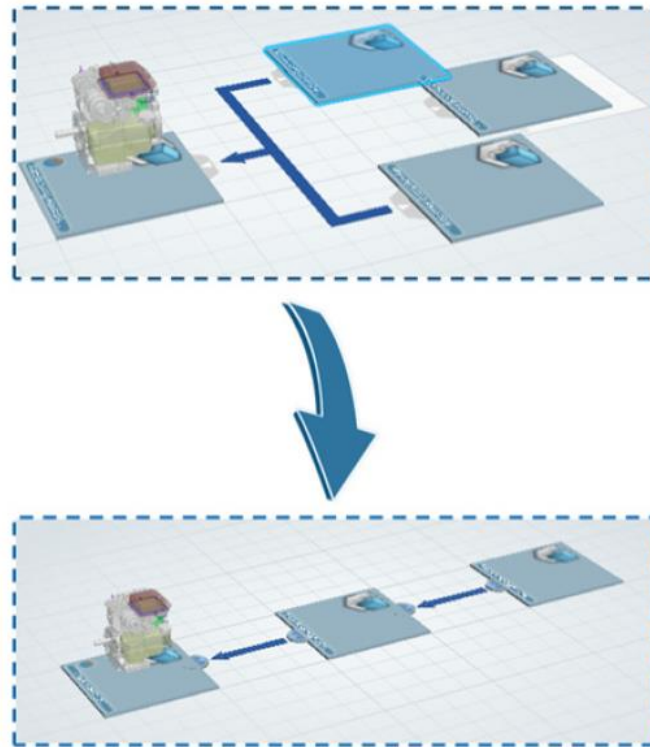


Fig. 6. Reorganización de *manufacturing tiles*

Como puede verse en la Fig. 6, los diferentes *tiles* que se crean a partir del que contiene al producto final están vacíos, y la casilla vinculada al producto lo presenta con transparencia. Esto es así porque aún no ha sido asignada la relación entre las partes del producto y los *tiles*, esto es, qué parte o partes del producto final se ensamblan en qué casilla del proceso completo. Una vez se asignan estas relaciones, las partes asignadas van convirtiéndose en sólidas en la última casilla, de modo que cuando la asignación se completa, el producto se presenta totalmente opaco.

Nuevamente, la herramienta opta por un método intuitivo y sencillo a la hora de realizar las asignaciones citadas. No hay más que seleccionar y arrastrar las partes, presentes en el árbol PPR, hacia las casillas deseadas, y se producirá la asignación. Existen otros métodos para realizar las asignaciones, haciendo uso del *Assignment Manager* o del *Smart Zoom*, si bien el *drag & drop* es la opción más rápida y cómoda. Al igual que sucedía en el caso de los *scope*, el *software* cuenta con indicios visuales para informar al usuario de que los vínculos se han creado correctamente. En este caso, esta información puede verse mediante el comando *B.I. Essentials*. Este comando es capaz de mostrar una gran cantidad de información de interés para el usuario. Para la comprobación comentada anteriormente, se selecciona la opción *Product Assignment Status*. Esta opción muestra, junto al nombre de cada una de las partes, un código de colores que permite conocer de forma rápida el estado de asignación de las partes. Se muestra a continuación una figura explicativa (Fig. 7)

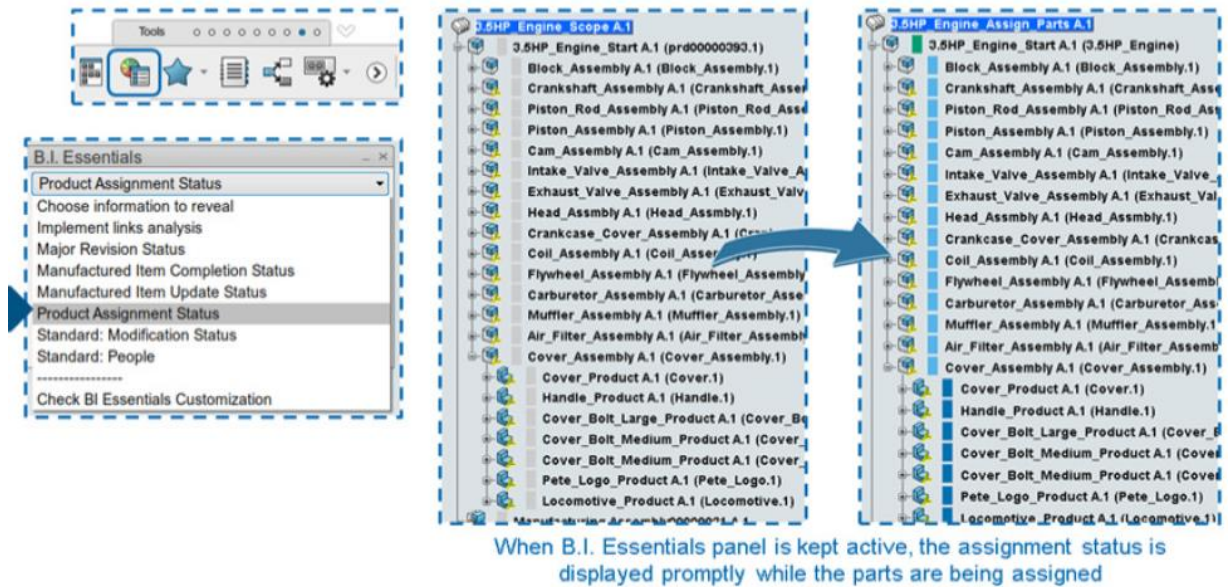


Fig. 7. Empleo de B.I. Essentials con Product Assignment Status

El código de colores seguido por esta herramienta puede verse en la Fig. 8








Color	Status	Description
	Associated with scope	The product has a scope link to an MBOM object.
	Not assigned	The product is not yet assigned, but can be assigned when taking into account assignment rules and scopes.
	Assigned indirectly	The product that is not assigned, but its parent is assigned to an MBOM object.
	Assigned directly	The product is directly consumed by an MBOM object.
	Assigned more than once	The product is assigned to at least two MBOM objects. This is possible, for example, if the product is assigned to MBOM objects that have different applications.
	Non-assignable	The product cannot be assigned. Considering the scopes, some products cannot be assigned because this would lead to the violation of assignment or scope rules.
	Assigned on predecessors (Smart Zoom)	A product that is assigned to a predecessor. In Smart Zoom mode, the 3D display of the product is colored yellow.

Fig. 8. Código de colores de Product Assignment Status

Una vez asignadas cada parte a las casillas de fabricación correspondiente, el MBOM está completo, con lo cual puede pasarse a analizar el siguiente nodo del árbol mediante otro módulo diferente.

Concluyendo este primer módulo, se destaca la posibilidad que ofrece la herramienta de crear grupos dentro de las casillas de montaje. Esto permite aglutinar líneas de producción con un gran número de etapas y evitar así mostrar demasiada información en pantalla, que podría ser confuso. Además, también es posible crear catálogos con líneas predefinidas o *templates* con el fin de agilizar la creación de nuevos MBOM mediante la reutilización de los conceptos adquiridos en proyectos previos, apostando claramente por la idea *know how*. Ambas posibilidades serán exploradas en la realización de la aplicación práctica de este proyecto.

2.2 Process Planning

Como ya se ha comentado, el segundo de los módulos que se presentan es la continuación lógica en la línea de trabajo, una vez realizado el MBOM. Este módulo, bajo el nombre de Process Planning, permite crear los sistemas de fabricación, gestionar estos sistemas y su estructura, y equilibrar la cantidad de productos fabricados y operaciones entre los sistemas. En esencia, es un módulo capaz de dar forma al nodo de sistema, introducido en el nuevo árbol PPSR.



Fig. 9. Esquema de metodología para crear un contexto PPSR

Durante la planificación del proceso (process planning), se definen las rutas y las operaciones haciendo uso del MBOM previamente creado. Se describe la secuencia de operaciones, y se asocia el tiempo y recursos disponibles para cada una de ellas, distribuyéndose a lo largo de la línea productiva.

El concepto de sistema surge como un paso intermedio para definir las operaciones que forman parte de la producción con independencia del *layout* que sea adoptado posteriormente. Esto permite generar una secuencia de operaciones de forma global, delegándolas después localmente a cada factoría que produzca el mismo producto con distinto emplazamiento de los recursos, diferentes líneas de ensamblaje basadas en las mismas operaciones, o algún tipo de operación más específica.

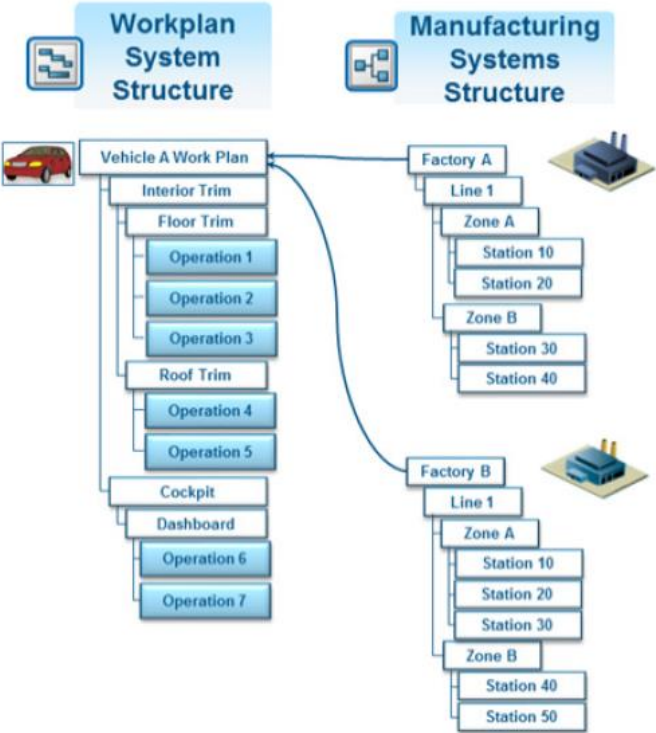


Fig. 10. Ejemplo de nodo de sistema

Al igual que el paso de los nodos de producto a proceso en el módulo anterior, en este caso también es preciso crear un vínculo o *scope* entre los nodos de proceso y sistema. La creación de este *scope* es totalmente análoga a la descrita en el módulo previo, así como sus consideraciones a la hora de crear varios *scope* en diferentes niveles dentro de la estructura. Asimismo, existe una indicación visual que marca la correcta creación del *scope*, muy similar a la empleada en el Manufactured Item Definition.

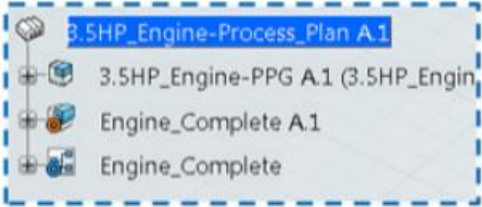


Fig. 11. Indicadores de scope

Análogamente a lo sucedido en el módulo anterior, la creación de la estructura del sistema, y sus diferentes operaciones, se realiza mediante casillas (*tiles*), que se denominan *system tiles* a fin de diferenciarlas de las ya expuestas. Éstas se crean con el comando adecuado, al igual que sucede con el otro módulo, y también pueden ser reorganizadas mediante *drag & drop*. En este caso, también es necesario “llenar” estos *tiles*, inicialmente vacíos, mediante la asignación de cada uno de los elementos que componen el MBOM. De nuevo, esta asignación puede hacerse de varias formas, siendo la más rápida e intuitiva el *drag & drop*.

De lo anteriormente expuesto puede concluirse que existe una gran similitud en la forma de proceder entre los dos módulos comentados hasta el momento. En primer lugar, se crea un *scope* que relaciona los nodos implicados. A continuación, se crea una estructura de *tiles* vacía, que representa la secuencia a seguir. Finalmente, se asignan los elementos del nodo precedente al nodo que se está creando, a fin de saber “dónde tiene lugar qué cosa”. Al igual que en el primer módulo, existe la posibilidad de crear grupos (subsistemas) que faciliten la comprensión del sistema, y catálogos con *templates* para reutilizar el trabajo ya acometido.

La mayor diferencia entre estos módulos viene a la hora de crear la estructura vacía. Mientras en el módulo de Item Definition se tenía una estructura de final a principio, creada a partir de *tiles* predecesores, la creación de la estructura del sistema es totalmente libre. Esto se debe a que el comando de creación de *tiles* de sistema no produce también la relación entre ellos, permitiendo por tanto generar multitud de casillas independientes y crear posteriormente el flujo de producto. No obstante, la casilla final deberá ser aquella con el *scope* global asignado al MBOM.

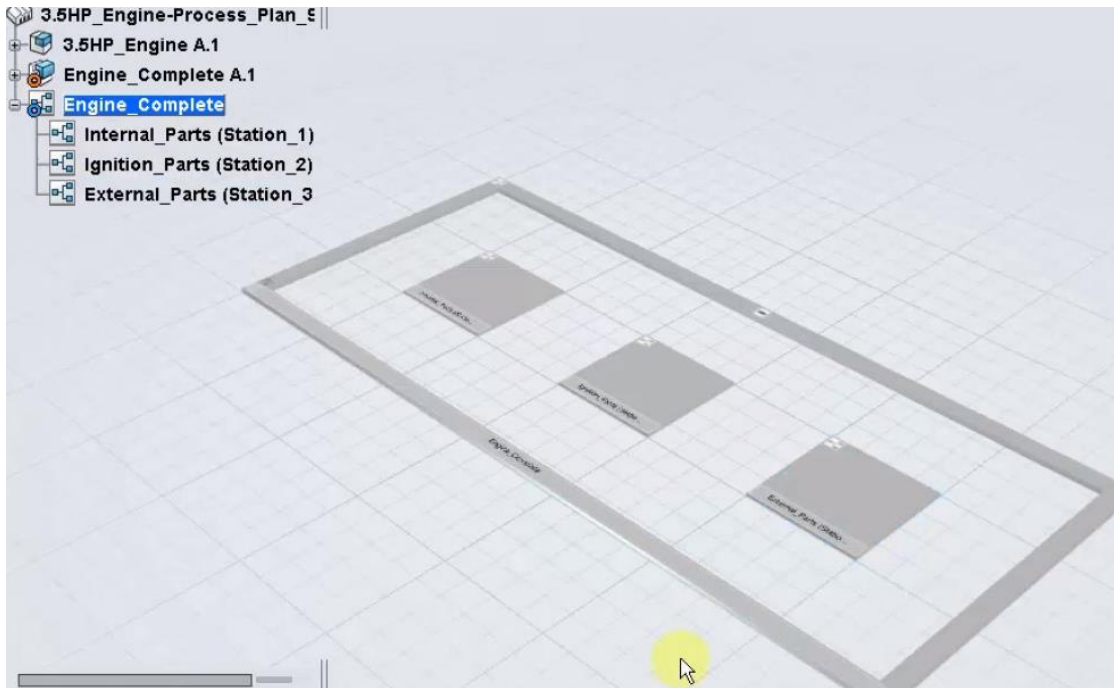


Fig. 12. Creación de *tiles* de sistema independientes

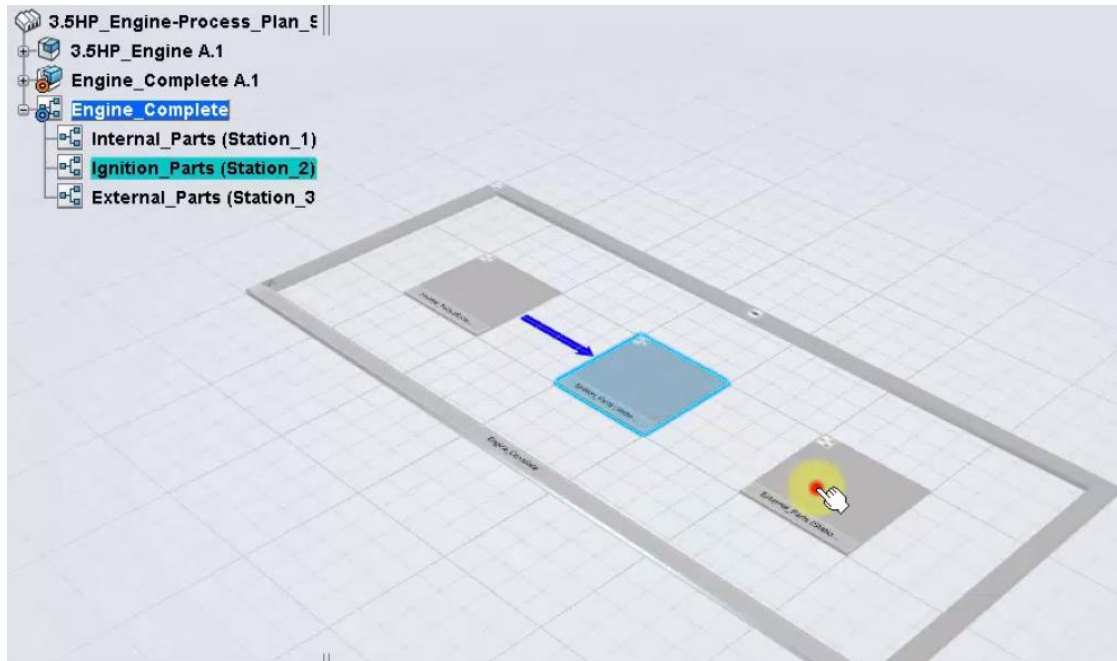


Fig. 13. Definición del *product flow*

Del mismo modo que en el primer módulo, la correcta asignación de las partes del MBOM a los *tiles* de sistema puede comprobarse de forma visual mediante la ya comentada herramienta *B.I. Essentials*. Mediante el código de colores correspondiente, se muestra el estado de cada uno de los elementos del sistema.

En cuanto a las operaciones que pueden generarse, la aplicación permite la simulación de diversos tipos de tareas. Dichos tipos están recogidos en la Fig. 14

Operation Type	Icon	Description
General		It is used for aggregating Operations (Loading / Fastening).
Loading		It is the basic operation used in most cases such as Assembly Operation.
Point Fastening / Curve Fastening		It is used for welding, beading, screwing operations.
Unloading		It is used to remove parts from the assembly (permanently).
Transfer		It is used to move an assembly from one place to another.
Remove Material		It is used for machining operations.

Fig. 14. Tipos de operaciones implementados en el *software*

La aplicación práctica hará uso de las operaciones generales y de *loading*, quedando el resto de ellas fuera del ámbito de estudio de este proyecto.

Además de crear el sistema a partir del MBOM y generar las operaciones que lo conforman. La aplicación pone a disposición del usuario multitud de herramientas de análisis de la producción. Es posible definir los tiempos y relaciones entre operaciones mediante diagramas de Gantt, dotar a éstas últimas de valor añadido, gestionar la carga de trabajo entre estaciones, definir el modelo de cambio o la demanda de la producción, o realizar el balanceo de la carga de trabajo de la línea, de forma manual o automática. Dichas herramientas se verán en más detalle durante la exposición del caso práctico.

2.3 Planning Structure

La aplicación Planning Structure pretende ser un aglomerado de otras aplicaciones ya comentadas. Permite definir y gestionar el MBOM, planificar los procesos y la asignación de recursos desde una única interfaz sencilla. Su empleo se deja para futuros proyectos, en los cuales una mayor familiarización con el entorno del programa permita usar este módulo como una forma de agilizar el proceso de construcción del árbol PPSR.

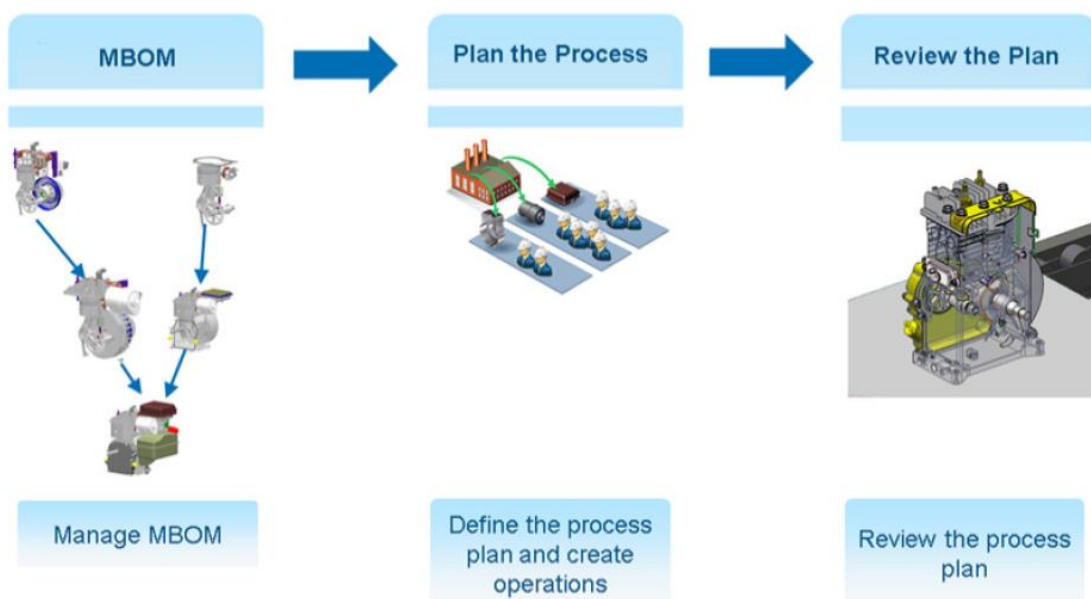


Fig. 15. Roles de la aplicación Planning Structure

Debido a que es una herramienta de carácter recopilatorio, se omite la explicación de la creación de MBOMs, definición de *scope*, asignación de partes, creación de operaciones y de *product flow*, o empleo de herramientas de análisis de la producción. Todo esto ha sido detallado ya en las herramientas correspondientes.

2.4 Equipment Allocation

La aplicación de Equipment Allocation se centra en el nodo de recursos dentro del árbol PPSR. Proporciona herramientas para el balanceo de operaciones sobre los recursos y para comprobar la utilización de los mismos, así como la del sistema. Permite trabajar en un entorno 3D que comprende tanto la planta en sí misma de la factoría (*shop floor*) como los recursos y el *layout*.

Antes de comenzar a enumerar las posibilidades que la herramienta proporciona, y el modo de empleo de las mismas, se cree conveniente detenerse en el concepto de recurso, y los diferentes tipos existentes.

Un recurso es un dispositivo (como puede ser una herramienta, un robot, un trabajador o maquinaria) usado en una línea de procesos o de ensamblaje para fabricar un producto. Dependiendo de cómo y dónde se usen, los recursos pueden ser clasificados como *working*, *non-working* o *organizational*.

Un recurso *working* es aquél que ejecuta una acción (por ejemplo, un robot, un trabajador o un *conveyor*). También se conocen como recursos *who*. Estos recursos son programables, esto es, tienen una lógica o comportamiento acorde al contexto en que se hallan.

Un recurso *non-working* es aquél que es usado por un recurso *working* para ejecutar una operación (por ejemplo, una herramienta). También se conocen como recursos *with*. Los recursos de este tipo no son programables, no presentan una lógica de acuerdo al contexto.

Los recursos *organizational* son aquellos en los cuales se ejecuta una operación (por ejemplo, una estación, una línea, o una zona). También se conocen como recursos *where*. De nuevo, este tipo de recurso es no programable.

Cada tipo de recurso tiene varias características, y puede ser útil para según qué aplicaciones. Los diferentes recursos que pueden ser modelados por la aplicación se recogen en la Fig. 16

Resource Type	Icon	Function	Programmable	Implement Link
Inspect		Working	Programmable	Who
Conveyor		Working	Non-Programmable	Who
Tool Equipment		Non-Working	Non-Programmable	With
Storage		Non-Working	Programmable	With
Control Equipment		Working	Programmable	Who
Logic Controller		Working	Non-Programmable	Who
Sensor		Non-Working	Non-Programmable	With
User Defined Resource		Non-Working	Non-Programmable	With

Resource Type	Icon	Function	Programmable	Implement Link
Area		Organizational	Non-Programmable	Where
Manufacturing Cell		Organizational	Non-Programmable	Where
Worker		Working	Programmable	Who
Robot		Working	Non-Programmable	Who
Transport		Working	Programmable	Who
NC Machine		Working	Programmable	Who
Industrial Machine		Working	Non-Programmable	Who

Fig. 16. Tipos de recursos modelados por Equipment Allocation

La aplicación permite crear robustos *layout* en la planta mediante la inserción directa de recursos desde la base de datos. Existen toda una serie de robots, trabajadores, *conveyors* y herramientas predefinidos que pueden ser insertados, además de la posibilidad de importar recursos propios creados con anterioridad. Esta inserción es de nuevo bastante inmediata, sin más que emplear el comando oportuno y buscar en la base de datos el recurso que quiere insertarse. También es posible seleccionar recursos presentes en la sesión actual, bien en el árbol o en la zona de trabajo.

Para facilitar la búsqueda de recursos, la aplicación cuenta con un catálogo paramétrico de los mismos. Esto permite filtrar los recursos por tipo, o por sus características principales

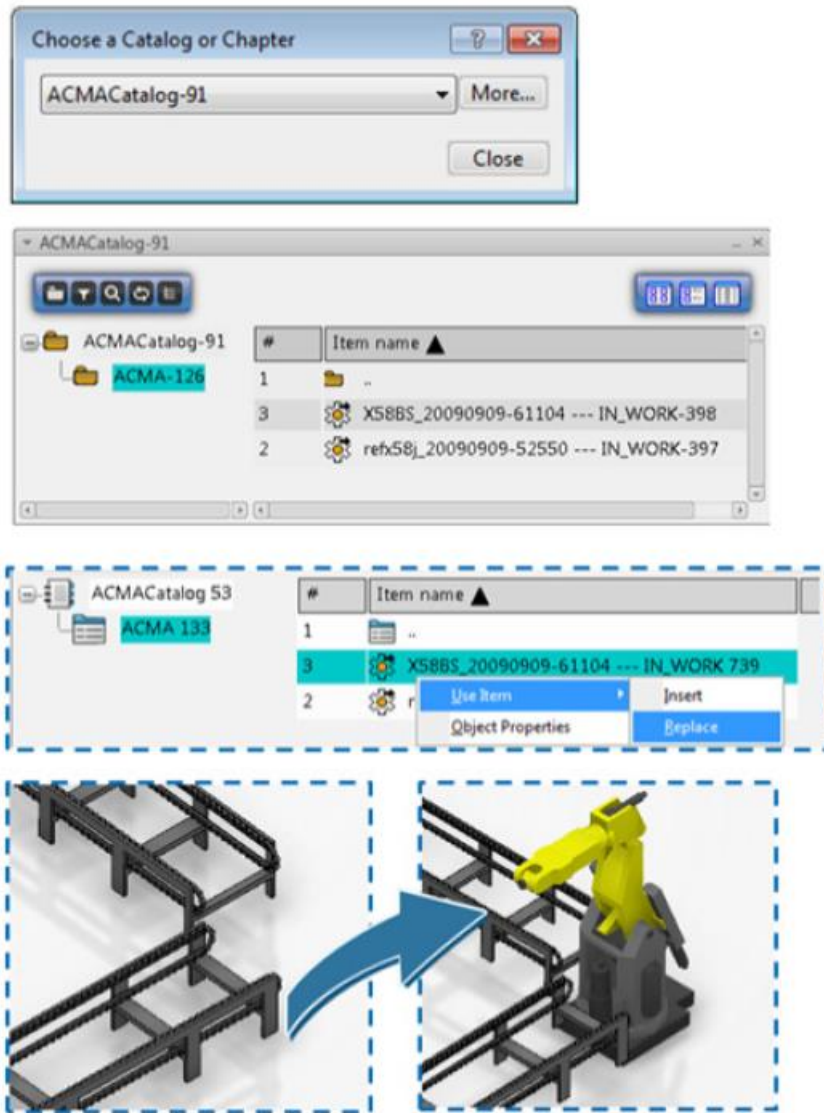


Fig. 17. Ejemplo de inserción por catálogo paramétrico. Se hace uso de la librería de robots ACMA

Como ya sucede en aplicaciones previas, se necesita de un vínculo entre nodos para facilitar las tareas de asignación de recursos. En este caso, se trata de un *scope* entre los nodos de sistema y recursos, y su creación es totalmente análoga a la ya comentada en el resto de casos. En este caso, además, la definición del *scope* es un prerequisite para realizar el balanceo de las operaciones en los recursos.

La definición de estos *scopes* en la aplicación que se está comentando adquiere un significado físico: Supone pasar de una estructura de sistema global, en la cual se almacena la información de las operaciones a realizar y la secuencia de las mismas a fin de obtener un producto final, a una disposición física de la línea de producción, es decir, determinar físicamente donde se ubica cada una de las operaciones o procesos en el *layout* de una factoría en concreto. En resumen, implica el paso del concepto abstracto general de la idea de producción a una manifestación física concreta de esa idea en un entorno específico.

Con el fin de clarificar lo expuesto, se introduce un breve ejemplo

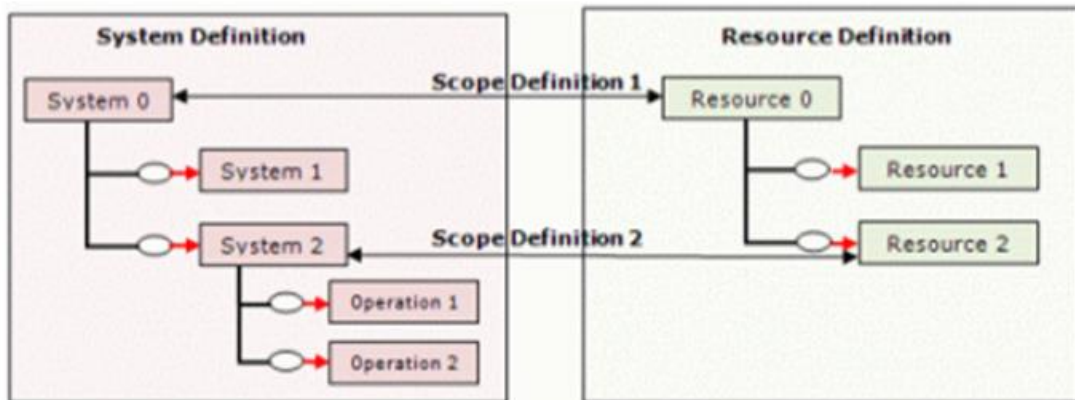


Fig. 18. Ejemplo de scope en recursos

Según lo mostrado en la Fig. 18, el vínculo nombrado como *ScopeDefinition 1* implica que el sistema 0 se va a ejecutar en el recurso *organizational (where)* 0. Las operaciones que haya en el sistema 0 deben ser asignadas a los recursos que haya en el recurso 0, ya que el *scope* es únicamente entre ellos.

Del mismo modo, *ScopeDefinition 2* supone que el sistema 2 se lleva a cabo en el recurso 2. Las operaciones 1 y 2 deben ser asignadas a recursos dentro del recurso 2. Este último vínculo permite definir el recurso en cual el sistema va a ser ejecutado.

De nuevo, ha de verse el sistema como la idea abstracta que supone la planificación de la fabricación de un producto, y los recursos como la materialización de esa idea en emplazamientos, herramientas y estaciones físicas dentro de la planta. Ambos conceptos pueden coincidir, pero no tienen por qué hacerlo necesariamente.

De forma análoga al resto de módulos, una vez planteado el *layout* de la planta y definidos todos los recursos, debe realizarse una asignación entre los elementos de los nodos participantes en la aplicación, esto es, los nodos de sistema y de recursos. En este caso, esta relación tiene una consecuencia claramente visible. Supone la asignación de las operaciones que han de realizarse a los recursos. Dicho de otro modo, supone decidir dónde se realiza cada una de las operaciones, y quién y con qué equipo las lleva a cabo.

Tras la asignación, la herramienta permite analizar la correcta utilización de los recursos: Ver y organizar la carga de trabajo de cada uno de los operarios, hacer uso de los diagramas de Gantt, o balancear el uso de los recursos entre las estaciones redistribuyendo las tareas asignadas a cada uno de ellos. Esto permite generar un *layout* optimizado que saque el máximo partido de los recursos disponibles.

Además, este módulo permite también definir la posición relativa del producto con respecto a los recursos durante todo el proceso de producción del mismo. Esto es de gran utilidad en caso de que quiera realizarse una simulación realista del recorrido seguido por el producto durante su fabricación, y determinar así la ruta óptima a seguir por éste con el fin de reducir los tiempos empleados en el mero transporte entre estaciones. La definición de la posición es una tarea sencilla gracias a los comandos intuitivos facilitados por la herramienta, y puede realizarse mediante el uso de flechas en dirección de los ejes coordenados. Existe también la posibilidad de posicionar el producto con más precisión haciendo uso de un cuadro de texto.

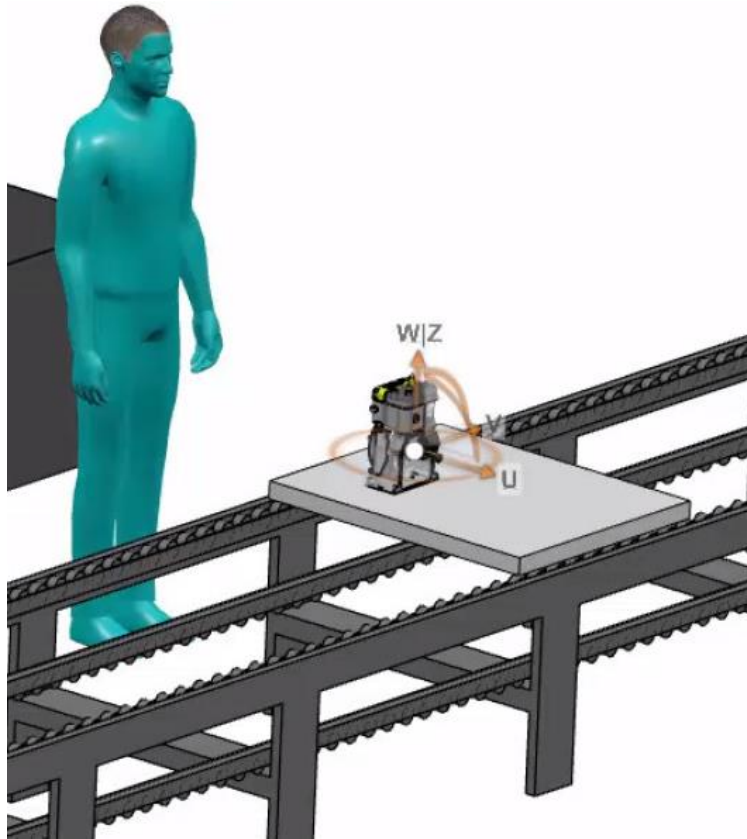


Fig. 19. Posicionamiento relativo del producto respecto al recurso (trabajador)

Para finalizar, como se acaba de comentar la aplicación permite realizar una simulación de la planta completa, de manera que puede seguirse en todo momento la secuencia de ensamblaje del producto mientras éste recorre las diversas estaciones a lo largo del *layout* de la factoría.

Todas las funciones comentadas contenidas en este módulo, si bien de gran interés para cualquier proceso productivo, suponen la inversión de una cantidad excesiva de tiempo para el alcance planteado de este proyecto. Por tanto, y como ya ha sido dicho, se ha optado por omitir el empleo de este módulo en la aplicación práctica, llegando únicamente al nodo de sistema.

2.5 Assembly Evaluation

El módulo de Assembly Evaluation permite simular el movimiento de las piezas para comprobar y validar la fabricabilidad y factibilidad de mantenimiento de las mismas. Utiliza un entorno de diseño similar al Manufacturing Planning para gestionar un amplio rango de productos, desde bienes de consumo a proyectos de gran envergadura como los de índole aeronáutica.

El entorno de simulación permite definir y simular los procedimientos de ensamblaje y desmontaje, posibilitando validar el ensamblaje del producto y su mantenimiento en fase de diseño.

Es una herramienta que permite realizar un gran número de análisis previos, cuando el proyecto aún se encuentra en un estadio de diseño, como la fabricabilidad del producto, o la validación de los procesos o de la planificación.

Las características principales de este módulo son la creación interactiva de caminos (*paths*) para las partes durante el ensamblaje, construcción del producto operación por operación (*buildup*), definición de sondas para realizar análisis durante la simulación en busca de interferencias en el proceso, o la posibilidad de crear una secuencia de ensamblaje a partir del explosionado de un producto finalizado (*explode*).

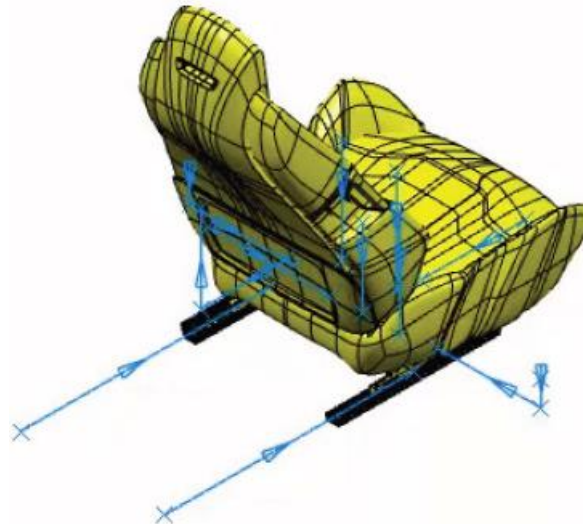


Fig. 20. Creación de caminos (*paths* o *tracks*) de las diferentes partes que componen un producto

Como se ha expuesto, se trata de una herramienta de gran utilidad a la hora de realizar una primera aproximación al proceso de ensamblaje final, antes de comenzar a realizar el MBOM. Por tanto, es un módulo que ha sido empleado para obtener una evaluación preliminar de la situación del caso práctico antes de la creación del árbol PPS. La herramienta es después revisitada una vez creado el MBOM con el fin de comprobar la concordancia entre el estado preliminar y el definitivo. Debido a esto, las explicaciones acerca del uso de dicha aplicación se recogen al inicio del caso práctico.

2.6 Plant Layout Design

La aplicación de Plant Layout Design explora un poco más los conceptos de catálogos paramétricos, *templates* y posicionamiento de recursos. Puede considerarse por tanto una herramienta a usar tras el empleo de Equipment Allocation, para hacer un diseño más fino de la planta.

La aplicación contiene catálogos con numerosos recursos como *conveyors*, contenedores para partes, mobiliario, estanterías, etc. Genera la geometría del recurso, y éste puede luego ser posicionado libremente dentro del *layout*. También incluye un catálogo de recursos estándar, como herramientas, estaciones de taladrado, útiles de posicionado, robots, y demás. Asimismo, permite crear catálogos propios para acceder de forma rápida y sencilla a los recursos más empleados. Además, el uso de *templates* con los recursos permite agilizar el proceso de diseño del *layout*.

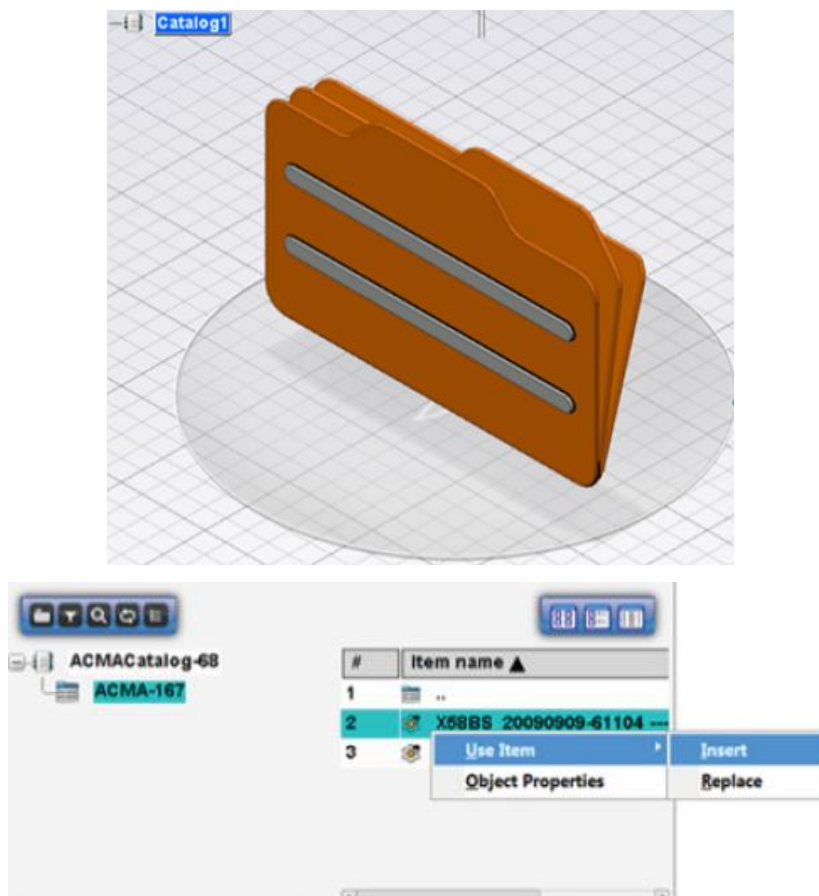


Fig. 21. Catálogo en la herramienta (arriba), e inserción de recursos mediante catálogo paramétrico (abajo)

En cuanto al empleo de recursos, la aplicación permite su inserción de un modo totalmente análogo al que se tiene en Equipment Allocation. Se omite del mismo modo la clasificación de recursos y su definición al ya encontrarse en la citada aplicación.

Hasta ahora, se han presentado las características de la aplicación comunes a la ya referida Equipment Allocation. Se recogen a continuación las características exclusivas del módulo que se está describiendo.

En primer lugar, este módulo permite importar una “huella” de la ubicación de los recursos a partir de un *drawing* 2D (*resource footprint*). Esto permite especificar cuál es el área ocupada por cada recurso dentro de la planta y emplearlo como guía a la hora de insertar posteriormente los recursos que formarán el *layout*. Este *footprint* se coloca en el suelo de la factoría, y los recursos pueden ser adjuntados a ésta de forma sencilla (*snapping*). La aplicación permite la creación *in situ* del *footprint*, además de su importación desde un archivo *drawing* de CATIA.

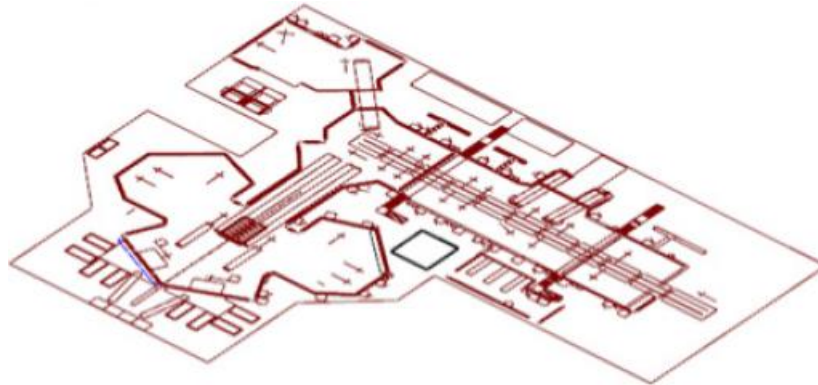


Fig. 22. Ejemplo de *footprint* para *layout* determinado

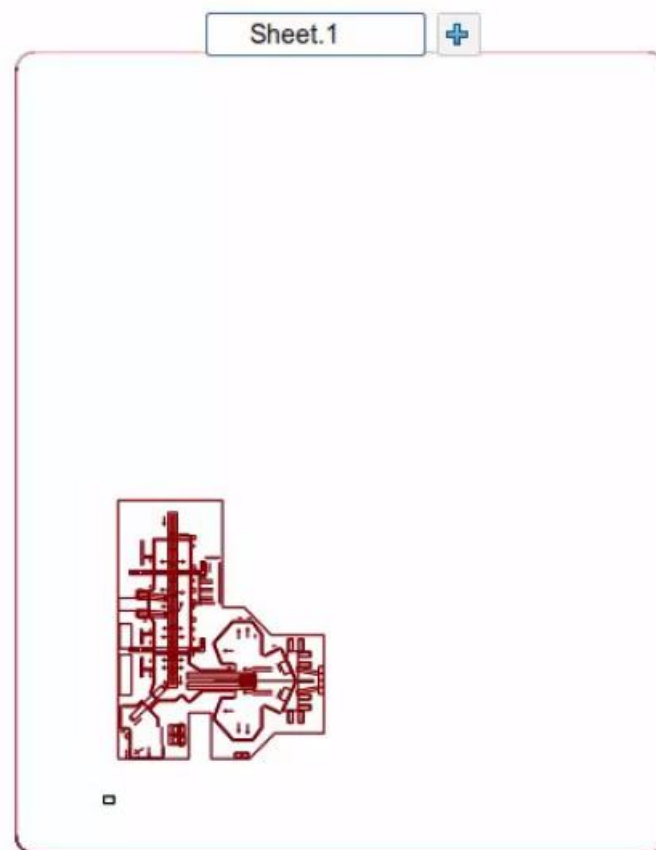


Fig. 23. Creación de *footprint* dentro del módulo

Durante la creación del *footprint*, es posible anotar las dimensiones deseadas, con el fin de colocar los recursos de manera precisa y así ajustarse a lo diseñado para el *layout* que se pretende realizar.

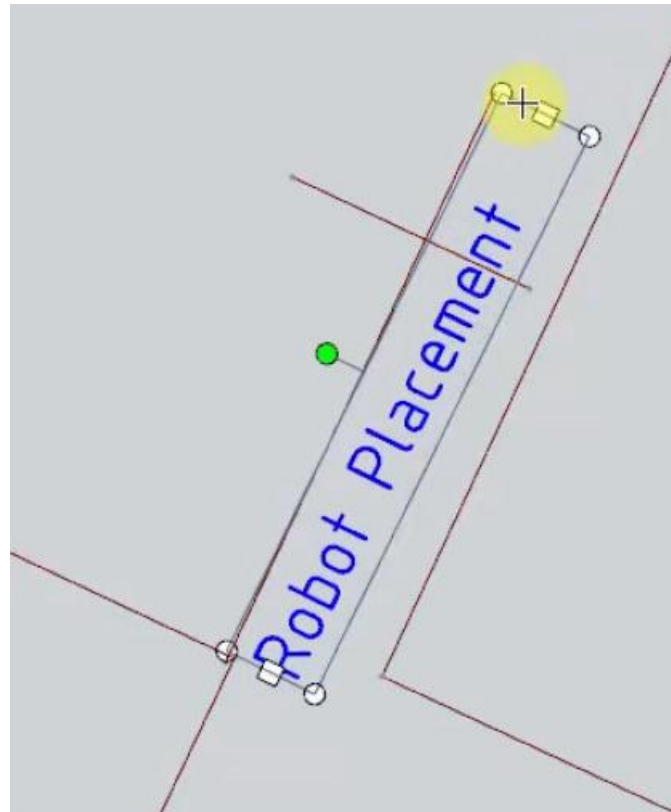


Fig. 24. Anotación para referencia en *footprint*

Una vez creado el *footprint*, la posterior inserción de los recursos es similar a la que se realiza en Equipment Allocation. Permite posicionarlos mediante los ejes coordenados, y el posicionamiento relativo del producto con respecto a los recursos. Además, ofrece varias opciones para posicionar los recursos con referencias varias, facilitando dicha labor. Este proceso, conocido como *snapping*, tiene varias opciones: Realizar *snap* con respecto a un plano conocido (por ejemplo, para situar un recurso sobre el suelo, o sobre una mesa), respecto a un plano dado por tres puntos, con respecto a una línea 2D (por ejemplo, para alinear un recurso con una arista conocida), y el comando *smart snap* (*snap* inteligente), que permite posicionar varios recursos entre sí de forma rápida a partir de unos puntos de referencia en los propios recursos (*connector ports*), definidos por el propio usuario.

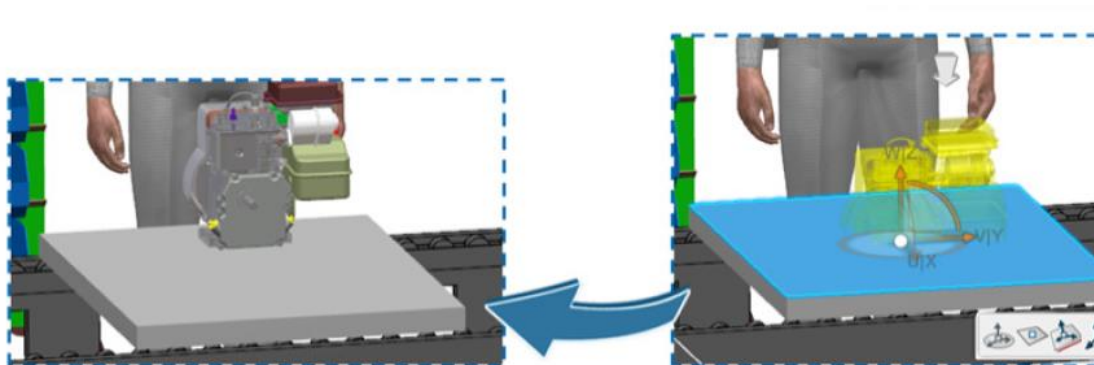


Fig. 25. *Snap* con respecto a un plano

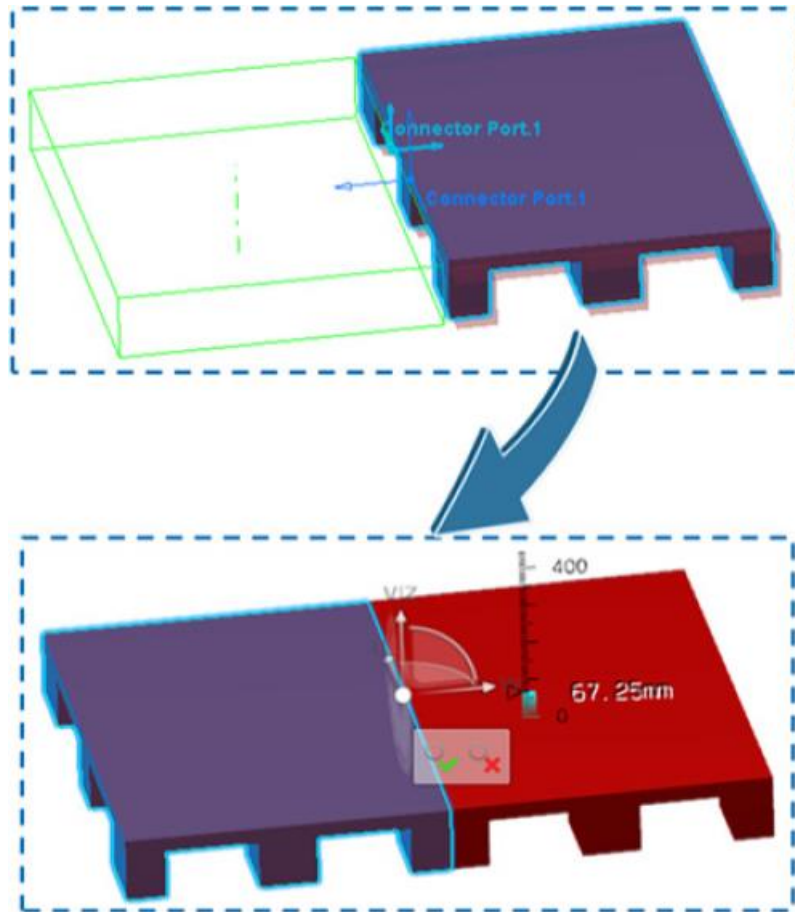


Fig. 26. *Smart snap*

Tras el *snap*, los objetos pueden moverse y alinearse con respecto a otros, con el fin de obtener un *layout* idéntico al diseñado y deseado para la planta. La herramienta proporciona por tanto métodos para que este posicionamiento sea muy preciso, técnicas de alineación múltiple, creación de simetrías (*mirroring*) y de patrones, y otros comandos para hacer la tarea lo más sencilla y rápida posible.

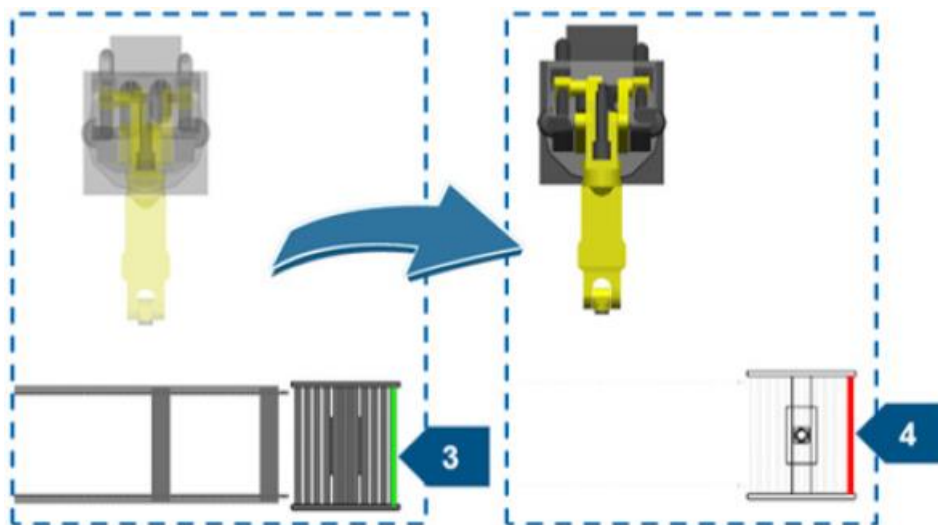


Fig. 27. Ejemplo de alineación de recursos

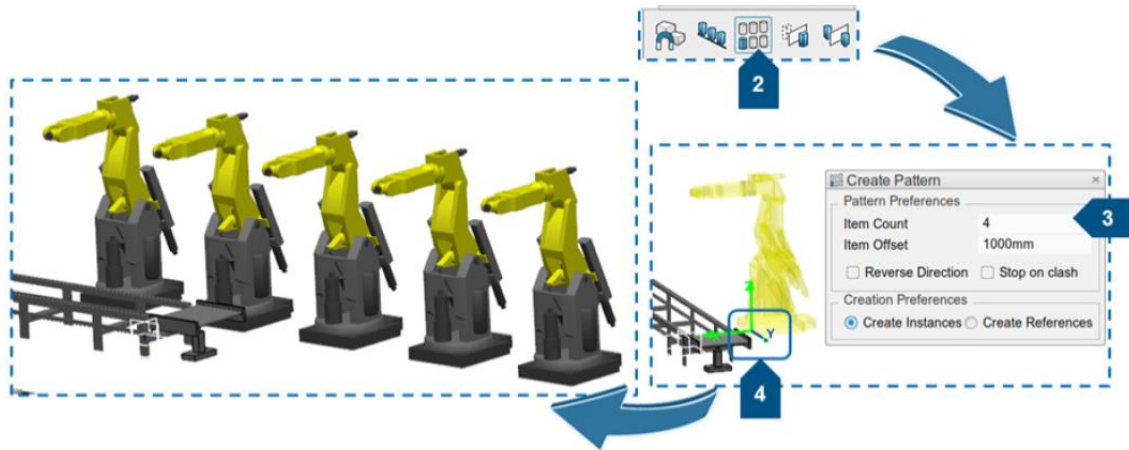


Fig. 28. Ejemplo de creación de patrón

Al igual que ocurre con Equipment Allocation, puesto que las funciones ofrecidas por la aplicación son básicamente orientadas a los recursos, no se hace uso de este módulo a la hora de analizar el caso práctico.

2.7 Work Instructions

La aplicación de Work Instructions, como su propio nombre sugiere, proporciona un entorno inmersivo 3D para crear numerosos tipos de instrucciones de trabajo, como las basadas en texto e imágenes, o alertas a la hora de realizar los procesos previamente diseñados. Persigue como fin último proporcionar al operario en la planta de instrucciones claras y precisas que faciliten su labor y disminuyan al máximo los errores humanos en la factoría.

Las instrucciones pueden añadirse directamente sobre las operaciones, ya definidas en la aplicación de Process Planning. La secuencia de operaciones, con sus correspondientes indicaciones, pueden reorganizarse con el habitual método de *drag & drop*, haciendo de su uso una tarea sencilla, rápida e intuitiva.

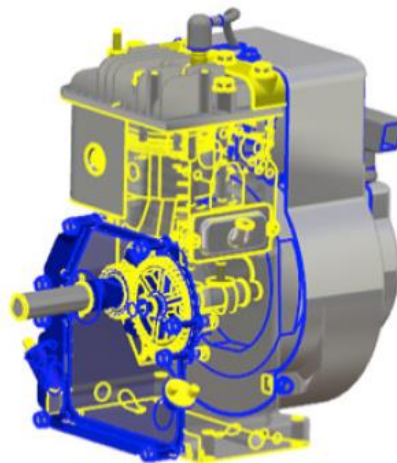
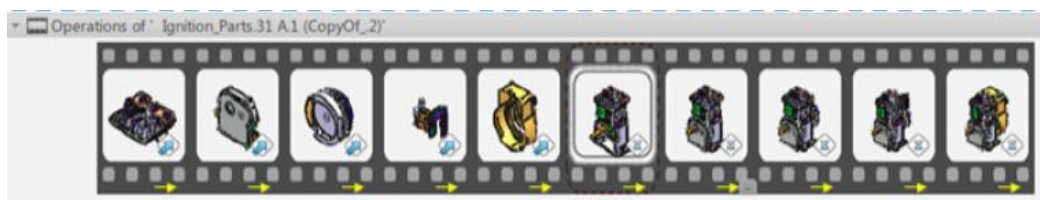


Fig. 29. Ejemplo de secuencia de operaciones

El módulo proporciona una gran cantidad de opciones de visualización, con capacidad de ocultar piezas que dificulten la visión de la operación a realizar, o la construcción del producto paso a paso en la secuencia de operaciones.

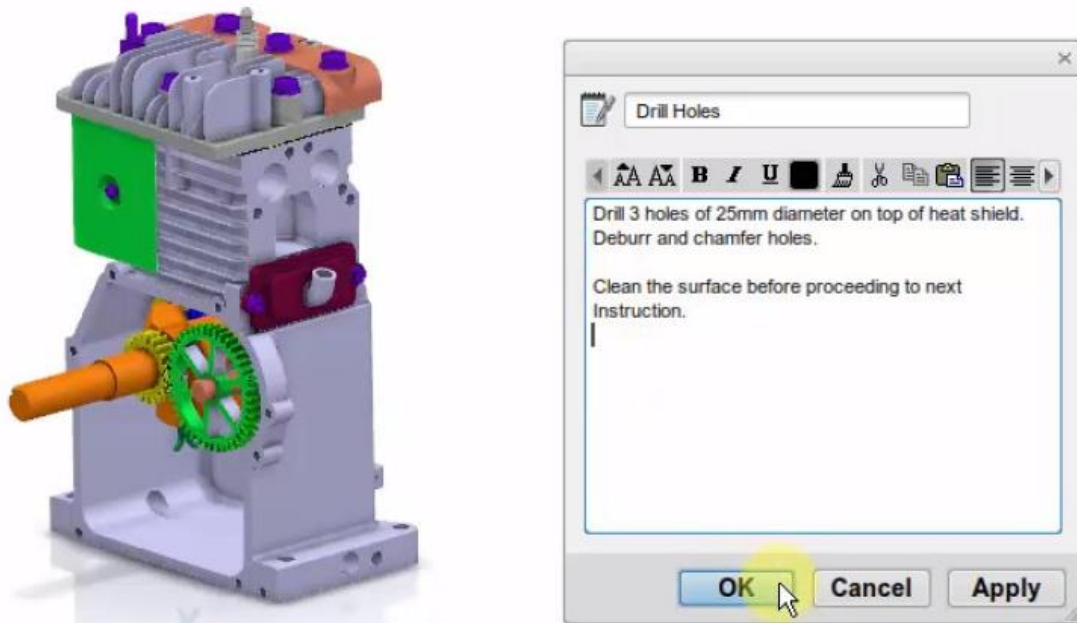


Fig. 30. Ejemplo de creación de instrucción

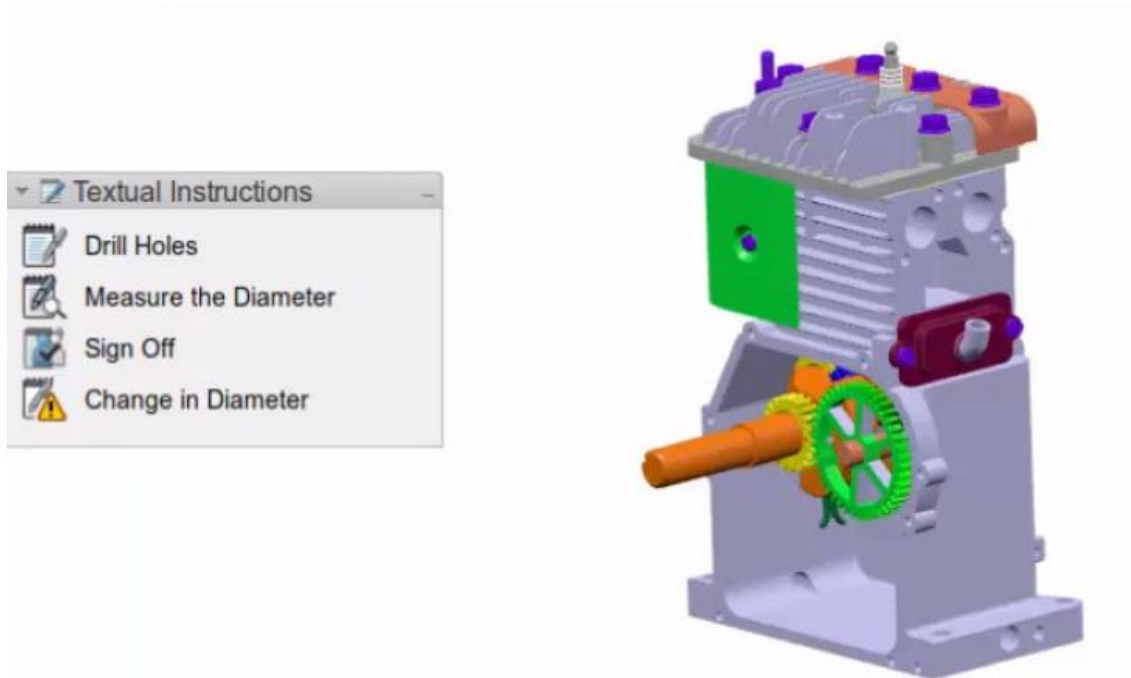


Fig. 31. Secuencia de instrucciones completa para una operación

Al igual que en otras aplicaciones, ofrece la posibilidad de crear catálogos personalizados y *templates* para poder reutilizar lo empleado en futuros proyectos, o para modificar con mayor rapidez el que se está acometiendo.

La aplicación permite cierta personalización en las instrucciones, como cambiar el tamaño de fuente o el color de la misma para llamar la atención al operario acerca de algún hecho relevante (las alertas, por ejemplo), o adjuntar imágenes que faciliten la comprensión de las indicaciones.



Fig. 32. Ejemplo de advertencia modificada

Tras detallar todas las instrucciones, es posible crear un entorno 3D en el que presentarlas al trabajador, de forma más vistosa e inmersiva, y facilitar aún más su correcta interpretación.

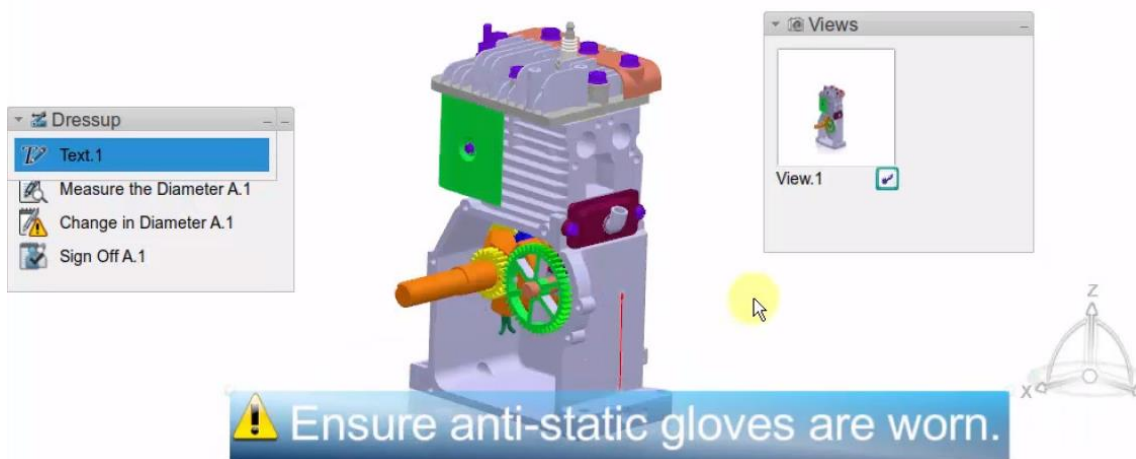


Fig. 33. Creación de instrucciones 3D

Por último, este módulo permite revisar las instrucciones ya creadas a posteriori, con el fin de detectar posibles anomalías, o bien para actualizar las mismas en caso de ser necesario. También ofrece la posibilidad de generar la documentación pertinente para la operación, que será entregada al operario (*Work Instruction Sheet*).

El módulo presentado únicamente reviste utilidad en estadios avanzados del proyecto, una vez todos los nodos del árbol PPSR han sido totalmente definidos. Por tanto, queda fuera del alcance planteado en este trabajo y no ha sido empleado en la aplicación práctica. No obstante, ha querido ser tenido en cuenta a la hora de la formación del alumno debido al carácter diferenciador que posee con respecto al resto de módulos considerados, y a su innegable utilidad en todo proceso productivo, ya que conecta los colectivos de diseño/planificación y de trabajadores de la planta.

3 CASO PRÁCTICO: PLANIFICACIÓN DEL PROCESO DE ENSAMBLAJE DE UN COMPONENTE AERONÁUTICO

If we worked on the assumption that what is accepted as true really is true, then there would be little hope for advance.

- Orville Wright -

Una vez puesto en contexto el *software* empleado, y detalladas todas sus posibilidades y opciones, se ponen a prueba sus capacidades mediante un caso de aplicación práctica que puede darse en el ámbito profesional. En este caso, la aplicación es de corte aeronáutico, y corresponde al estudio del proceso para ensamblar las compuertas del tren de aterrizaje de uno de los modelos más emblemáticos de Airbus, como es el A380. Se trata de una estructura formada en su gran mayoría de materiales compuestos. Por este motivo, las operaciones que se lleven a cabo serán de unión con adhesivos, si bien al no existir una opción para simular este tipo de tarea en la herramienta se recurre a operaciones generales. Se han omitido, por simplicidad y debido a no venir incluidas en el diseño, las operaciones de remachado.

3.1 El producto: Compuertas del tren de aterrizaje del Airbus A380

Como ya se ha comentado en la introducción, la elección de esta aplicación no es fortuita, sino que viene meditada debido a razones de facilidad en el apartado de diseño, permitiendo centrar este trabajo en el ámbito de fabricación, y a la adecuada cantidad de subelementos presentes en el producto final, que representa un equilibrio entre lo razonablemente abordable y lo adecuado para ser materia de un estudio de esta envergadura.

En concreto, el modelado completo del producto, esto es, las compuertas del tren de aterrizaje, así como el propio tren, simulaciones del proceso de apertura y cierre de las puertas, y un modelo simple de la aeronave que hace las veces de punto de referencia para el posicionamiento del producto en el avión completo, ya se encuentran hechos al comienzo de este trabajo. Los ficheros han sido obtenidos mediante el repositorio de archivos de CAD en línea GRABCAD [8]. Se trata de una web en la cual usuarios de todo el mundo comparten sus diseños CAD de forma altruista, y permite, como en este caso, un ahorro considerable de tiempo a aplicaciones de otro tipo.

La elección de este diseño entre los múltiples que se encuentran alojados en dicho sitio web se debe a la gran calidad del modelado, ya que se encuentran implementados todos los elementos importantes del producto, y al hecho de ser un conjunto de ficheros muy completo, contando con despieces del producto final, varios planos en 2D y 3D, animaciones de la apertura y cierre, información relativa al material empleado en cada pieza, y modelos del avión para poner en contexto el producto deseado. Se muestran a continuación capturas de estos ficheros, que posteriormente han sido modificados para facilitar la labor de ensamblaje

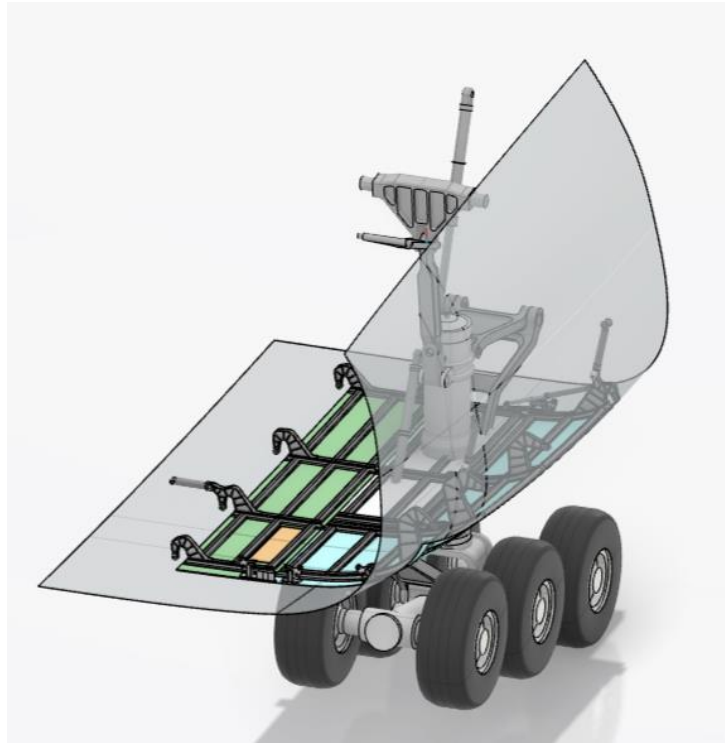


Fig. 34. Conjunto de tren y compuertas

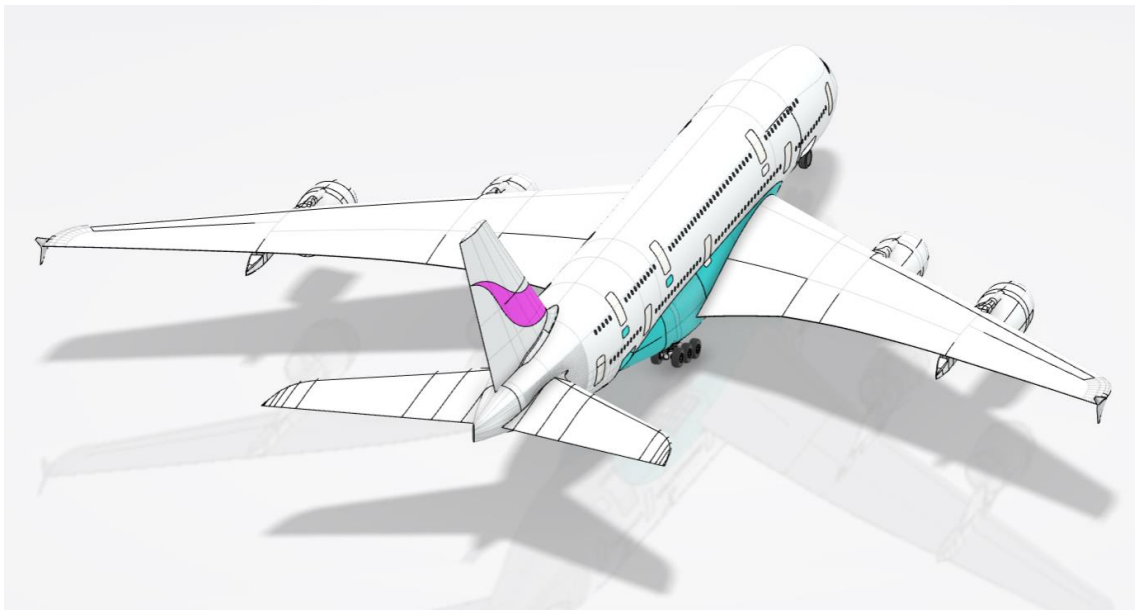


Fig. 35. A380 completo (referencia)

Para finalizar esta breve introducción al producto, se realiza una breve descripción del mismo. Se trata de un conjunto compuesto por tres subproductos principales: La puerta exterior, la puerta auxiliar, y la puerta central. Las puertas exterior y central se encuentran cogidas al avión completo, y la puerta auxiliar se ensambla junto a la exterior. Durante el proceso de apertura, las puertas exterior y central se abren, la puerta auxiliar se pliega sobre la exterior, el tren se extiende y las puertas vuelven a cerrarse, dejando una oquedad ocupada por el tren. El proceso de cierre sigue la secuencia inversa, de forma que cuando el tren se encuentra retraído la puerta auxiliar cubre completamente el espacio dedicado al mismo. La puerta central alberga una pequeña puerta de alivio de presión, cuya finalidad es evitar sobrepresiones durante la apertura y cierre en el despegue/aterrizaje.

3.2 Metodología de trabajo

Esta aplicación práctica, como ya ha sido dicho, omite por premura de tiempo el análisis del nodo de recursos, definiendo los primeros nodos del árbol fundamental PPSR. Se tiene por tanto el nodo de producto, ya recogido en los diseños descritos en el apartado anterior, el nodo de proceso y el de sistema. Siguiendo esta secuencia lógica, en primer lugar, se aborda la estructura de ensamblaje desde una evaluación inicial, a fin de clarificar el modo de proceder en el proceso antes de realizar el análisis propiamente dicho. Para ello se hace uso de la herramienta de Assembly Evaluation, y se realiza una primera simulación del proceso. A continuación, se lleva a cabo la definición del MBOM y se formaliza la estructura del proceso de ensamblaje. Queda así definido el nodo de proceso, mediante la herramienta de Manufactured Item Definition. Tras esto, se procede al análisis y definición del nodo de sistema, gracias al módulo Process Planning. Para finalizar, se harán diferentes estudios, consideraciones y conclusiones con esta herramienta, tales como distribución de carga de trabajo o posibles variantes en la secuencia de montaje.

3.3 Evaluación inicial del producto

Como ya se ha comentado, el primero de los pasos seguidos en la elaboración de este caso práctico es un primer análisis del proceso de ensamblaje. Con esto se pretenden sentar las bases que permitan la posterior definición del orden lógico a seguir para lograr el producto final, antes de entrar en otras consideraciones de carácter puramente administrativo, como el equilibrado de la línea o de las cargas de trabajo. Se trata en cualquier caso de una primera aproximación al problema, y en caso de ser necesario realizar modificaciones a lo expuesto, se revisitará este módulo tras la definición de los nodos.

Ya aclarados los objetivos de este apartado, se pasa a comentar la metodología seguida en el proceso, así como la toma de decisiones que ha sido necesario abordar para avanzar en el mismo.

La herramienta Assembly Evaluation trabaja definiendo las trayectorias (*tracks*) seguidas por cada una de las partes durante la secuencia de montaje, de manera que una vez creadas puede simularse dicha secuencia. Además, permite decidir qué trayectorias suceden a cuáles, o cuántas de ellas se realizan de forma simultánea. Estas funciones hacen posible simular la secuencia que se desea con un alto grado de flexibilidad.

El uso de esta herramienta tiene como fin aclarar las relaciones de unión que existen entre los diferentes componentes del producto. Pretende servir de apoyo para conocer qué piezas se unen con cuáles, y que trayectorias seguirían las mismas. En esta aplicación concreta, como se comenta en apartados posteriores, esta labor de visualización se ha hecho antes del empleo del *software*, haciendo uso de deliberaciones y ejercicios mentales, y las relaciones entre piezas parecen claras. No obstante, se remarca la utilidad de dicha labor haciendo uso de la aplicación para conjuntos más complejos en los cuales no es posible realizar esta abstracción mental de forma inmediata, o es mucho más sencillo contar con la ayuda de este módulo.

En este supuesto, sería de gran utilidad definir algunos *tracks* de aquellas pizas cuyo ensamblaje y posicionamiento relativo no sean sencillos de comprender, de modo que una visualización directa del problema ayude a interpretar el mismo, antes de comenzar a definir el MBOM. Con el fin de ejemplificar esto, se recoge seguidamente la creación de *tracks* para esta aplicación práctica, y se pone de manifiesto la utilidad de los mismos.

El procedimiento para crear *tracks* en la aplicación es rápido y sencillo. Tras hacer uso del comando apropiado, se arrastra la pieza a la posición deseada y se pulsa sobre *grabar*. Esto crea un segmento de trayectoria. Repitiendo el proceso las veces deseadas pueden crearse trayectorias de toda clase.

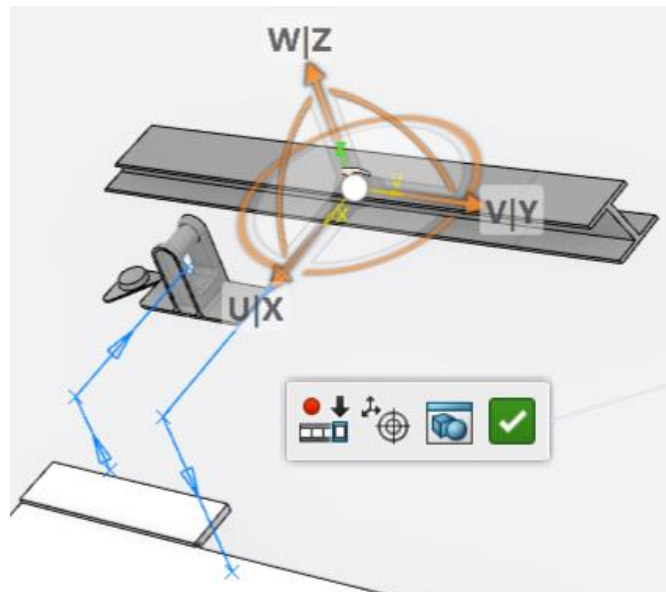


Fig. 36. Ejemplo de creación de *tracks*

Cabe destacar que la creación de *tracks* se realiza de forma inversa, esto es, la pieza parte de la posición final (ensamblada) y se lleva a la inicial, fuera del conjunto. Una vez acabada la trayectoria, es posible invertir su sentido y obtener así el *track* de ensamblaje. Esta forma de trabajar es ventajosa en relación a lo comentado anteriormente: Si se desconoce la relación exacta que hay en la unión de dos piezas, es sencillo partir del conjunto completo y “desensamblar” la pieza cuya integración no sea de fácil visualización. Tras esto, no hay más que invertir la trayectoria y simular el proceso para comprender el ensamblaje.

Se destaca también el hecho de que es posible crear trayectorias curvas mediante el uso de *splines* en caso de ser necesario. En este caso de aplicación, por simplicidad y al no aportar grandes beneficios, se ha hecho uso únicamente de trayectorias rectas.

Una vez realizado esta primera evaluación del producto, se quiere comentar, para dar término a este apartado, la utilidad del mismo con respecto al proyecto completo. En el caso de aplicación escogido, se está ante un conjunto sencillo, con una secuencia de ensamblaje clara, y con relaciones entre piezas de fácil visualización. Por ello, sería posible realizar este mismo análisis de forma simultánea a la creación del MBOM, ahorrando con ello tiempo y recursos. Parece ser, por tanto, una labor algo innecesaria.

No obstante, y como ya se ha remarcado, da la impresión de ser una herramienta de gran utilidad en el caso de contar con productos mucho más complejos, de gran número de piezas, que sean difíciles de abarcar sin ayuda del *software*. En estos casos, parece ser un paso muy importante a seguir si quieren evitarse futuros errores en la definición del MBOM y ahorrar las grandes pérdidas de tiempo que supondrían la corrección de errores de ese estilo.

3.4 Definición del MBOM

Una vez analizado el producto a ensamblar se procede a diseñar la secuencia de ensamblaje. Esto supone la definición del nodo de proceso en el árbol PPSR. Para ello, se emplea la herramienta Manufactured Item Definition. Una vez creado el MBOM, puede darse paso al estudio del sistema y a las distribuciones físicas en planta, así como a análisis de la producción ya comentados, como la distribución de cargas de trabajo entre operarios.

Se contemplan inicialmente las diferentes opciones para la secuencia de ensamblaje que se presentan, y se plasma la que se considera más adecuada en la herramienta. Se barajan varias posibilidades: En primer lugar, se considera que existe un útil capaz de posicionar todos los paneles que forman la base de las puertas. Esto permite montar los elementos que las componen en un único emplazamiento, y con un alto grado de simultaneidad siempre y cuando existan los recursos (trabajadores) necesarios para ello. Si bien en un principio parece una opción viable y ventajosa, se termina descartando debido a la baja probabilidad de la existencia de un útil de semejante tamaño y complejidad (el posicionamiento relativo entre puertas ha de ser muy preciso, y es necesario posicionar los anclajes de las mismas de un modo crítico también).

A continuación, se propone el método completamente opuesto: El montaje secuencial de cada una de las puertas en sus correspondientes útiles, y posteriormente la unión de las mismas en un posicionador independiente. Esta estrategia permite dar solución a la existencia de útiles tan grandes y complejos, pero no parece ser la óptima. Parece claro que existe un método que permite reducir el tiempo total de montaje y la cantidad de recursos a emplear.

Con estas premisas en mente, se llega a la secuencia finalmente empleada: Cada una de las puertas que conforman el producto final es ensamblada en útiles separados, pero de forma simultánea. Una vez completadas, se lleva a cabo la unión de la puerta exterior y la auxiliar (identificadas en el producto como *Outer* y *Folding*), para lo cual se omite durante el montaje de la puerta auxiliar los elementos de unión entre subproductos (bisagras), que son ensamblados una vez posicionados éstos, con el fin de asegurar el correcto funcionamiento del portón.

Una vez decidida la secuencia de ensamblaje, se expone la metodología seguida para su implementación en la plataforma. Como ya ha sido explicado, la creación de un MBOM pasa por definir en primer lugar ciertos vínculos entre el producto y las casillas o *tiles* de fabricación presentes en la aplicación. Estos vínculos, llamados *scopes*, permiten al programa comprender las intenciones del usuario en la definición del MBOM. En el caso que se estudia, se van a llevar a cabo 5 *scopes* diferentes: Un *scope* global, que relaciona el producto final con el último de los *tiles*, y cuatro *scopes* a un nivel más bajo, que relacionan *tiles* intermedios con subconjuntos importantes (cada una de las puertas que conforman el conjunto completo, y la puerta de alivio de presión). El método de creación de estos *scopes* ya ha sido detallado en el apartado del módulo correspondiente.

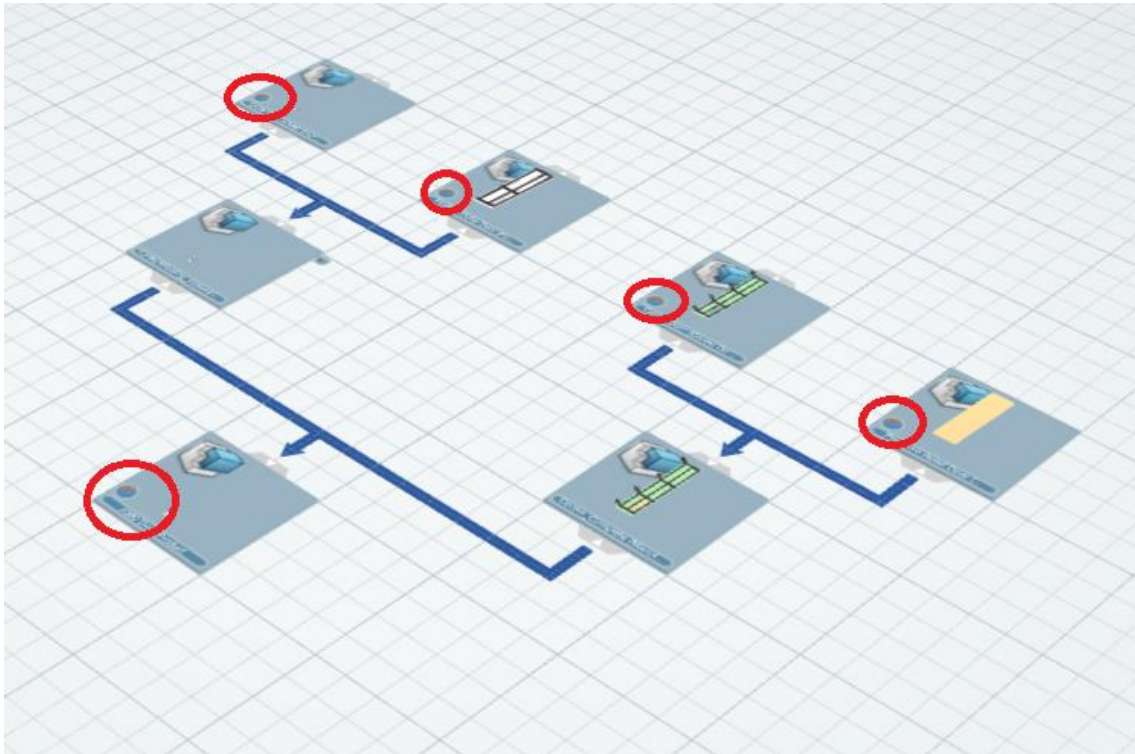


Fig. 37. Estructura básica del MBOM. Nótese los 5 scopes definidos como se ha indicado anteriormente

Estos *scopes* también pueden ser notados en el árbol, como ya se ha explicado



Fig. 38. Indicaciones visuales para *scopes* en árbol

En este primer paso se quiere destacar un par de aspectos. En primer lugar, y al igual que como sucedía en el módulo de Assembly Evaluation, la elaboración de la secuencia de ensamblaje se realiza en orden inverso, esto es, se parte del producto final y se realiza un despiece del mismo hasta llegar a los componentes elementales, de forma que la inversión de este proceso conforma el ensamblaje del conjunto. En la figura mostrada ya se ha llevado a cabo la asignación de las partes del producto a los *tiles*, es por este motivo por los que éstos últimos no aparecen vacíos. En relación a esto, se comenta que, al principio, los *tiles* de la izquierda parecían estar vacíos, y también el *tile* final, debido a un problema en el dimensionado de las piezas dadas por el diseño. La necesidad de referenciar las partes con respecto al avión completo, algo muy común en el ámbito aeronáutico, provocaba que existieran piezas que ocupaban mucho más de lo requerido (pues incluyen un origen de coordenadas muy lejos de ellas), y esto se traducía en que el producto final se visualizaba muy pequeño. Se muestra un detalle de la figura anterior para aclarar esto (Fig. 39)



Fig. 39. Detalle de *manufacturing tile* final. Se puede apreciar la escala del producto con respecto al *tile*, provocando la apariencia de estar vacío éste último

Finalmente se consigue remediar esto editando los archivos de diseño, ocultando dos *sketches* que provocaban este desplazamiento del origen de algunas piezas. Tras la corrección de la visualización, la situación es como se muestra en las futuras figuras.

Una vez definidos los *scopes*, es preciso detallar la secuencia que permite formar cada uno de los subproductos principales. Se sigue para ello el orden ya descrito en el apartado anterior: Largueros horizontales, largueros verticales, mecanismos de anclaje y mecanismos de unión y parada. La creación de esta secuencia es trivial, sin más que crear cada *tile* mediante el comando de inserción de predecesor y ordenarlos de la forma deseada por *drag & drop*. Una vez creados los *tiles*, se asigna cada una de las piezas que van a ser montadas a cada casilla. Esto se hace de nuevo mediante *drag & drop*, y empleando la herramienta *B.I. Essentials* para asegurar una correcta asignación. Se muestra el empleo de esta herramienta en la figura próxima

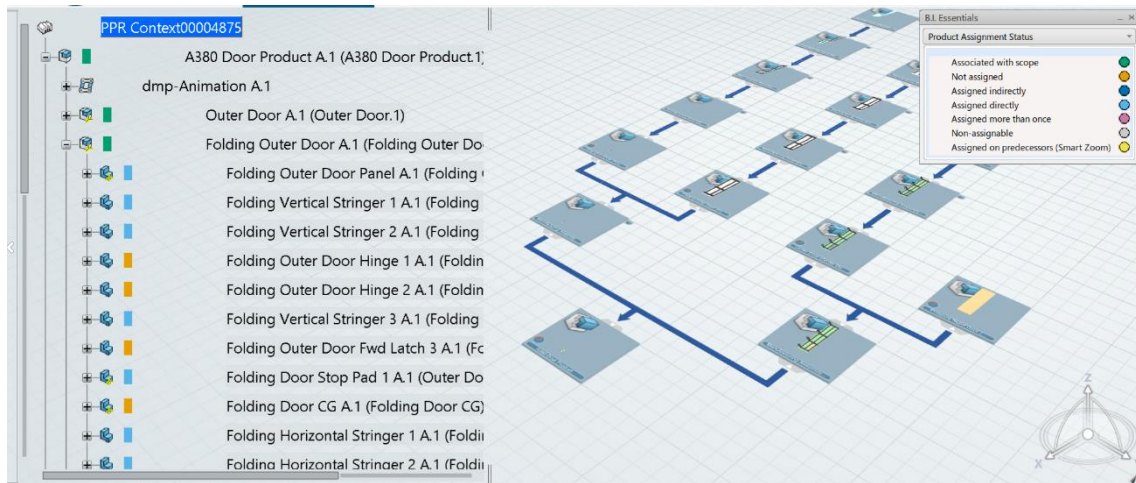


Fig. 40. Asignación de partes a tiles mediante B.I. Essentials

Como puede verse en la Fig. 40, el código de colores permite comprobar el estado de cada asignación de un vistazo: asignado por *scope* (verde), asignado manualmente una vez (azul) o no asignado (amarillo).

Puede apreciarse también como las bisagras (*hinges*) de la puerta auxiliar no han sido asignadas a ningún *tile*. Esto es intencionado, ya que como se comentó en la evaluación inicial, es necesario esperar a ensamblar cada subconjunto y posicionar la puerta exterior y la auxiliar entre sí antes de montar estas bisagras, y garantizar así la correcta unión y funcionamiento del conjunto completo.

No obstante, para proceder como se ha descrito, es necesario montar estos componentes de unión después de completar el ensamblaje de la puerta completa, esto es, en un *tile* situado después del *tile* que está vinculado al producto mediante el *scope*. Esto genera un error en el *software* a la hora de asignar las piezas restantes e impide finalizar correctamente el MBOM.

Ante este problema, se han barajado varias opciones, llegando finalmente a la conclusión de que es necesario eliminar el *scope* tras llegar al punto en el que se encuentra el proceso, y a partir de ahí finalizar el mismo sin las restricciones que este vínculo supone. Se entiende que el *scope* es una herramienta usada por el programa con el fin de facilitar la asignación posterior de las partes, y que en ningún caso es imprescindible mantenerlo de forma indefinida, por lo cual su eliminación queda justificada una vez que deja de ser de utilidad. Se desconoce si existe un método alternativo que permita la consecución del objetivo sin eliminar el *scope*, o si es posible realizar este procedimiento de forma más óptima.

Por tanto, se parte de la configuración que se tenía tras el empleo de *B.I. Essentials*, sin asignar las bisagras de la puerta auxiliar, como se muestra en la Fig. 41

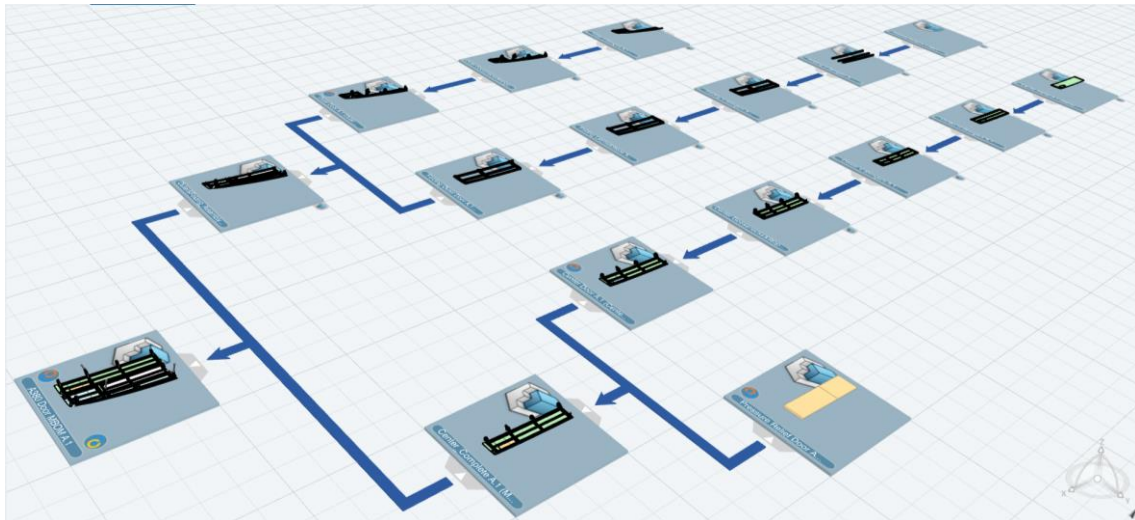


Fig. 41. MBOM antes de la eliminación de *scope*

A continuación, se elimina el *scope* de la puerta auxiliar, y esto permite asignar las piezas restantes al *tile* inmediatamente anterior al que contiene el producto final.

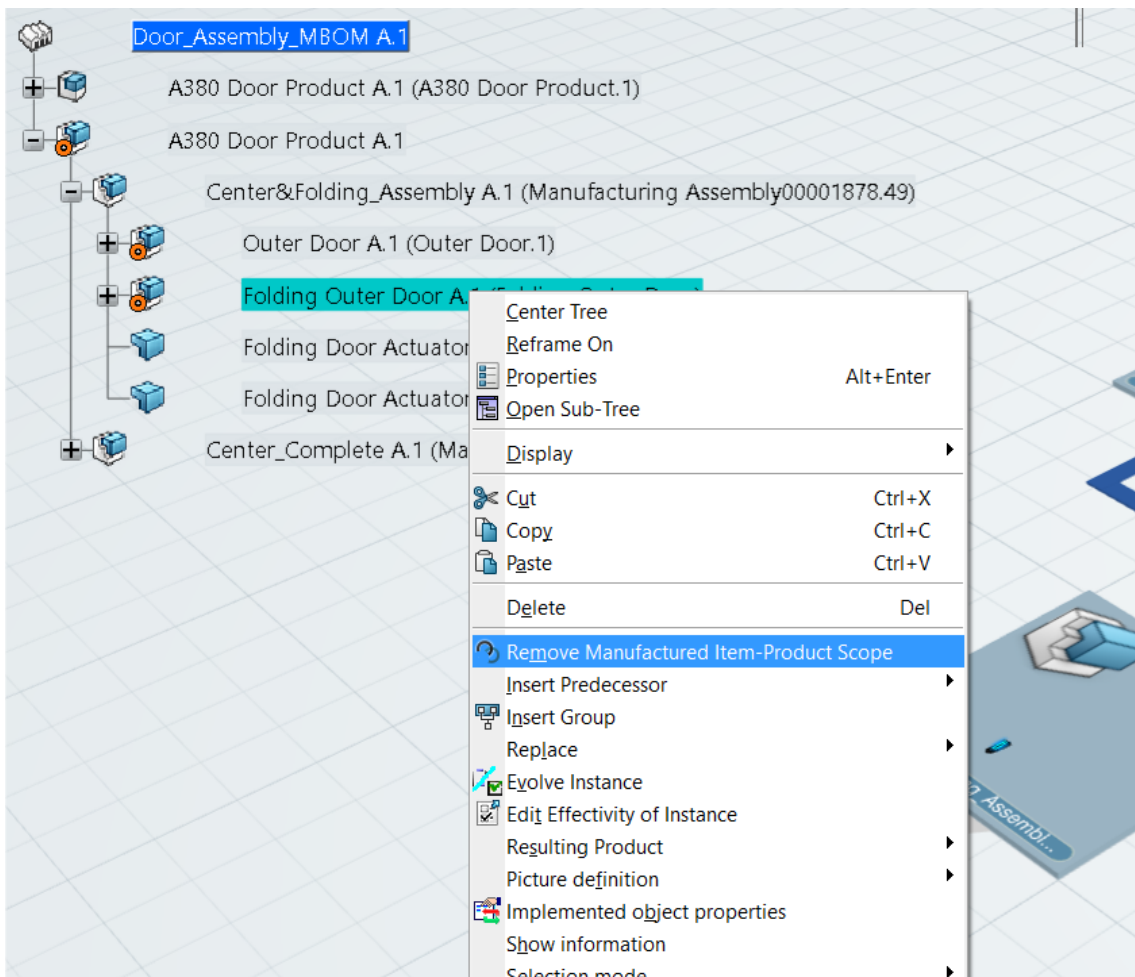


Fig. 42. Eliminación de *scope*

Tras eliminar el *scope*, todas las piezas asignadas a los *tiles* de la puerta auxiliar son eliminadas, y es necesario asignarlas de nuevo. En cualquier caso, la asignación es rápida y sencilla, no suponiendo gran diferencia de trabajo. No obstante, en caso de realizar un ensamblaje con un número de piezas mucho mayor, se aconseja tener claro desde el primer momento la ubicación y cantidad de *scopes*, para evitar rehacer fragmentos que de otro modo pueden dar lugar a improductividad y labores tediosas.

Una vez reasignadas las piezas, incluyendo las correspondientes a la unión entre puertas en el *tile* correspondiente, el *B.I. Essentials* arroja una información como la presentada en la Fig. 43

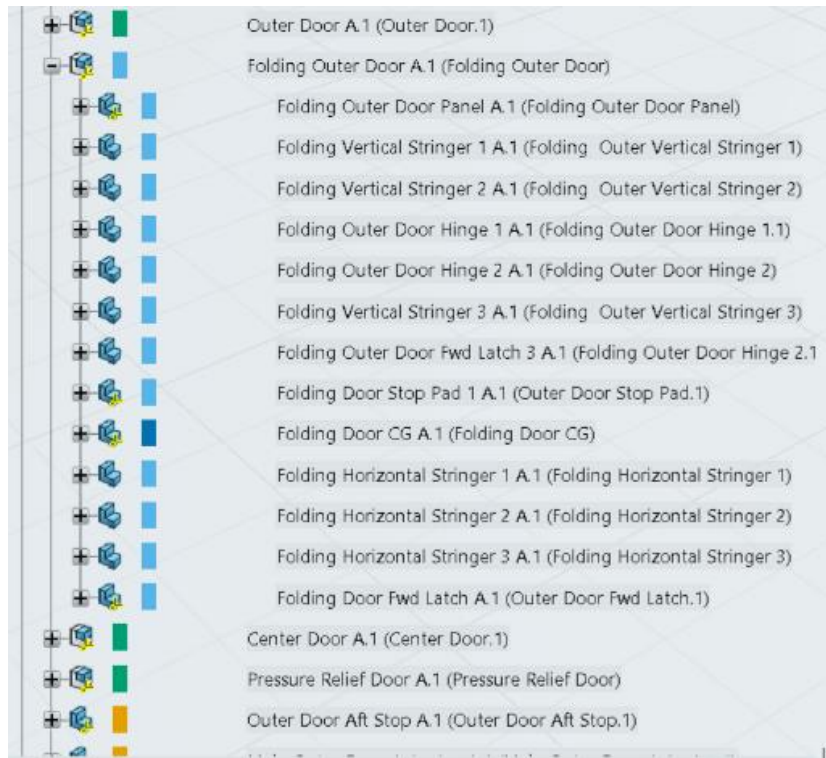


Fig. 43. Asignación tras eliminación de *scope*

Nótese como en el caso del subconjunto de la puerta auxiliar, la herramienta ha cambiado el color verde (asignación por *scope*) a azul (asignación manual). Además, fruto de esta asignación manual de un subconjunto, se crea una asignación indirecta de un componente, marcado en azul oscuro. Es un componente de diseño sin relevancia en el ensamblaje, pero se comenta con el fin de remarcar la labor de la herramienta.

Al mismo tiempo que se montan las bisagras, se realiza el montaje del cilindro actuador de la puerta, que permite el movimiento relativo entre subconjuntos. Este cilindro se encuentra por razones de diseño fuera de estos subconjuntos, con lo cual no presenta el problema del *scope* y puede ser asignado normalmente.

El MBOM completo queda entonces como se muestra en la Fig. 44. La estructura es esencialmente la ya comentada, únicamente alterada por la ausencia de uno de los *scopes*. Se recuerda nuevamente el hecho de que, por razones de diseño, las referencias de las piezas con respecto al origen de la aeronave dificultan la visualización del conjunto final ensamblado.

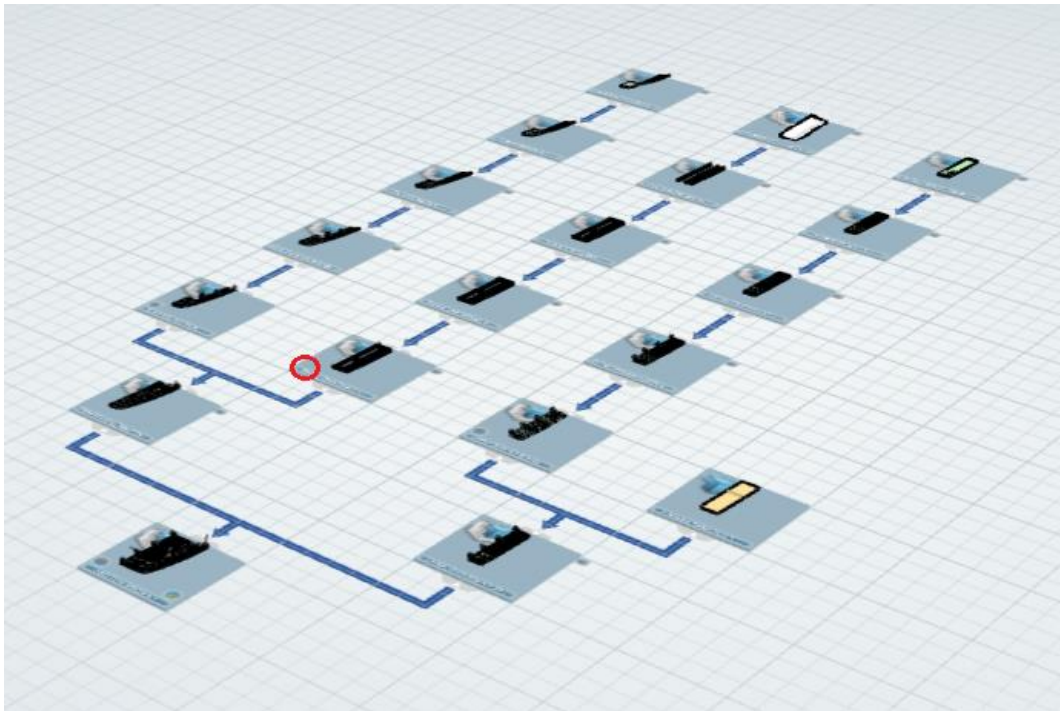


Fig. 44. MBOM final. Nótese la ausencia de *scope* en la puerta auxiliar

Queda por tanto totalmente determinado el MBOM. Esto supone la definición del nodo de proceso en el árbol PPSR, pudiendo construir, a partir del mismo, los nodos de sistema y recursos.

Antes de finalizar el presente apartado quiere realizarse un balance de los problemas encontrados durante la definición del MBOM. En el transcurso de dicha tarea, se dieron algunos errores de asignación en la plataforma, ya que debido a un error se sobrescribió un archivo de diferente tipo y supuso la pérdida del MBOM hasta ese momento definido. Con el fin de minimizar el impacto que equivocaciones de este tipo pudieran tener sobre el proyecto, se decide crear un capítulo en un catálogo que guarde la estructura del MBOM, de modo que ante una pérdida de datos la recuperación de los mismos pueda hacerse de forma ágil, y simultáneamente permite explorar las ventajas de este tipo de archivos en la aplicación. Se crea por tanto un catálogo personal, en el cual se inserta un nuevo capítulo, y en éste, la estructura del MBOM

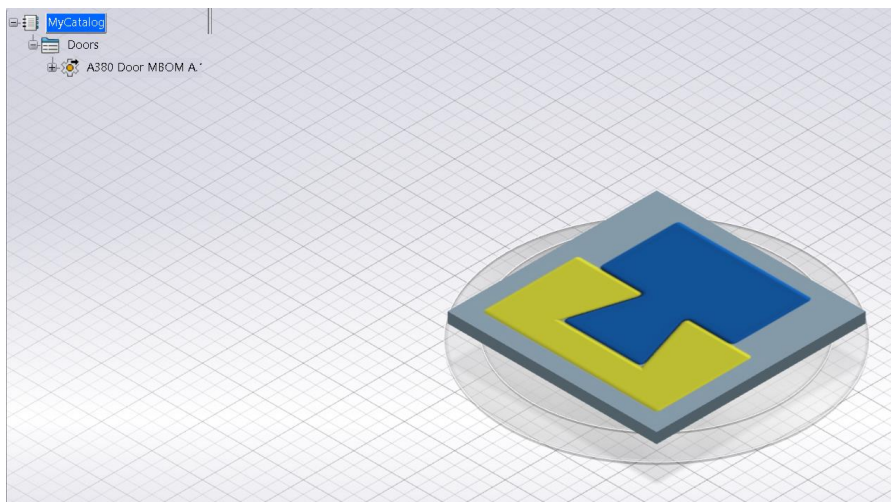


Fig. 45. Estructura del MBOM dentro del catálogo

3.5 Evaluación del MBOM

El apartado que sigue tiene como fin determinar la utilidad de la aplicación de Assembly Evaluation como mecanismo de inspección del proyecto en el que se está trabajando, persiguiendo verificar los pasos que se realizan antes de continuar en la labor de definir los diferentes nodos principales del árbol.

Para ello, se propone visitar la herramienta y revisar las posibles discrepancias que puedan existir entre el análisis inicial y la configuración existente una vez definido el MBOM. Del mismo modo, se quiere realizar una nueva asignación de los *tracks* anteriormente realizados, esta vez sobre elementos de *manufacturing* en vez de sobre piezas de productos. Este paso tiene como objetivo comprobar la factibilidad de la reutilización de *tracks*, determinar si el proceso puede ser hecho de un modo más o menos sencillo y poco tedioso, y por último discernir si esta operación supone alguna ventaja real en el proyecto.

Para el caso que nos ocupa, debido al hecho de ser un conjunto sencillo y con un número razonable de piezas, se crean las *tracks* correspondientes a cada una de las piezas que lo forman. Se ha intentado evitar el cruce de trayectorias por claridad en la visualización, si bien no es necesario ya que el montaje se hace secuencialmente y por tanto no existen colisiones entre trayectorias compartidas.

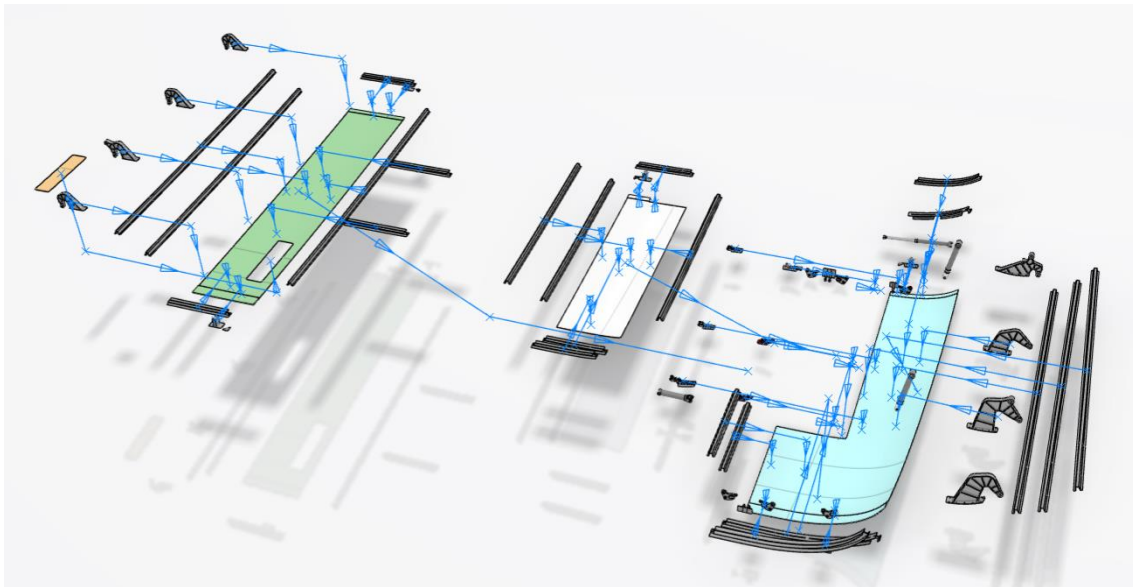


Fig. 46. Conjunto de *tracks* para ensamblaje completo

En la Fig. 46 se recogen todas las *tracks* creadas para dar lugar al ensamblaje del producto final. Como puede observarse, la definición de *tracks* supone crear al mismo tiempo un despiece del conjunto, de forma que proporciona una gran cantidad de información de forma instantánea.

Como ya se ha comentado, el hecho de tratarse de un conjunto sencillo y de fácil visualización supone que la secuencia de ensamblaje estuviera clara desde antes de emplear la herramienta. Esto supone que, a la hora de revisarla, se compruebe que no exista ninguna discrepancia en dicha secuencia tras la definición del MBOM. El método planteado es el óptimo que se ha alcanzado tras una reflexión previa, y por tanto se mantiene inalterable durante la realización del trabajo.

Sin embargo, quiere recalcar el hecho de que la presente aplicación es una de carácter académico y realizada por un único individuo. Como ya se ha expuesto, en caso de tener un conjunto de gran envergadura, solo abarcable mediante un equipo de ingenieros, la metodología seguida sería totalmente diferente. Tras la creación de unos primeros *tracks* en la evaluación inicial que permitiesen dar una idea general de cómo unas piezas se unen con otras, y la consecuente definición del MBOM, se realizaría una nueva iteración en el módulo de Assembly Evaluation. En éste, se llevarían a cabo la asignación de nuevas *tracks*, esta vez sobre elementos manufacturados, que contribuirían a completar poco a poco la simulación de ensamblaje. Simultáneamente, estas nuevas *tracks* tendrían el propósito de transmitir las directrices del departamento encargado de crear el MBOM al encargado del Process Planning, es decir, harían las veces de comunicación

entre departamentos de qué se ha tenido en cuenta a la hora de crear el MBOM, facilitando la comprensión entre miembros del equipo. La utilidad de este segundo uso de la aplicación queda por tanto demostrada.

Seguidamente, se quiere realizar un ejercicio que permita determinar el grado de facilidad a la hora de reutilizar *tracks*. Se pretende asignar las antes asociadas a elementos del nodo de producto (las partes) a elementos del nodo de proceso, esto es, a lo definido en el MBOM con anterioridad. Para ello, primeramente, se exportan las *tracks* creadas sobre las partes provistas en la evaluación inicial a un archivo .xml haciendo uso del comando correspondiente, y a continuación se importan dichas *tracks* sobre una nueva simulación en la cual está incluido el MBOM en el árbol PPR. De este modo se pretende determinar al mismo tiempo la utilidad de la exportación/importación de *tracks* dentro de la herramienta. Cabe destacar que la selección de elementos a exportar es individual, lo que hace el proceso algo tedioso para conjuntos grandes. Asimismo, se comenta que solo es posible exportar las *tracks*, pero no la secuencia de ensamblaje, con lo cual se pierde bastante información en el trasvase de *tracks* entre simulaciones.

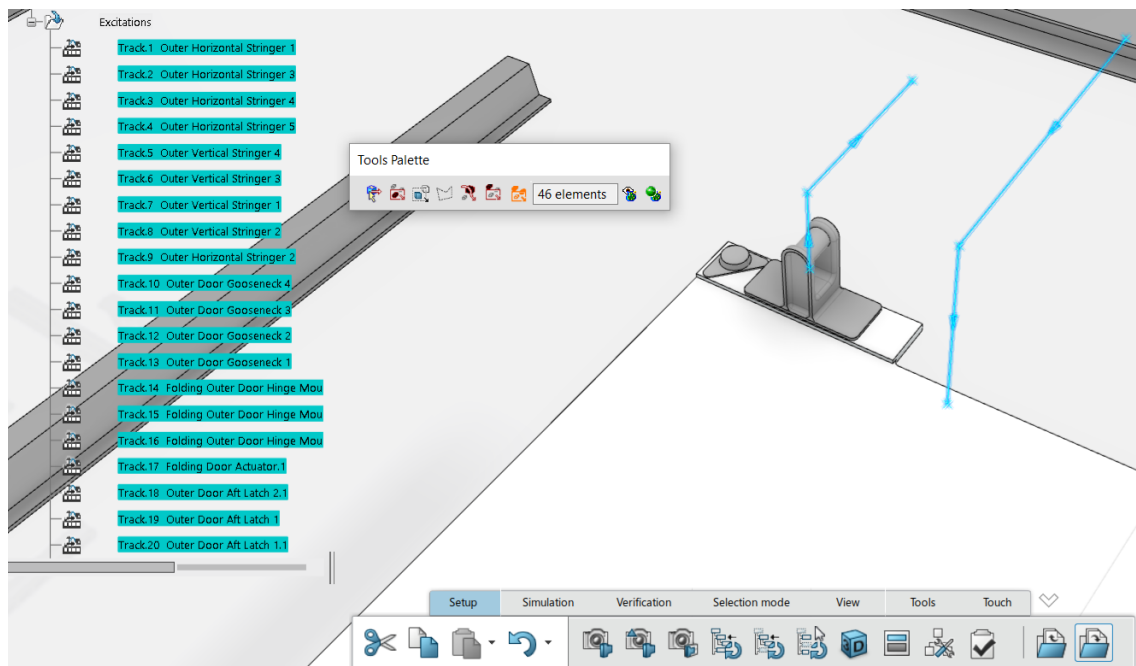


Fig. 47. Proceso de exportación de *tracks*

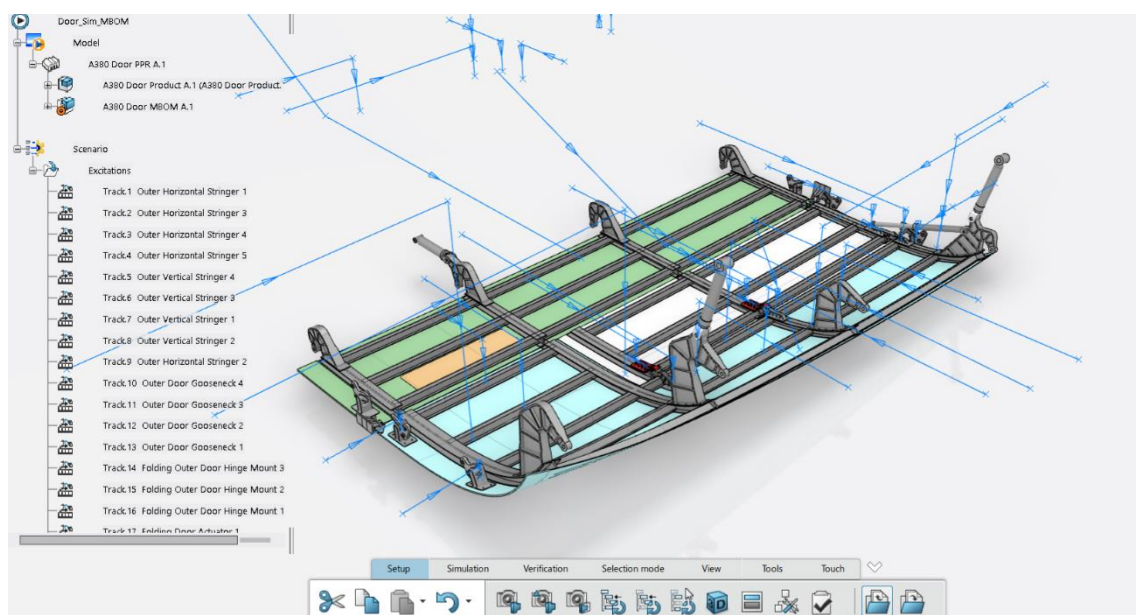


Fig. 48. Tracks importadas en la nueva simulación

Una vez importadas las *tracks* en la nueva simulación, se intenta reasignarlas de forma que estén vinculadas a los elementos que conforman el MBOM (esto es, los elementos del nodo de proceso) en vez de las partes físicas del producto. Esta asignación se creía únicamente posible realizarla de forma individual, necesitando por tanto hacer la operación tantas veces como piezas compongan el ensamblaje. Si bien en un conjunto como el que se está manejando la solución no es especialmente tediosa, en ensamblajes de grandes conjuntos con un elevado número de partes se antoja irrealizable. Esto último, unido a la pérdida de información debido a la incapacidad de transferir la secuencia de ensamblaje entre simulaciones hacen de este uso de la herramienta como forma de inspeccionar el correcto avance en la creación del árbol una labor muy costosa en términos de tiempo, y de poca utilidad real. Sumado a todo esto, una vez hecho uso de la herramienta, se comprueba que esta reasignación comentada no es siquiera posible, siendo la única forma de asignar *tracks* a elementos del MBOM la creación de cero de las mismas. Esto supondría rehacer por completo el trabajo realizado en la evaluación inicial, lo que confirma la postura de este uso de la herramienta como algo costoso temporalmente y poco útil.

Descartada la idea de importar/exportar *tracks* debido a su tedio, y no queriendo dar por finalizado el aspecto de reutilización de *tracks*, se barajan métodos alternativos para esto último. Tras varias reflexiones, se llega a la conclusión de que la reutilización de *tracks* es únicamente posible en caso de que se definan de forma secuencial, como ya se ha dicho anteriormente: definir unas primeras *tracks* que den una visualización más clara de lo que va a ensamblarse, definir posteriores trayectorias sobre elementos manufacturados una vez acabado el MBOM, y crearlas paulatinamente hasta llegar a la consecución de todas las *tracks* que compongan el producto, y su consecuente simulación. Durante este proceso se llevarían a cabo también refinamientos de las trayectorias ya definidas con el fin de garantizar que son las óptimas en cuanto a tiempo, recursos disponibles, y ausencia de colisiones. En una aplicación puramente académica, como la presente, en la cual la totalidad de las *tracks* se encuentran definidas desde estadios tempranos, la reutilización no es posible ni, en caso de serlo, útil.

Para terminar, se reitera el hecho de que, aunque en este caso concreto la evaluación del MBOM parece ser algo innecesario, es un proceso que parece tener bastante relevancia y utilidad en caso de contar con una aplicación real y a mayor escala.

3.6 Estudio previo del sistema de producción a implantar

El siguiente paso en la creación del árbol PPSR es la definición del nodo de sistema. Esto se consigue haciendo uso del módulo Process Planning, partiendo del MBOM. No obstante, antes de describir la metodología empleada para esta labor se cree conveniente realizar un pequeño inciso, con el fin de poner al lector en contacto con los distintos tipos de *layouts* existentes en la industria. Esta información permitirá justificar análisis y decisiones posteriores.

Una empresa de fabricación intenta organizar sus instalaciones en la forma más eficiente para servir a la misión particular de la planta. El tipo de organización o *layout* depende fundamentalmente de dos factores: El volumen de producción y la variedad de productos a fabricar. Estos dos factores están relacionados como se muestra en la Fig. 49.

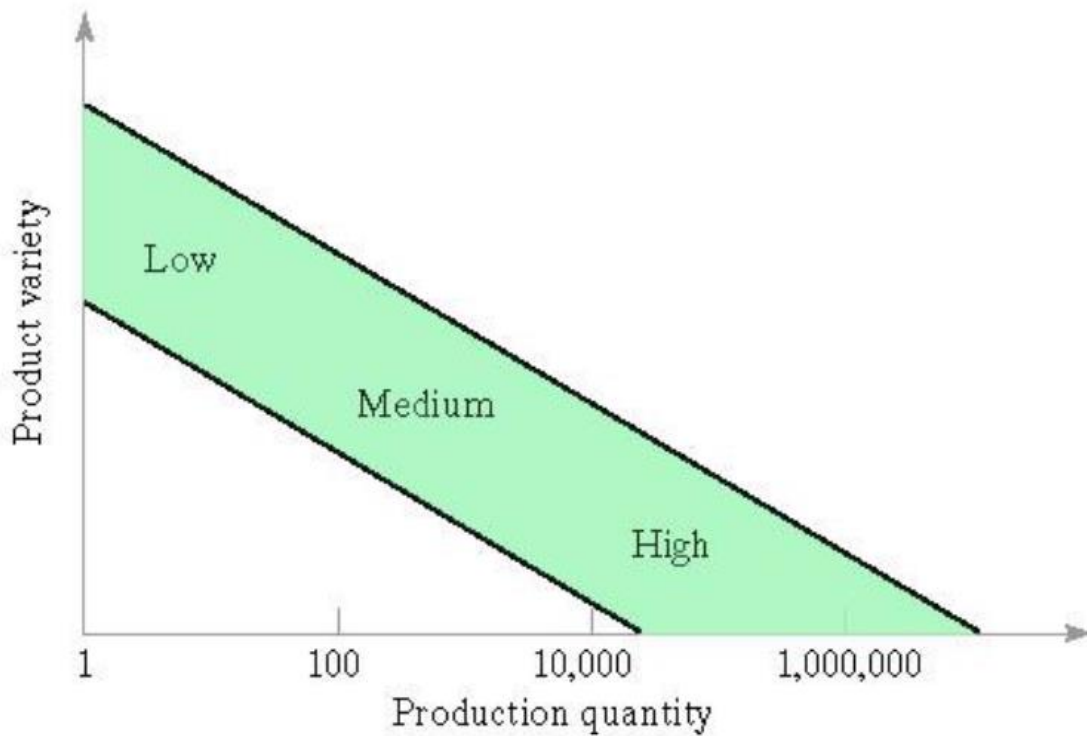


Fig. 49. Relación entre volumen de producción y variedad de productos en instalaciones de fabricación

Dependiendo de la ubicación en la que se encuentren estos dos parámetros para la empresa considerada, se opta por un *layout* u otro. Ejemplos de *layout* son las células de fabricación o fabricación celular, las líneas de producción (producción en masa), o las distribuciones de posición fija. Estas organizaciones de la planta pueden verse en el gráfico de la Fig. 50

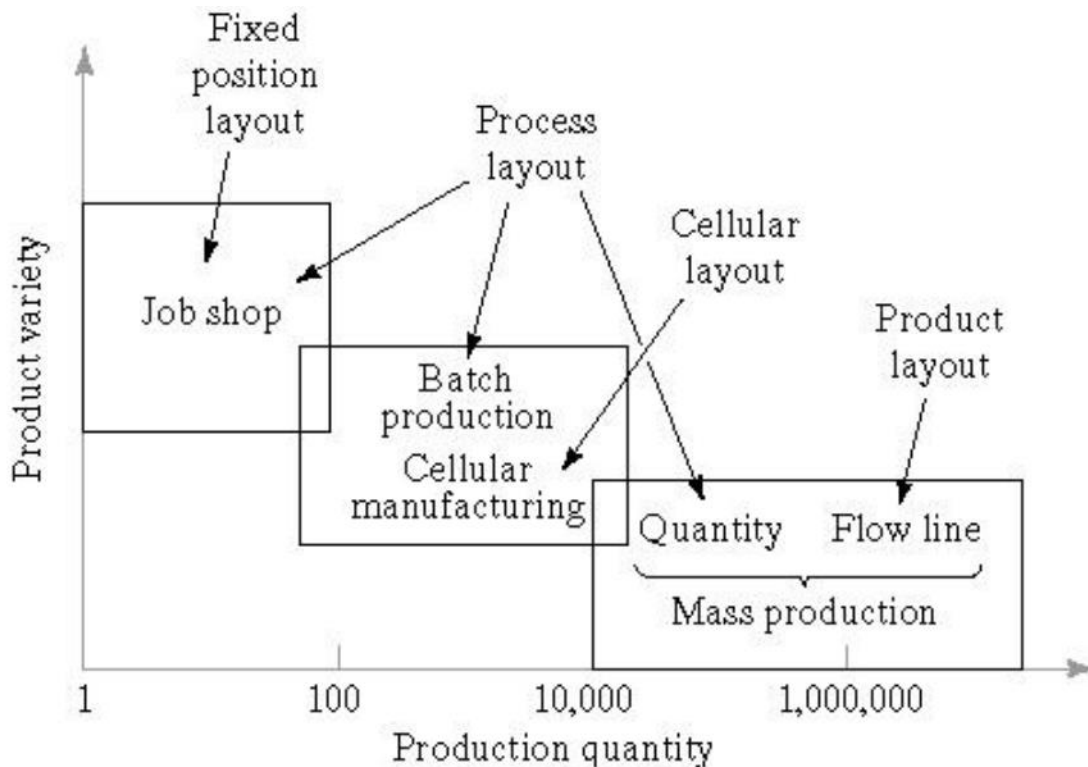


Fig. 50. Tipos de *layout* según los parámetros

Los ejemplos que se han realizado a la hora de completar los tutoriales para adquirir los conocimientos acerca del *software* han sido siempre para producciones que siguen una organización de fabricación celular o por lotes, esto es, para empresas dedicadas a producir un volumen medio de productos y con cierta variedad. Este *layout* permite ciertos análisis como el equilibrado de la línea o el establecimiento del número óptimo de estaciones a la hora de realizar la fabricación de los productos.

Sin embargo, en la aplicación práctica que se ha elegido el carácter de la empresa es bien distinto. Se trata de un producto elemental de corte aeronáutico. Esto supone que el volumen de producción que se maneja es mucho menor, y que existe una gran variedad de productos (prácticamente cada producto fabricado es diferente, debido a las exigencias de personalización del cliente). Las empresas dedicadas al mundo aeronáutico se mueven claramente en el entorno más próximo a los ejes coordenados de la gráfica presentada, esto es, la distribución más adecuada para su producción es el *layout* con producto fijo.

La distribución aeronáutica por excelencia es la línea de ensamblaje final (FAL, de *Final Assembly Line*). En ella, los grandes subconjuntos, compuestos de multitud de piezas (denominadas elementales) se ensamblan a lo largo de varias estaciones que tienen como *layout* uno de posición fija. Estos subconjuntos son habitualmente fabricados y ensamblados en fábricas diferentes, a cargo de empresas subcontratadas [9] por la empresa matriz o tractora encargada del avión completo (en la actualidad, status copado en su mayor parte por Airbus o Boeing), y posteriormente trasladados a las instalaciones donde se realiza este ensamblaje final. En ellas, la aeronave va recorriendo las diferentes estaciones, y los recursos y subconjuntos acuden a ella para conformar el conjunto completo. Ejemplos de grandes subconjuntos son el grupo alar, el fuselaje, o el empenaje o sección de cola.



Fig. 51. Ejemplo de FAL. Instalaciones de Everett, Washington, durante el ensamblaje del Boeing B787

Debido a la falta de tiempo y el limitado alcance de este proyecto, se abandona la idea de considerar un proceso completo de FAL. En su lugar, se entra en el supuesto de realizar la labor equivalente a una empresa subcontratada por Airbus, encargada del ensamblaje del subconjunto de las compuertas del tren de aterrizaje del A380. Este subconjunto sería después transportado a las instalaciones principales de Airbus, en las cuales se llevaría a cabo la integración del mismo en la aeronave completa. La simulación de esto último implica una gran cantidad de tiempo y recursos, y se contempla únicamente como un posible trabajo futuro, como se detalla en el apartado correspondiente.

Este supuesto implicaría inicialmente una organización de la planta con una única estación, en la cual se situaría el producto, y sobre la cual irían entrando y saliendo los recursos necesarios para producir el subconjunto del avión. Conceptos como número óptimo de estaciones o equilibrado de líneas carecerían, por tanto, de sentido. Los análisis que, en su caso, habrían de realizarse son de otra índole, por ejemplo, el número adecuado de trabajadores en la estación y la distribución del trabajo entre ellos.

De lo anterior se deduce que el nodo de sistema debería constar de un único *tile* en el cual se recojan todas las operaciones que definen la secuencia completa de ensamblaje. Si bien esto parece ser lógico, para conjuntos con un número elevado de elementos parece un tanto confuso a la hora de usarse para otros fines. Este motivo suscita la necesidad de contemplar diferentes estructuras para el *layout* de la factoría. Modelos como el nuevo A350XWB han optado por seguir una distribución en planta compuesta por varias estaciones, en una especie de “mini FAL”, presentando ventajas con respecto a la tradicional estación única. Ejemplo de esto es la planta de Airbus en Broughton (Gales), en la cual se lleva a cabo la integración del grupo alar completo de dicha aeronave [10].



Fig. 52. Instalaciones de Broughton (Gales) en las que se produce la integración del grupo alar del A350XWB

El hecho de contemplar esta alternativa supone redefinir el rol seguido en la labor de este proyecto. El primero de los casos se lleva a cabo de acuerdo al papel ya expuesto, en el cual el alumno hace una tarea similar a la realizada por una empresa subcontratada por la empresa tractora, que envía el subconjunto a ésta para su ensamblaje final. Las dos siguientes, que se detallarán a continuación, implican que la labor realizada en el proyecto se equipara a la llevada a cabo por la empresa matriz, pero en una línea de ensamblaje que integra grandes subconjuntos, y no el producto final, como el ejemplo anteriormente citado. Se tratan por tanto de líneas intermedias, que envían los subconjuntos ya montados a la verdadera FAL.

Por tanto, el primer escenario se conforma como se acaba de exponer: Un único *tile* haciendo referencia a la única estación que existe en la planta, y que recoge todas las operaciones que en ella se realizan. Los otros dos escenarios corresponden a los posibles en una “mini FAL”: se considera un sistema definido por varios *tiles*, correspondientes a cada uno de los subproductos, y que recogen las operaciones correspondientes a cada uno de ellos; y un sistema definido por tantos *tiles* como operaciones existen en el ensamblaje.

3.6.1 Primer Caso: Sistema con una sola estación

Como se ha comentado, en primer lugar, se pretende estructurar el nodo de sistema mediante un único *tile*. Esta decisión surge de establecer una correspondencia directa entre *tiles* de sistema y estaciones de trabajo. Se considera que existe un útil adecuado para llevar a cabo el posicionamiento relativo de los elementales y las operaciones sobre ellos.

Aunque a priori parece una opción lógica, pronto se comprueba que en la práctica no es el mejor de los planteamientos propuestos. El *software* empleado parece estar desarrollado claramente para aplicaciones con varios *tiles*, esto es, lo que corresponde con células de fabricación. Por tanto, el uso de un único *tile* en el cual colocar todas las operaciones supone una serie de desventajas. Presenta en primer lugar un problema visual: la gran cantidad de operaciones contenidas en la misma casilla suponen un cierto desorden en la presentación de la información y dificultan la comprensión del proceso. Además, no es posible realizar grupos dentro de un mismo *tile*, con lo cual este problema no puede ser subsanado. En la Fig. 53 puede comprobarse que la asignación de las operaciones sería imposible sin hacer uso del varias veces citado *B.I. Essentials*, y aún con la ayuda de esta herramienta la información suministrada en pantalla es confusa.

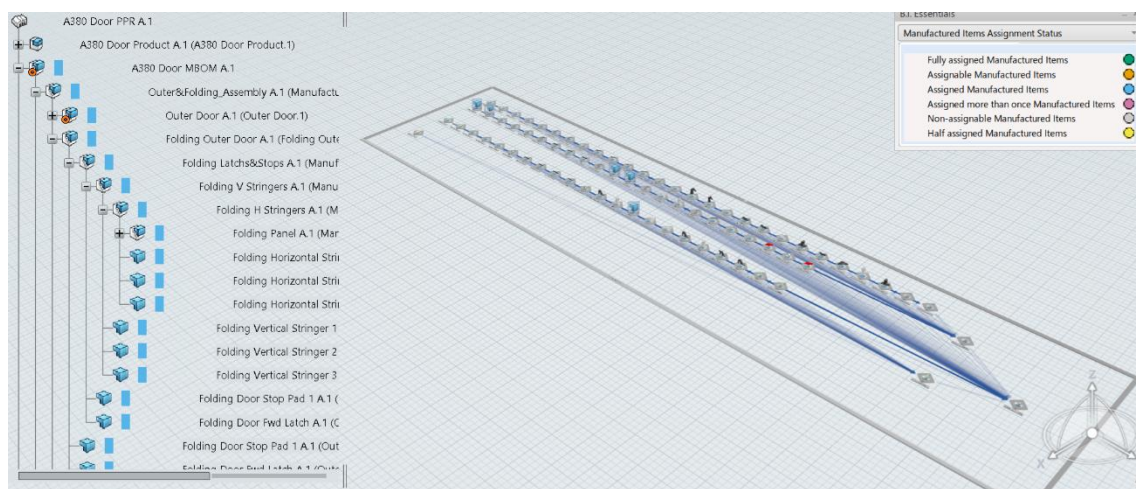


Fig. 53. Operaciones en un único *tile* de sistema

Por otra parte, la secuencia de ensamblaje no se hereda del MBOM, lo que implica rehacer el proceso en el sistema. Además, la labor de reordenamiento de las operaciones es más tediosa y propensa a fallos, habiendo sido necesario empezar de cero la misma en varias ocasiones hasta lograr la distribución final.

Por último, al existir una única estación no tiene sentido realizar un equilibrado de la línea y por tanto no es posible distribuir y optimizar el reparto de carga de trabajo. El empleo de más de un *tile* permitiría repartir la carga de trabajo entre operarios dentro de la estación, lo que implica un análisis más rico de la aplicación presentada.

Todos estos motivos llevan a descartar este planteamiento como válido a la hora de definir el nodo de sistema.

3.6.2 Segundo Caso: Estaciones solo para el ensamblaje de grandes subconjuntos

En este caso, se plantea un nodo de sistema compuesto por varios *tiles*, cada uno de los cuales agrupa las operaciones a realizar en cada gran subconjunto (puerta) que conforman el ensamblaje completo. De este modo se pretende dotar al entorno de mayor claridad a la hora de trabajar, y permitir una cierta flexibilidad para realizar análisis posteriores como la distribución de las tareas entre trabajadores. Se pretende por tanto crear un sistema de varias estaciones en las cuales se ensamblen los principales subconjuntos que forman el producto, y su posterior integración. Se tiene así una línea de ensamblaje intermedia, similar a la que podría darse para la integración de fuselaje, cabina, alas o empenaje, de forma que una vez acabado, el producto forme parte de los elementos principales de la auténtica FAL.

Para la creación de este segundo escenario se ha creído innecesario construir un sistema de *scopes* a distintos niveles como el realizado en la definición del MBOM. Por tanto, se crea un único *scope* global entre el sistema y el MBOM, y a continuación se procede a detallar la estructura de los *tiles* en el sistema

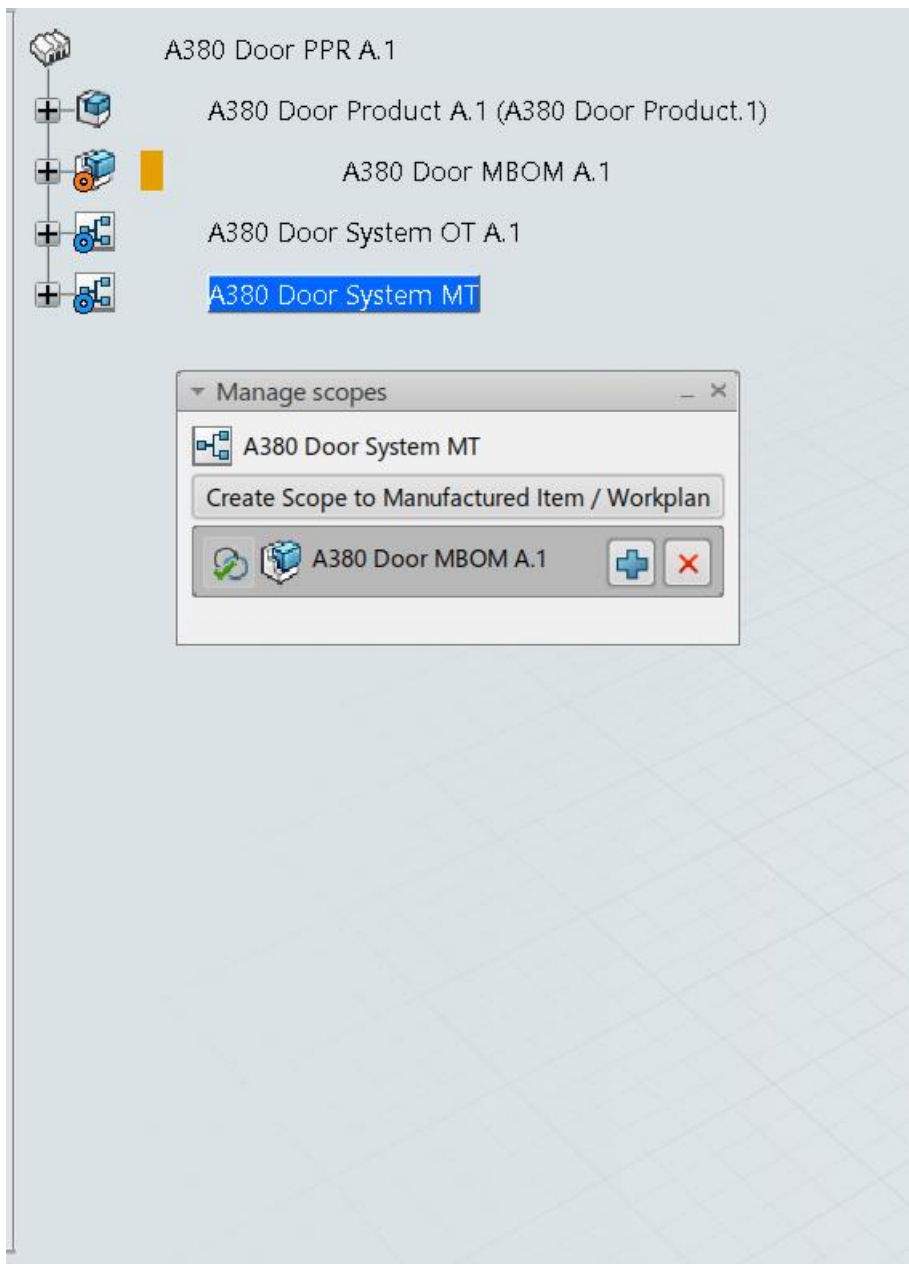


Fig. 54. Definición de *scope* para el segundo caso

A raíz de la figura presentada (Fig. 54) se comenta que se ha querido representar los tres casos de estudio en un mismo árbol PPR por comodidad a la hora de realizar los procesos de asignación, y también por facilidad para comparar las ventajas e inconvenientes de cada uno sobre el resto y así determinar el planteamiento óptimo. En relación a esto, se denomina cada caso con un distintivo o etiqueta, a saber: OT (*one tile, tile único*), MT (*main tiles, tiles para los principales*), o ET (*each tile, tiles para cada operación*).

Tras la creación del *scope*, se define la estructura principal del sistema, donde serán asignadas las operaciones. Se lleva a cabo el ya conocido método de creación y reordenación mediante *drag & drop*.

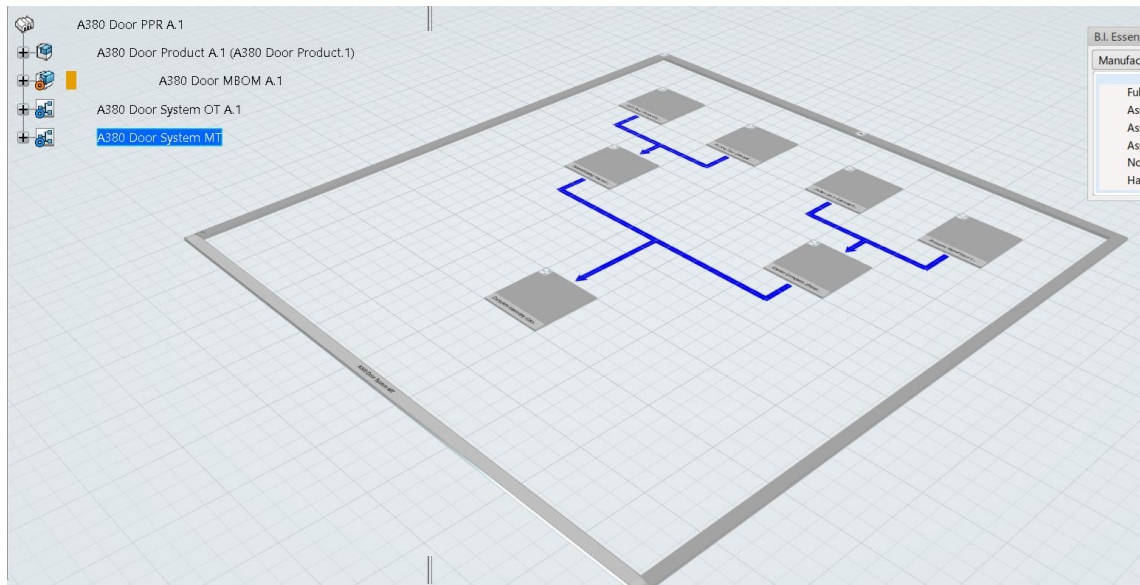


Fig. 55. Estructura principal de *tiles* para el segundo caso

En la Fig. 55 se muestra el sistema en este segundo planteamiento. Nótese los distintos *tiles* aunando las operaciones para cada subproducto, pero contenidos en un *tile* global que representa la factoría. En esta situación se ha creado también el flujo de producto mediante la herramienta pertinente. La figura permite observar también como el empleo de la herramienta *B.I. Essentials* es independiente entre sistemas. Al estar trabajándose sobre el sistema del segundo caso, identificado con MT, la asignación de elementos del MBOM al sistema se “reinicia”, como puede verse por el código de color junto al nodo de proceso. Esto permite crear varios sistemas en el mismo árbol PPR sin que el *software* interprete una asignación múltiple de los elementos del MBOM, y facilita la labor del usuario de cara a futuras inconsistencias.

En cuanto a la propia estructura del sistema, éste se compone de siete *tiles*: Los cuatro situados en el nivel más bajo de la secuencia corresponden a cada uno de los grandes subconjuntos (puerta exterior, puerta auxiliar y puerta central), y a la puerta para alivio de presión ya comentada en el apartado de descripción del producto. En el nivel intermedio se realiza la integración de la puerta exterior y la auxiliar, y el montaje de la puerta de alivio de presión en la puerta central. El nivel más alto corresponde al posicionamiento relativo de las dos partes diferenciadas del producto, quedando finalizado y listo para su transporte a las instalaciones de la FAL.

Como acaba de comentarse, el programa realiza un reinicio de las asignaciones una vez se cambia de sistema. Esto implica que las operaciones han de volver a ser asignadas en este nuevo caso. Las operaciones se asignan a *tile* correspondiente a su subconjunto, lo que permite visualizar de un modo más claro la información mostrada. En este planteamiento es posible realizar grupos, pero solo entre los diferentes *tiles* que conforman el sistema. Puesto que se considera que cada *tile* es claramente independiente de los demás (son grandes subconjuntos que son ensamblados al término del proceso), no se cree necesario crear ningún grupo. Haciendo uso de la ayuda prestada por *B.I. Essentials*, y tras la asignación de operaciones, la situación del sistema es la que se muestra seguidamente en la Fig. 56

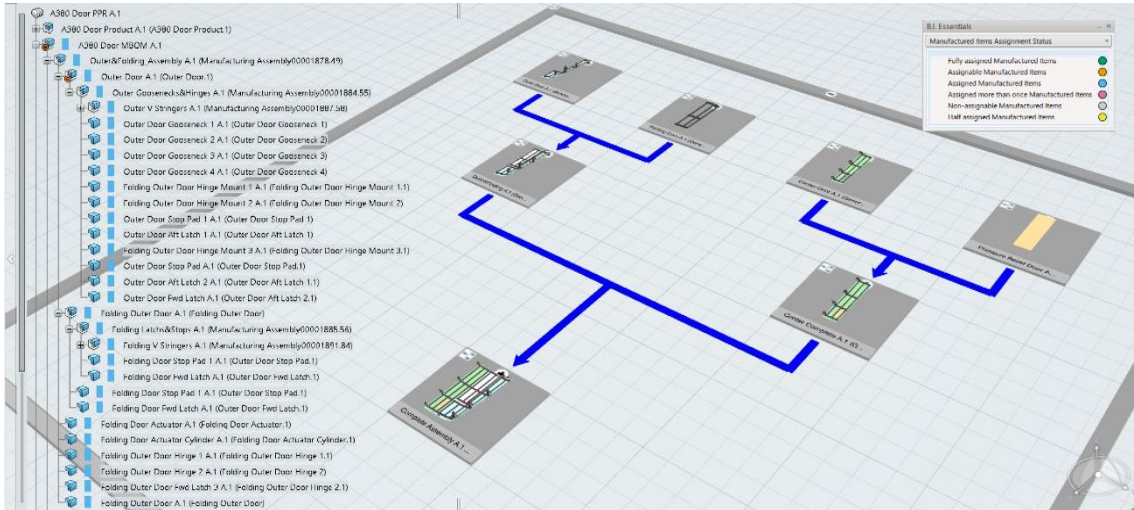


Fig. 56. Sistema completo para varios *tiles*

Como puede verse, la información se presenta en la interfaz de forma clara, manteniéndose la estructura básica, de modo que es posible comprender a simple vista el orden lógico de las operaciones precisas para conseguir obtener el producto final. Cada conjunto de operaciones se encuentra contenido en su correspondiente *tile*, haciendo las veces de grupos. La expansión de los conjuntos, si bien puede parecer confuso en un principio, presenta un número de operaciones por estación razonable.

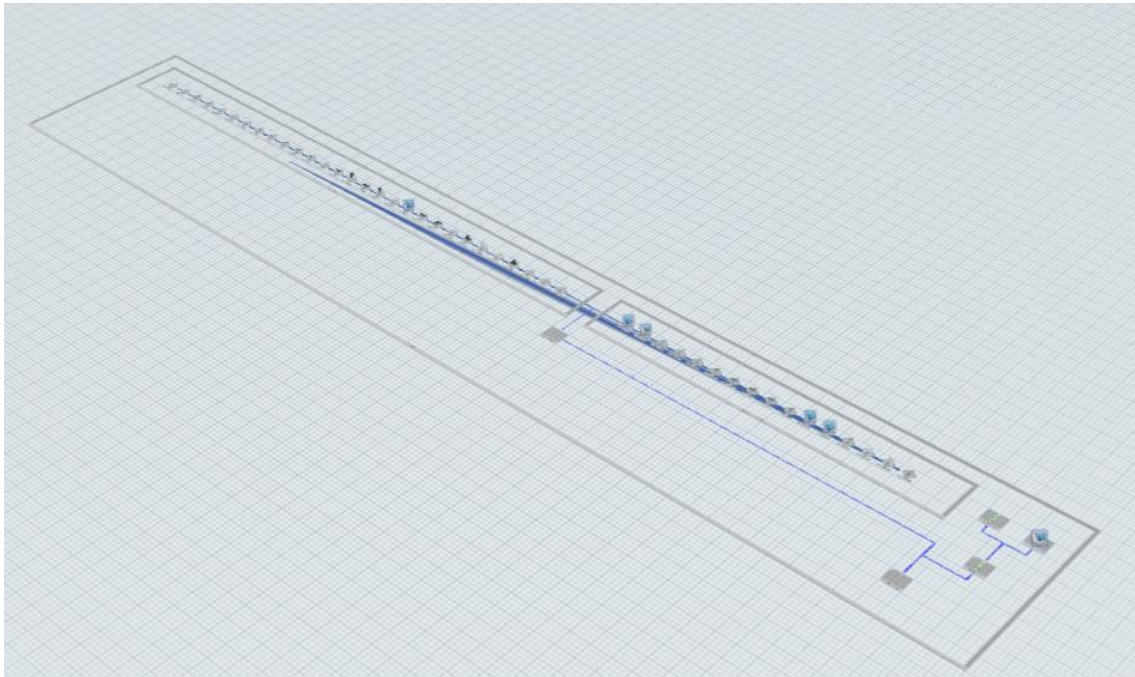


Fig. 57. Segundo sistema con *tiles* expandidos

Se puede comprobar que este segundo procedimiento cumple los objetivos perseguidos. El sistema, en forma compacta, presenta de forma clara y concisa la información acerca del ensamblaje, y la distribución en varias casillas hace posible analizar aspectos más específicos como el equilibrado de carga de trabajo.

No obstante, con el fin de determinar el mejor escenario posible para la realización de este proyecto, se propone un tercer caso compuesto de tantos *tiles* como conjuntos menores de operaciones existen en el montaje. De este modo, se puede hacer uso de la herramienta de grupos y es posible llevar a cabo un análisis más fino de la distribución de tareas.

3.6.3 Tercer Caso: Múltiples estaciones

El último planteamiento propuesto consta de una mayor cantidad de *tiles*. Parece lógico pensar que, a mayor número de casillas, más facilidades tendrá el usuario a la hora de trabajar con el *software* y mejores serán los análisis realizados, permitiendo por tanto una mejor interpretación de éstos y una mayor seguridad en cuanto a toma de decisiones en la factoría. Este razonamiento lleva inicialmente a concebir un sistema en el cual cada operación es asignada a un *tile* de sistema. Sin embargo, se cree que un número tan elevado de casillas podría ser contraproducente y provocar un alejamiento de la idea de claridad y concisión que se quiere a la hora de mostrar la información en pantalla. Además, no siempre tiene sentido asignar una única operación a una casilla de sistema, ya que una de las funciones de las mismas es precisamente agrupar operaciones. Si bien podría paliarse mediante el uso de grupos y subgrupos, se cree una labor más tediosa que la alternativa que se propone a continuación.

En este tercer caso, como se ha dicho, el número de *tiles* de sistema se incrementa notablemente con respecto al segundo caso considerado. No obstante, y para no incurrir en los inconvenientes ya citados de asignar a cada casilla una única operación, se propone una solución de compromiso entre estas dos premisas. Para ello, se razonan, de acuerdo a la estructura que sigue el proceso de ensamblaje, un conjunto o *cluster* de operaciones, que son las que van a ser asignadas a los *tiles*. Estos *clusters*, con pequeñas variaciones, son comunes a cada subconjunto y pueden entenderse si se ha comprendido cómo se realiza el ensamblaje del conjunto completo, ya expuesto en apartados anteriores. Son los siguientes: Posicionamiento del panel, instalación de los largueros horizontales, colocación de los largueros verticales, montaje de elementos de anclaje, y ensamblaje de elementos de unión y protección. Esta secuencia puede verse reflejada en la Fig. 58. En ella se han creado todos los *tiles* necesarios para alojar a los *clusters*, y el flujo de producto que hace posible la obtención del conjunto acabado.

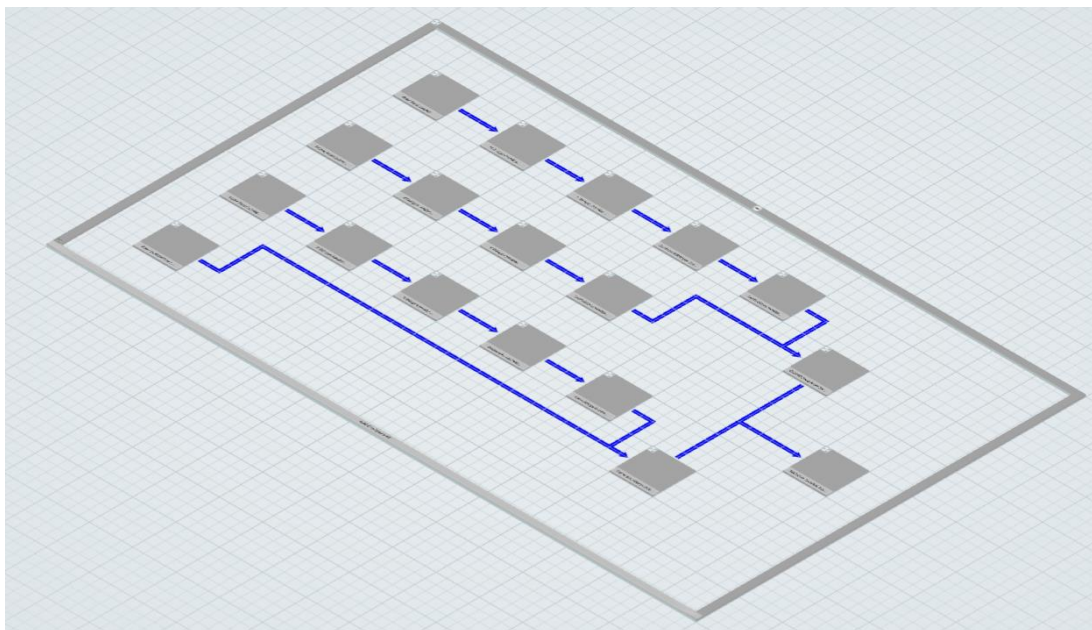


Fig. 58. Estructura básica del sistema para el tercer caso

Como puede verse, la estructura ideada posee un número de *tiles* que se sitúa en un punto intermedio entre concisión y extensión innecesaria. Permite estudiar el proceso con un mayor grado de detalle que el segundo caso, pero no expone la información de un modo tan extenso que resulte confuso a primera vista. Además, en caso de querer condensarse, siempre es posible recurrir a la herramienta de creación de grupos, consiguiendo una situación similar al segundo caso en cuanto a sencillez en la interfaz, sin perder por ello las ventajas que un mayor número de casillas suponen en los diversos aspectos ya citados. En este caso los grupos no son más que subsistemas que aúnan los diferentes *clusters* en subconjuntos mayores.

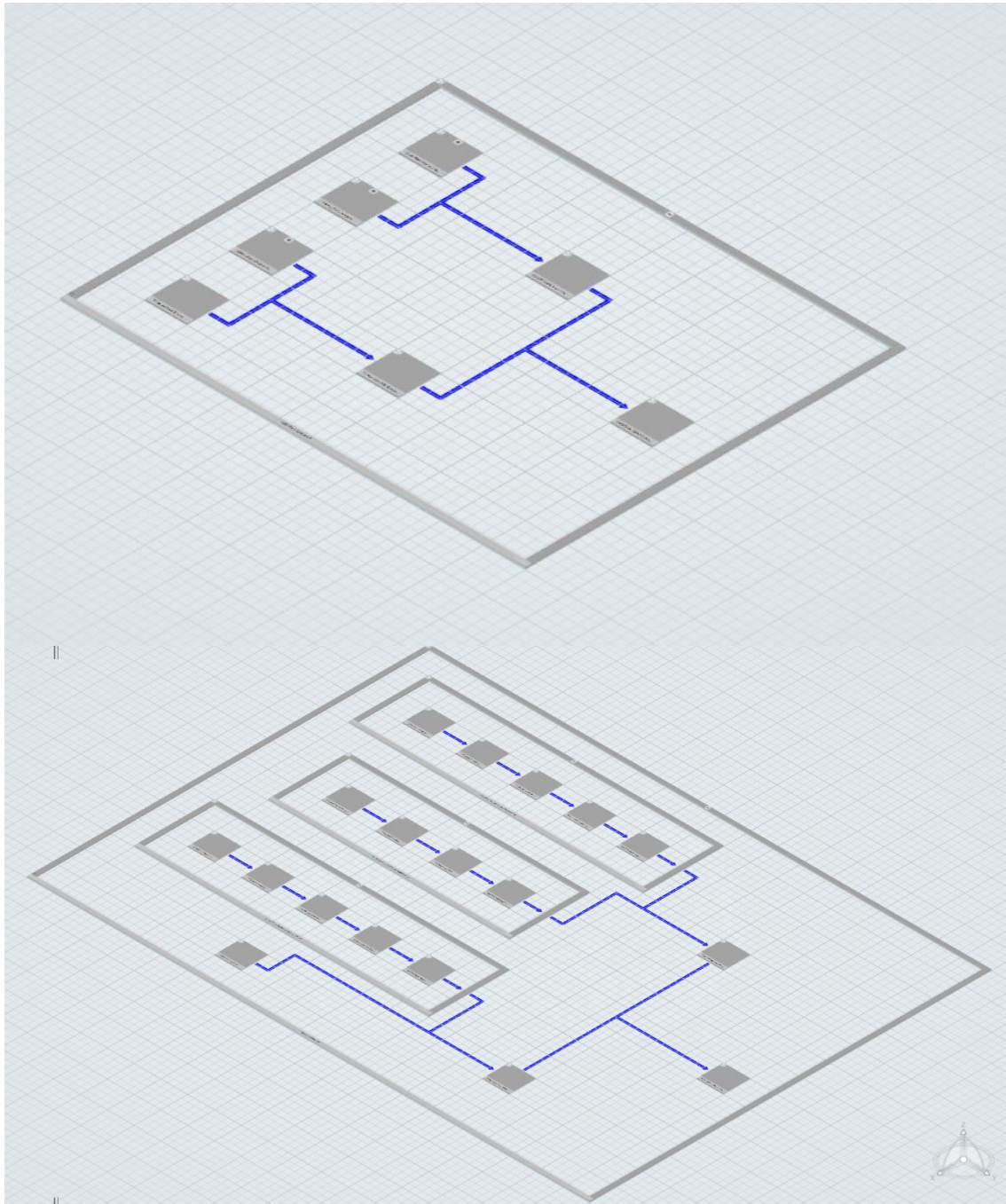


Fig. 59. Sistema con grupos principales contraídos (arriba) y extendidos (abajo)

Los beneficios son claros: Es posible compactar o expandir la estructura a voluntad, de modo que puede elegirse en todo momento con qué grado de detalle se desea estudiar el sistema.

Volviendo a lo comentado con anterioridad en relación a los roles seguidos, este caso corresponde a la creación de una línea de ensamblaje en la que cada subconjunto también es ensamblado en varias estaciones. Cada una de las puertas es montada siguiendo una secuencia de estaciones, y éstas se integran entre sí en las estaciones finales.

Una vez definida la distribución, ha de realizarse la habitual asignación de elementos del MBOM a los *tiles*. Esto define las operaciones y completa el sistema. Como es ya sabido, se hace uso de *B.I. Essentials* para facilitar esta labor.

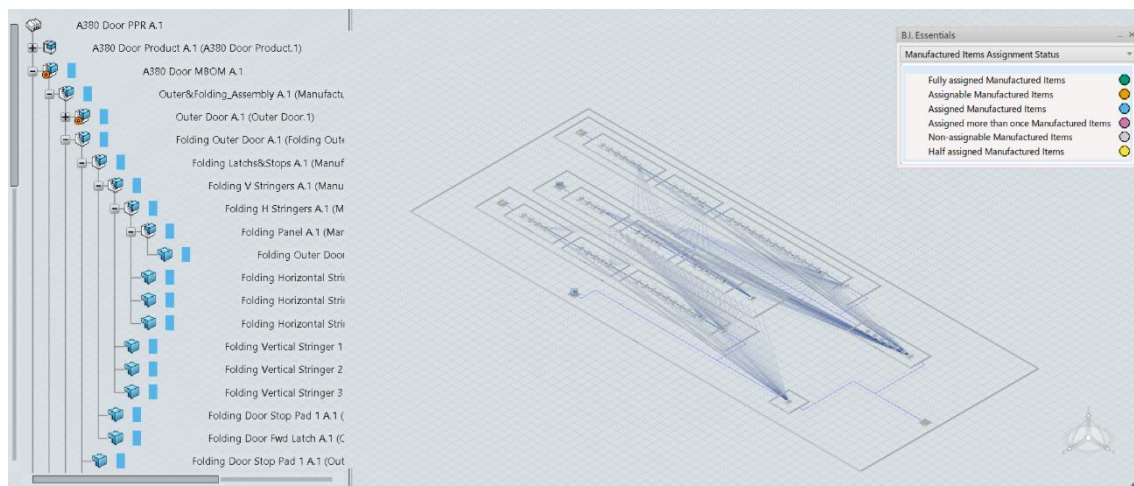


Fig. 60. Sistema tras la asignación de elementos de MBOM

Como puede observarse, la creación de las operaciones y la presentación de las mismas de forma totalmente expandida supone una situación de confusión similar a la ocurrida en los escenarios anteriores. Se pone de manifiesto nuevamente la gran utilidad de la capacidad que presenta este planteamiento para contraer o expandir conjuntos de operaciones a distintos niveles, otorgándole una gran flexibilidad.

A pesar de las ventajas presentadas, se considera que este último caso se aleja de la distribución real de este tipo de aplicaciones. Aunque puede considerarse el caso de una línea de ensamblaje intermedia para grandes subconjuntos de una aeronave completa, está claro que los elementales que conforman estos subconjuntos se ensamblan de acuerdo a un *layout* de producto fijo, en una sola estación. La consideración de un ensamblaje de elementales, subconjuntos y producto final mediante líneas de producción implica acercarse a la distribución propia de factorías encargadas de fabricación de productos en masa o por lotes, que difieren claramente de lo perseguido en esta aplicación.

Es por ello que se opta por considerar el segundo caso como escenario óptimo para la definición del sistema.

3.7 Definición del sistema de producción

Una vez escogido el escenario sobre el cual ha de definirse el nodo de sistema del árbol PPSR, se pasa a la creación del mismo mediante el empleo del módulo ya citado, Process Planning. Puesto que para realizar la comparación entre planteamientos del apartado anterior era necesario insertar los *tiles* de sistema, organizarlos según la estructura deseada y asignar las operaciones, el nodo de sistema ya está prácticamente conformado. Con el fin de definirlo totalmente, se recurre al diagrama de Gantt del sistema. Para ello, se definen las relaciones entre operaciones dentro de cada subconjunto principal y se asignan los tiempos necesarios para cada una de las operaciones, que definen conceptos clave en cualquier planta, como el tiempo de ciclo o el *takt time*. Dado que no es el objetivo de este proyecto realizar un análisis detallado ni realista de los tiempos de producción, se han elegido valores simples aproximados para cada una de las operaciones de ensamblaje.

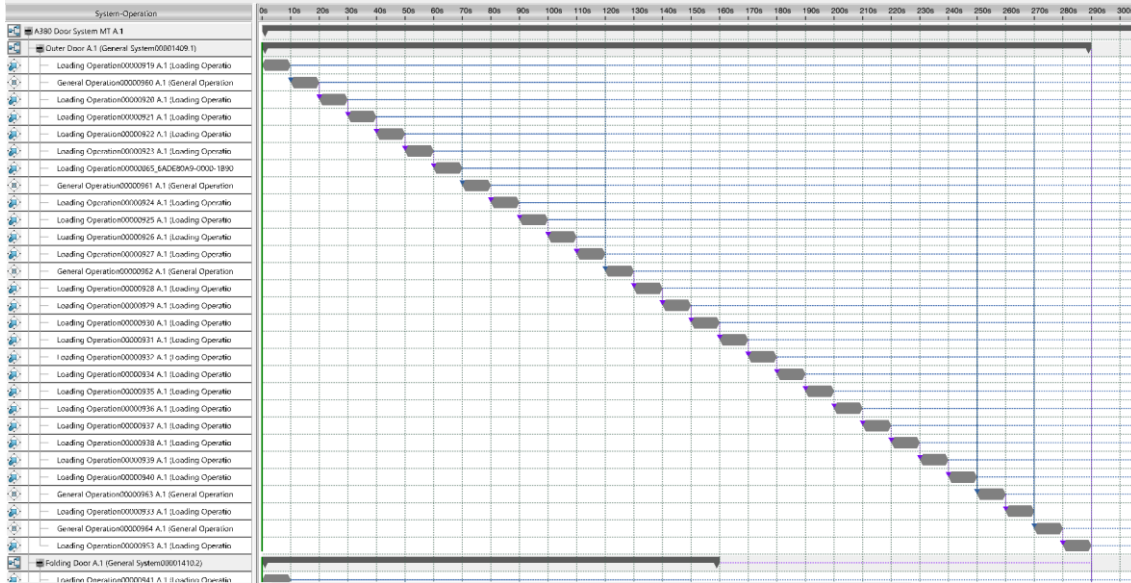


Fig. 61. Diagrama de Gantt del sistema, tras la definición de las relaciones

Partiendo de ésta situación, se renombran las operaciones creadas para su mayor comprensión en revisiones futuras y se lleva a cabo la definición del tiempo necesario para cada operación, conformando un diagrama de Gantt como el que se muestra en la Fig. 62.

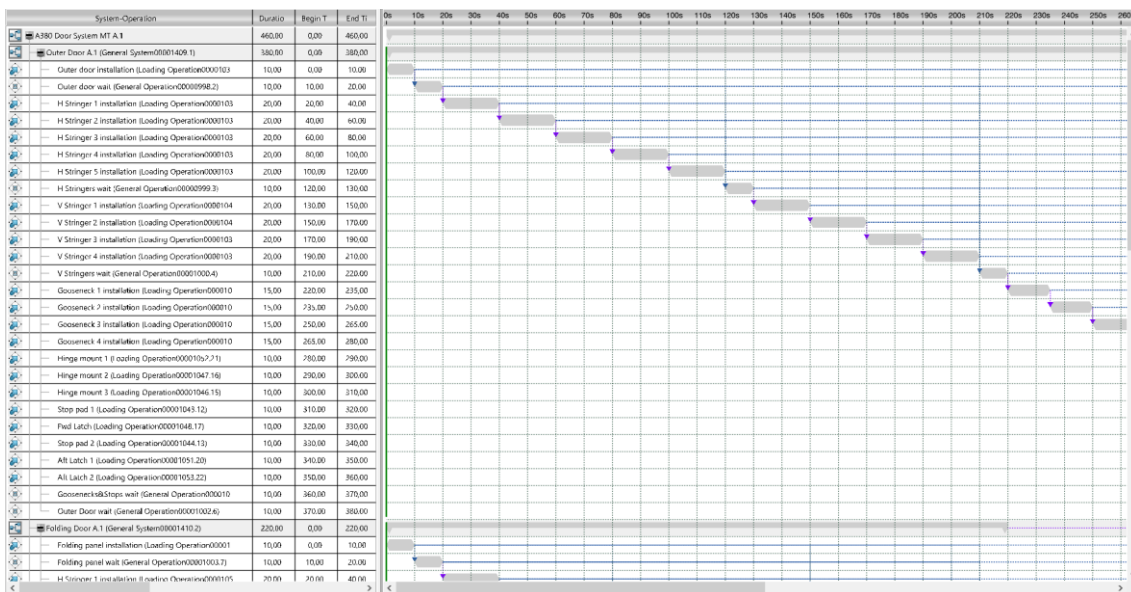


Fig. 62. Diagrama de Gantt finalizado

Por simplicidad, se considera una estructura totalmente secuencial, en la que cada operación tiene una predecesora y una sucesora, esto es, se hace uso únicamente de las relaciones de comienzo a fin. Se es consciente de que es posible optimizar esto mediante la realización de tareas simultáneas estableciendo relaciones comienzo a comienzo, dejándose dicha optimización para trabajos futuros. Además, se ha optado por dotar a las operaciones más sencillas (instalación de componentes más pequeños) de 10 segundos para realizarse. Para piezas más críticas, como los mecanismos de anclaje, se ha dado 15 segundos, y las piezas estructurales más grandes, esto es, los largueros que conforman las puertas, cuentan con 20 segundos para su instalación. En este sentido, se comenta que este montaje se realiza siguiendo un procedimiento habitual en elementos de material compuesto, esto es, unión de las piezas mediante adhesivos o resinas. No obstante, el *software* no se encuentra especializado en este tipo de operaciones, por lo que se ha modelado mediante operaciones generales de ensamblaje.

Además de las operaciones de montaje propiamente dichas, se ha querido incluir unas operaciones de “espera” entre etapas de montaje en cada subconjunto, de manera que puedan posicionarse las piezas y los recursos para llevar a cabo el siguiente conjunto de operaciones. Estas operaciones de espera han sido estimadas en 10 segundos. Todo esto supone un tiempo de ciclo de aproximadamente 460 segundos.

Para finalizar este apartado, se comprueba que todo lo realizado se ha hecho de forma correcta empleando *B.I. Essentials*, esta vez bajo el apartado *System Update Status*. Además, se hace un cómputo del *output*, esto es, el *software* computa el resultado del ensamblaje y lo inserta en un archivo de CATIA, de forma que puede verse el resultado final y compararse con lo previsto por el diseño

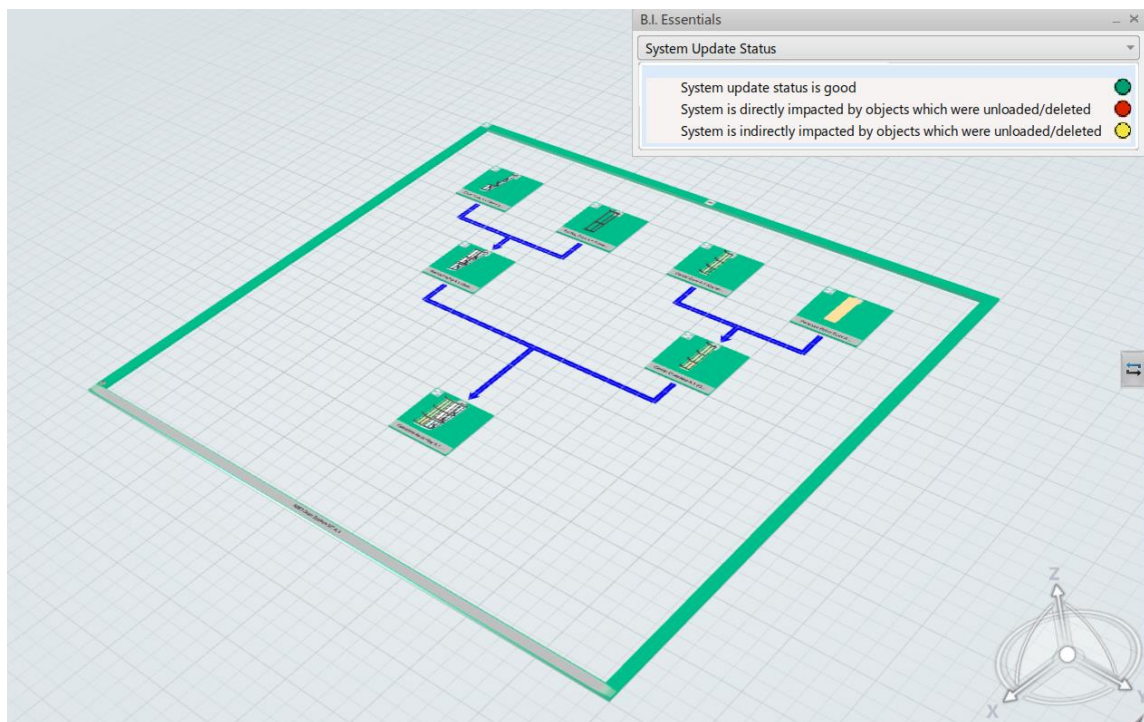


Fig. 63. Uso de B.I. Essentials como herramienta de comprobación. Los *tiles* en verde indican que todo está correctamente realizado

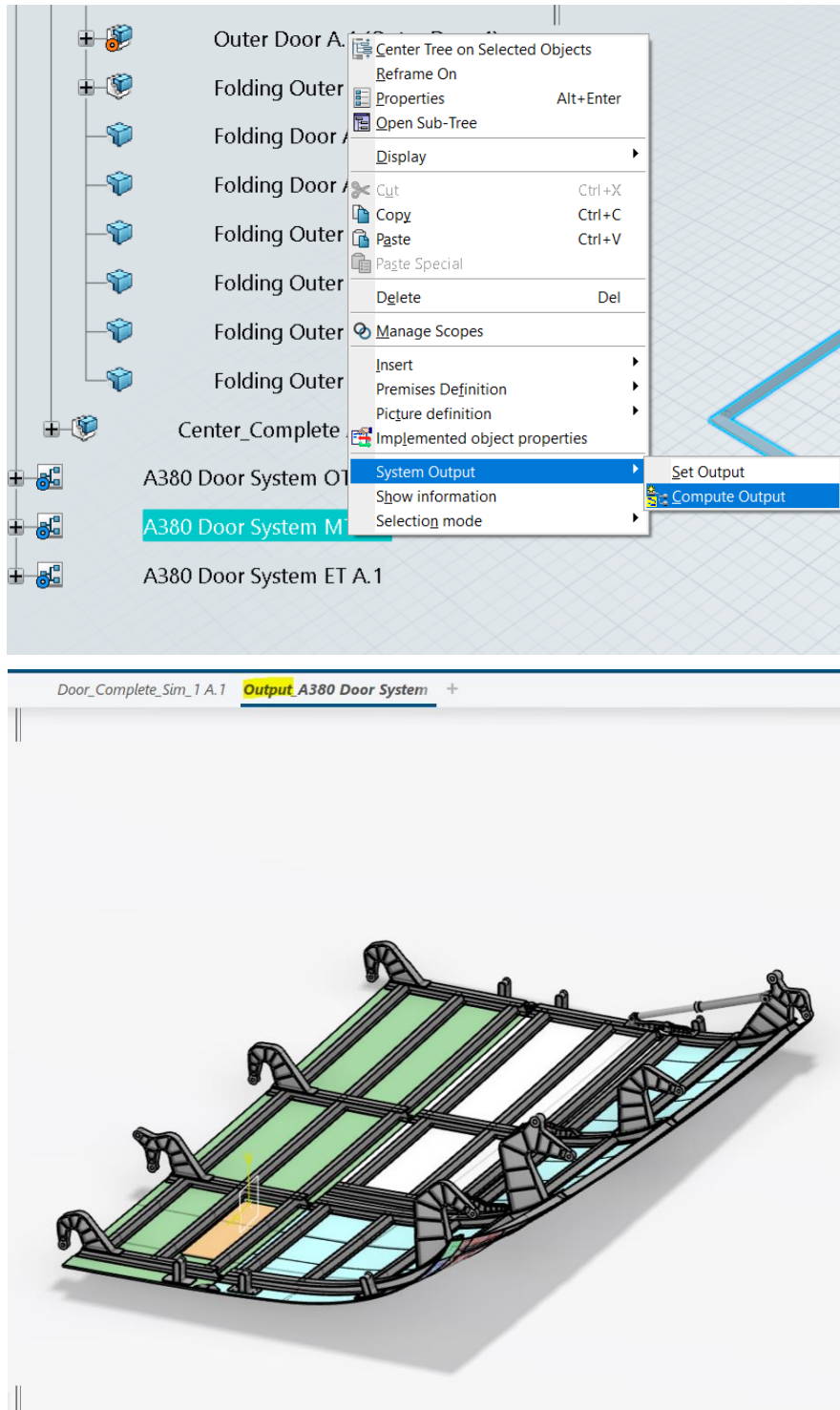


Fig. 64. Cómputo del resultado de ensamblaje. Como puede verse, la correspondencia con el diseño es total

3.8 Simulación del proceso de ensamblaje

Tras la definición de los nodos que conforman el árbol PPS, el proyecto se encuentra en la situación adecuada para realizar la simulación completa del proceso de ensamblaje. Se recurre para ello de nuevo a la herramienta Assembly Evaluation. Antes de exponer dicha simulación se comenta una vez más el hecho de que al tratarse de una aplicación académica, de un conjunto sencillo y realizada por una única persona, esta simulación podría haberse realizado en estadios más tempranos del trabajo. En caso de tratarse de una aplicación real de mayor envergadura no sería posible acometer con esta tarea hasta hallarse en este estado.

Tras la definición de MBOM y sistema, se llega a la secuencia finalmente empleada: Cada una de las puertas que conforman el producto final es ensamblada en útiles separados, pero de forma simultánea. Una vez completadas, se lleva a cabo la unión de la puerta exterior y la auxiliar (identificadas en el producto como *Outer* y *Folding*), para lo cual se omite durante el montaje de la puerta auxiliar los elementos de unión entre subproductos (bisagras), que son ensambladas una vez posicionados éstos, con el fin de asegurar el correcto funcionamiento del portón. Finalmente se realiza un hipotético montaje del conjunto completo al avión, quedando el producto en su posición final.

Ya decidido el orden en el cual se van a ensamblar los componentes, se realiza una simulación del mismo en la herramienta. Como ya ha sido dicho en la evaluación inicial, esto se hace mediante la creación de *tracks* y el establecimiento de relaciones de precedencia/simultaneidad entre ellas.

Las relaciones entre *tracks* han seguido el orden que se presenta seguidamente: Cada uno de los tres grandes subconjuntos empieza a ensamblarse de forma simultánea. Esto corresponde a diferentes líneas simultáneas, con varias estaciones, que desembocan en unas estaciones comunes finales en las cuales se integran los grandes subconjuntos entre sí. La sucesión en cada uno de estos subconjuntos es: largueros horizontales, largueros verticales, mecanismos de anclaje (*goosenecks*), y mecanismos de unión y protección (bisagras y topes). En el caso de la puerta auxiliar se omite la inclusión de las bisagras, como ya se ha comentado, para conseguir posicionar los subconjuntos de forma precisa. Una vez listos los subconjuntos, se unen la puerta exterior y la central, mediante las bisagras anteriormente omitidas, y se montan los mecanismos actuadores (cilindros) encargados del movimiento del conjunto durante su operación. Para finalizar, se posiciona la puerta central, quedando el producto listo para su posterior ensamblaje en el avión completo.

A continuación, se recogen varias capturas del proceso de simulación (Figs. 65-70) a fin de dar una idea general del montaje del producto. Debido a la disparidad de piezas entre subconjuntos, no todas las fases antes mencionadas terminan al mismo tiempo en todos ellos, existiendo periodos de inactividad aguardando a los subconjuntos más voluminosos para poder continuar el proceso.

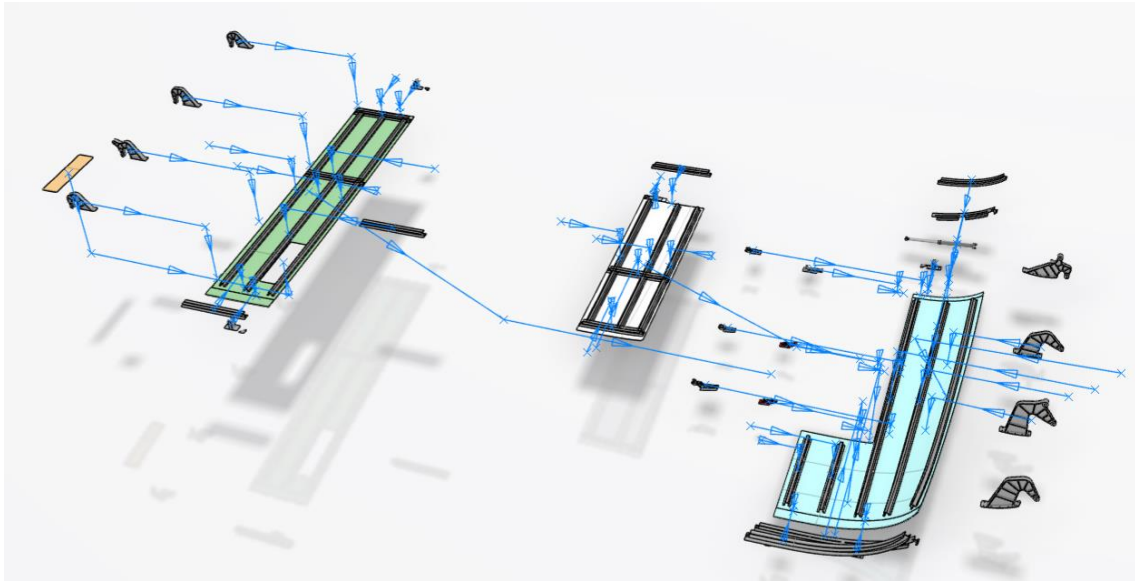


Fig. 65. Ensamblaje: Largueros horizontales totalmente colocados. Como puede verse, en subconjuntos de menor número de partes ya se ha avanzado en el montaje de los largueros verticales

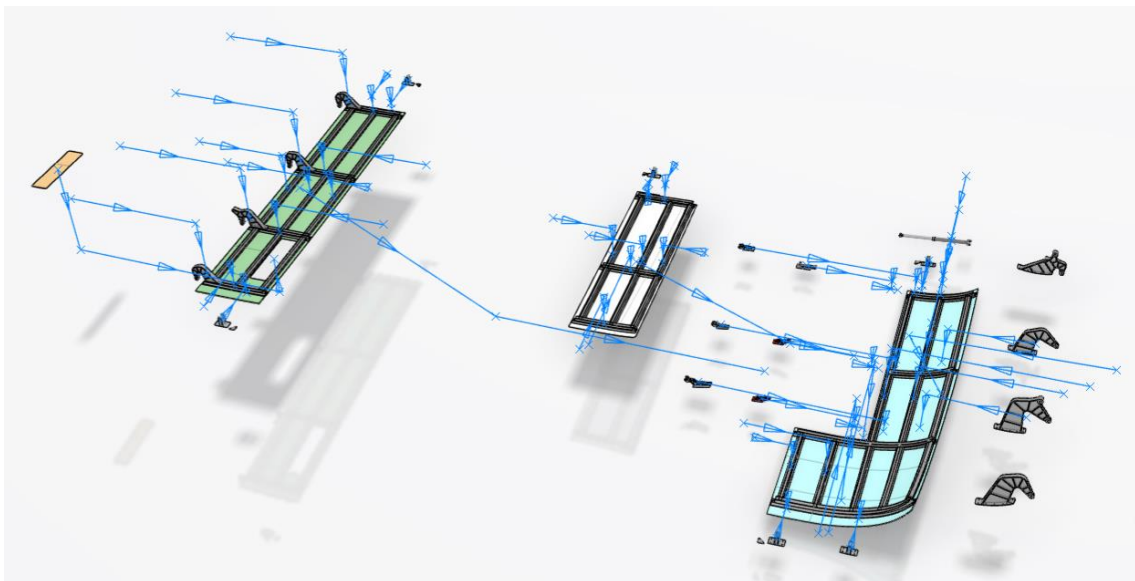


Fig. 66. Ensamblaje: Largueros verticales totalmente colocados. De nuevo existen subproductos con mayor grado de avance

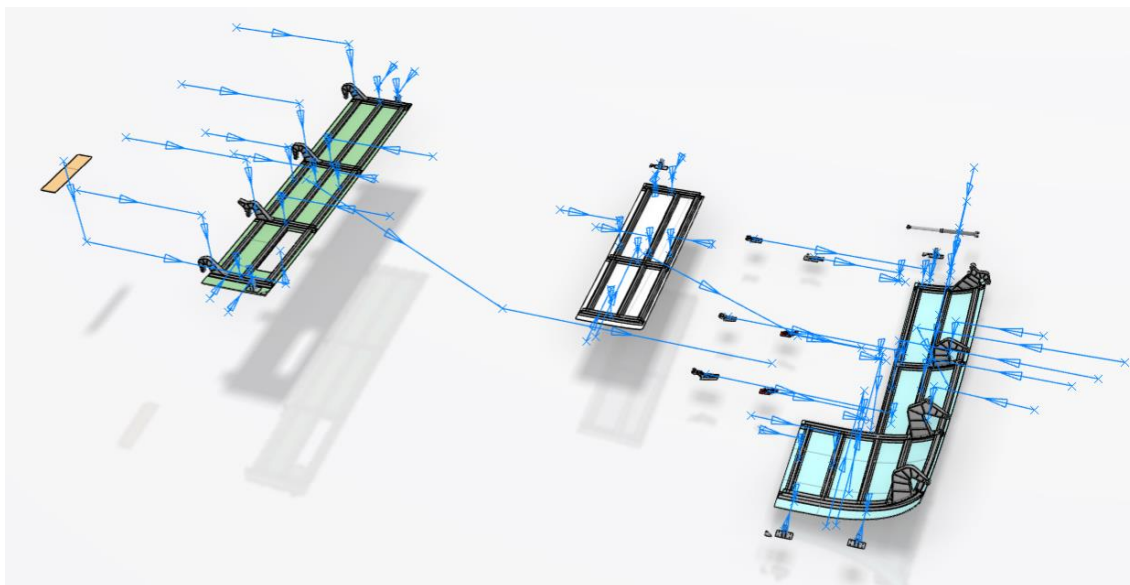


Fig. 67. Ensamblaje: Mecanismos de anclaje (*goosenecks*) en posición

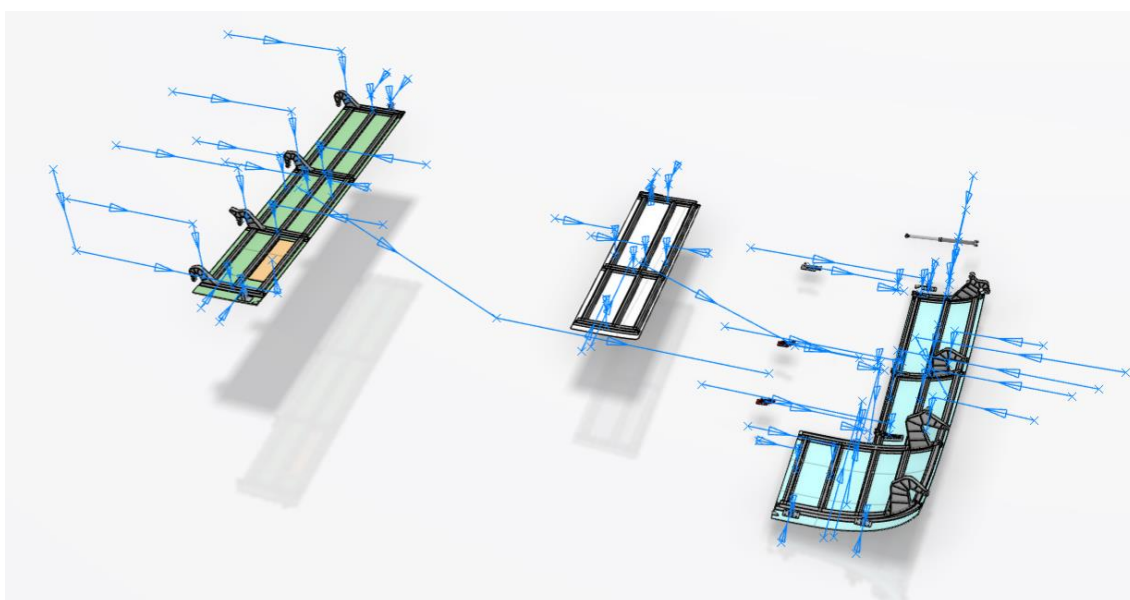


Fig. 68. Ensamblaje: Mecanismos de unión y protección (bisagras y topes) en posición. Subconjuntos finalizados (nótese la omisión de montaje de las bisagras que forman parte de la puerta auxiliar)

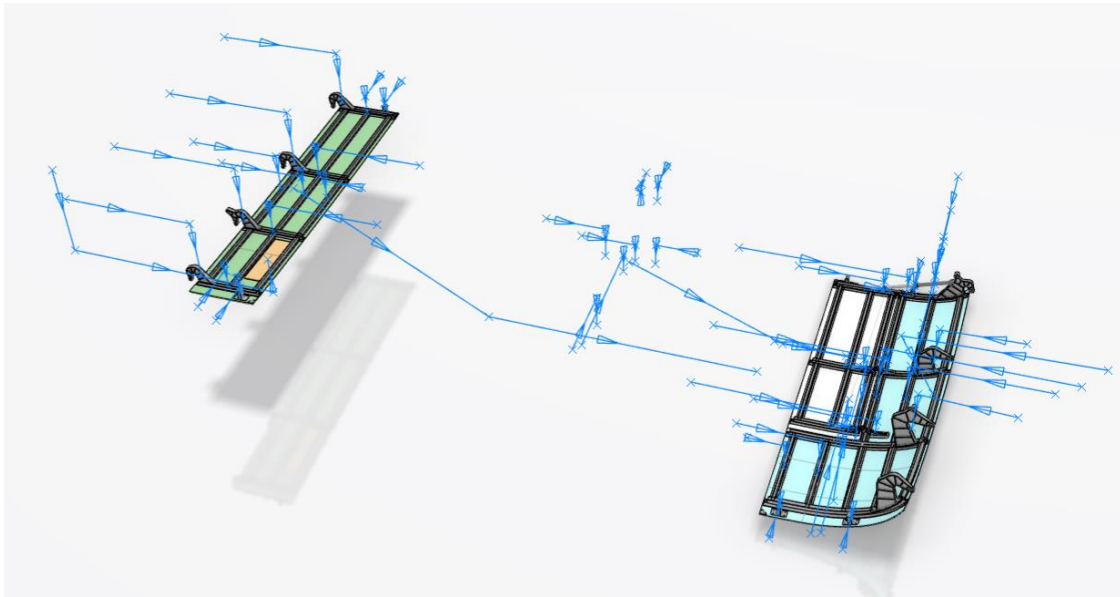


Fig. 69. Ensamblaje: Puertas exterior y auxiliar ensambladas. Posicionado de las mismas y montaje de las bisagras antes omitidas. Montaje del cilindro actuador

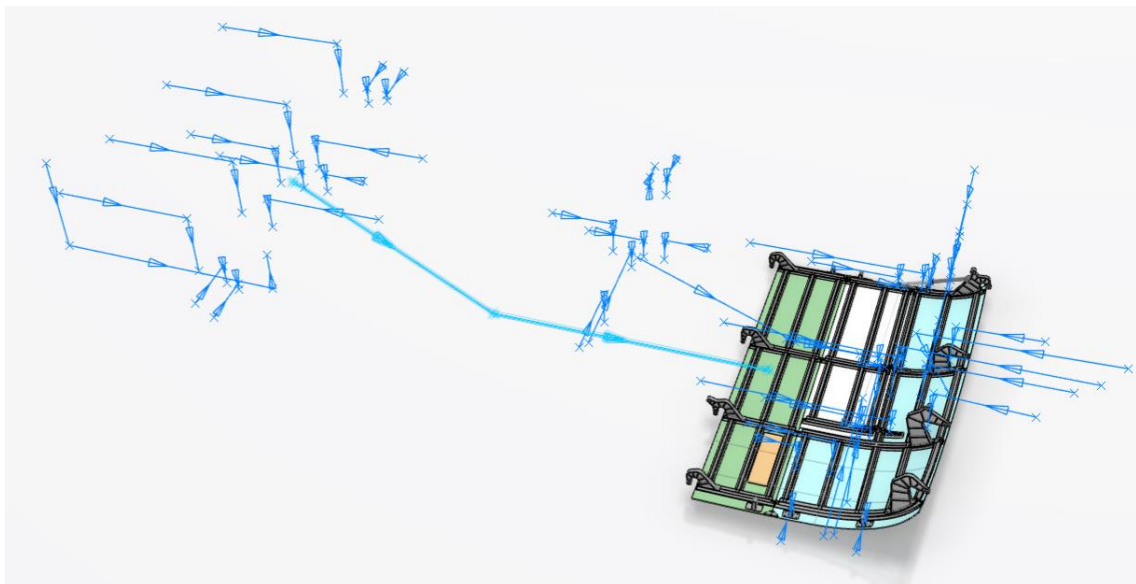


Fig. 70. Ensamblaje: Puerta central posicionada. Producto final terminado. Fin del proceso de ensamblaje

3.9 Análisis del sistema de producción

Una vez completado el proceso de creación del nodo de sistema, es posible realizar sobre él una serie de análisis que arrojan gran valor para la correcta gestión de la planta, como son un modelo de previsión de demanda, que permita tomar decisiones en relación a la plantilla, los proveedores o los tiempos de operación, realizar el correcto equilibrado de carga de trabajo entre operarios para un aprovechamiento óptimo del tiempo, y aspectos de carácter laboral como el modelo de jornadas laborales o *shift model*.

En cuanto al modelo de demanda, se ha querido tomar datos reales para obtener una aproximación lo más fidedigna posible. En esta línea, según *flightglobal.com* [11], Airbus prevé una reducción de la producción de A380 para los años venideros, hasta situarla en 8 unidades a partir de 2019. Queriendo seguir esta línea de desarrollo, se proponen por tanto 8 conjuntos de portones de tren de aterrizaje principal al año como modelo de demanda. Este dato se implementa en el *software* de forma inmediata, sin más que hacer uso del comando propio para esta labor.

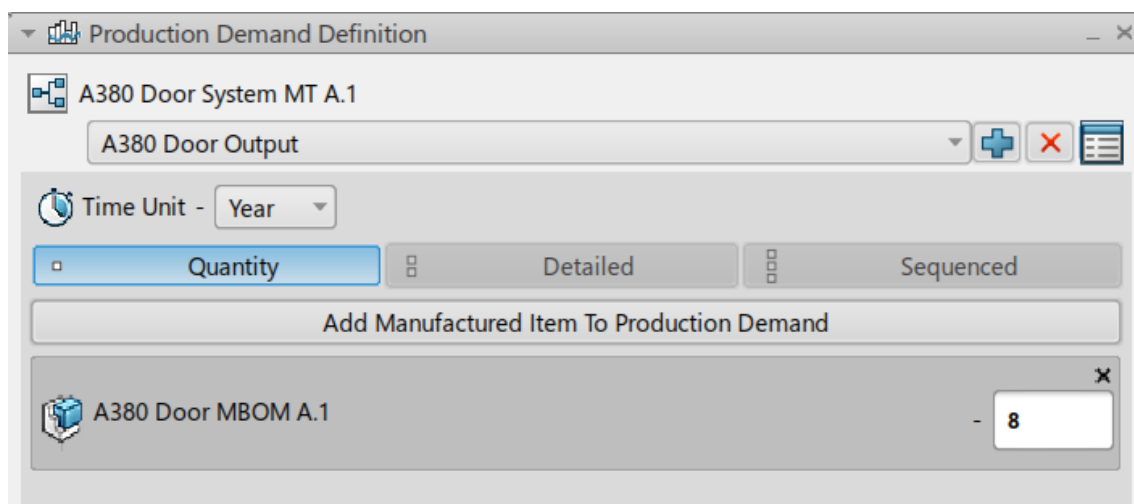


Fig. 71. Modelo de demanda para conjunto principal

De acuerdo a las características propias de un producto aeronáutico, se tiene una muy baja producción anual. La disparidad entre demanda y tiempo de ciclo se debe a que los datos de demanda son realistas de acuerdo a lo facilitado por la fuente, no siendo así para los tiempos estimados en el proceso de ensamblaje, que han buscado la simplicidad en lugar de ser detallados.

Tras la determinación de la demanda, se procede a crear el modelo para establecer los turnos de la jornada laboral, o *shift model*. Con el fin de definir un modelo acorde a lo que existe en la industria, se recaba información acerca del mismo. Así, se encuentra que la empresa Virgin Galactic emplea a sus técnicos en ensamblaje de aeronaves (*Aircraft Assembly Technician*), siguiendo una jornada de tipo completo, o en términos literales, *regular full-time*. Este tipo de jornada se traduce en la mayoría de países en un total de 40 horas semanales, esto es, 8 horas diarias de lunes a viernes. El término *regular* hace referencia a empleos de duración mínima de un año. Por tanto, y teniendo en cuenta también las posibles festividades que se den en el año laboral, se conforma un horario de duración total de 250 días laborables, en los cuales, para conseguir una producción ininterrumpida, se dan tres turnos de 8 horas. Para tener en cuenta posibles eventualidades, se asigna a cada turno una disponibilidad del 90%.

Duration	Occurrence	Availability
8h	0	90%
8h	0	90%
8h	0	90%

Fig. 72. Definición del *shift model*

Una vez definidos los modelos de demanda y de jornada laboral, se realiza un primer intento de equilibrado de la línea. Al no haberse creado ningún nodo de recursos, existen parámetros con valores que no son reales, como los recursos estimados o la utilización.

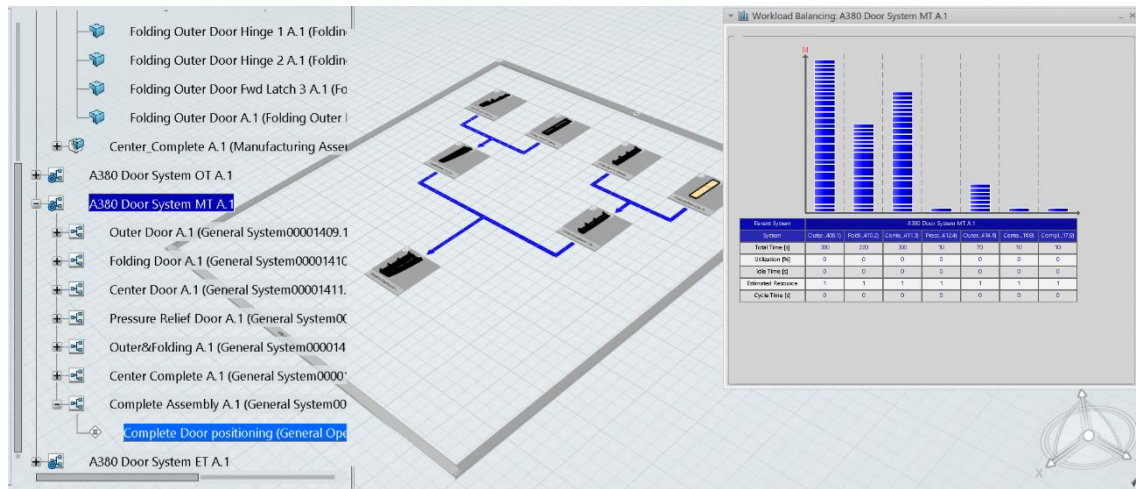


Fig. 73. Carga de trabajo en diferentes estaciones

La herramienta de distribución de carga de trabajo es como se presenta en la figura. Sobre cada estación se dibuja un gráfico de barras compuestas por segmentos, cada uno de los cuales se corresponde con una operación. Nótese como también puede verse fácilmente la duración de cada una de las operaciones, reflejada en el grosor de dichos segmentos.

Como puede verse, el grueso de la carga de trabajo se aglutina en las primeras estaciones. Esto es lógico ya que es en ellas donde se ensamblan los elementales que forman los principales subconjuntos del producto. Las estaciones posteriores integran los subconjuntos entre sí, y dado que los tiempos de operación se han estimado como ha sido expuesto, estaciones con un mayor número de operaciones son irremediamente las que acarrean mayor trabajo.

Se es consciente de que es posible equilibrar mejor la carga de trabajo entre estaciones, por ejemplo, dejando algún subconjunto sin ensamblar completamente y llevando a cabo el montaje de los elementales restantes de forma simultánea a la integración de dicho subconjunto con otro. No obstante, debido a la falta de tiempo, se ha considerado como válida la distribución de trabajo entre estaciones del modo expuesto en la figura anterior. Se deja como trabajo futuro una mejor optimización de esta distribución.

A modo de comparación, se muestra en la siguiente figura el empleo de esta misma función para el primer caso, en el cual se cuenta con una estación única. Lógicamente, este *layout* impide llevar a cabo cualquier tipo de equilibrado.

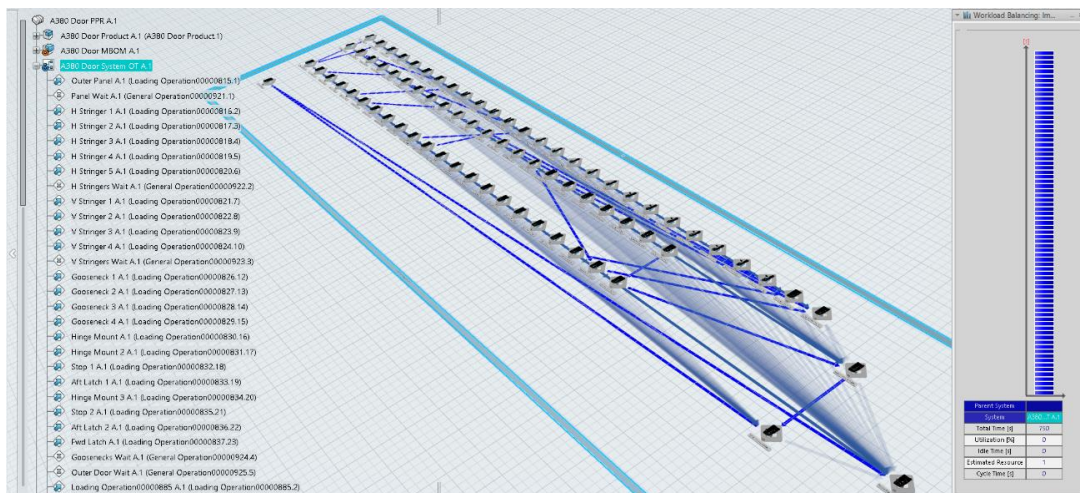


Fig. 74. Uso de la función de equilibrado para el primer caso

4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

The present is theirs; the future, for which I really worked, is mine.

- Nikola Tesla -

Se recogen en el siguiente capítulo las conclusiones obtenidas tras la realización del trabajo. Este apartado tiene, por tanto, el objetivo de servir de síntesis de lo realizado. Además, se dedica un apartado a realizar una valoración personal del *software* empleado y de la labor perpetrada, y otro adjunto más para la proposición de trabajos futuros.

4.1 Conclusiones

El primer punto a comentar es que como ya se dijo en la introducción, este proyecto ha pretendido en todo momento ser una primera toma de contacto con un *software* de última generación como es 3DExperience. Es por ello que la intención de este documento es dar una impresión general de la plataforma en su conjunto y de las posibilidades más básicas que ofrece, de forma que sea un punto de partida para futuras investigaciones en esta línea que quieran ahondar más en los diferentes aspectos de los diversos módulos que componen la herramienta. Este carácter general supone un tratamiento superficial de las distintas aplicaciones, al igual que una pequeña exploración de los comandos que las componen. Sin duda, es posible sacar más partido de las operaciones que contiene el programa, pero esto hubiese supuesto una desviación del objetivo del trabajo, así como una cantidad de tiempo invertido superior a la pretendida en el proyecto.

Siguiendo con esta línea, y pretendiendo servir de apoyo para los siguientes estudios que, en más profundidad, hagan uso de este *software*, se ha creído importante recoger unos pequeños tutoriales que, complementando a los proporcionados por la propia Dassault, faciliten la formación y/o adaptación de futuros usuarios de la plataforma. En ellos se ha condensado los aspectos más útiles de los facilitados por la empresa francesa, al menos en lo referente a operaciones básicas y dominio general del entorno del programa, así como una valoración de cada uno de los módulos.

Tras la explicación y síntesis del funcionamiento de diversas aplicaciones básicas, se ha considerado conveniente poner en práctica lo relatado teóricamente en un caso práctico, de forma que se pongan de manifiesto las bondades y desventajas de las capacidades que la herramienta promete, y que permita dar una idea real del grado de madurez alcanzado por el *software*. En este proyecto, se ha optado por una aplicación práctica acorde a los intereses personales del alumno, esto es, un caso de corte aeronáutico. Este hecho, unido a la facilidad para obtener los ficheros de diseño del producto, suponen la elección de un portón para tren de aterrizaje principal de un Airbus A380 como caso práctico. En concreto, se lleva a cabo el ensamblaje de los diferentes elementales que lo componen, ya que es esta tarea la que reviste de mayor interés tanto en el ámbito práctico aeronáutico como desde el punto de vista de uso de la herramienta.

Siguiendo la filosofía clásica de la organización de la información en los entornos CAD/CAM, se pretende en un primer momento la construcción en la herramienta del árbol PPR de la aplicación seleccionada. No obstante, la inclusión de un nuevo nodo debido al cambio de filosofía impuesto por Dassault, junto al afán de no querer superar un cierto tiempo establecido para la realización del trabajo modifican la estrategia a seguir en el transcurso de la creación del caso práctico, evolucionando de un árbol PPR a uno PPSR, quedando finalmente relegado a un árbol PPS, al omitir el modelado del nodo de recursos.

Se pasa por tanto a comentar la metodología seguida para definir cada uno de los nodos. Primeramente, se quiere hacer notar que la labor comienza antes del empleo del *software*. Antes de proceder con la construcción del árbol propiamente dicho, se llevan a cabo numerosos estudios a mano acerca de las diferentes alternativas que se presentan a la hora de realizar un ensamblaje como el seleccionado, discutiendo la optimalidad de las mismas en base a diversos parámetros como el tiempo total de ciclo, la carga de trabajo y el número de operarios, o la simplicidad de implementación en el *software*. Estas deliberaciones convergen hasta una solución final, y hacen posible que ésta sea la elegida durante todo el transcurso del proyecto, no siendo necesario modificar la secuencia de ensamblaje desde la aproximación inicial.

Una vez clara la estructura que se va a seguir, se procede a implementar la misma en el programa. Para ello, en primer lugar, se desea hacer una evaluación inicial del proceso de ensamblaje, de forma que se reafirme la postura a la que se ha llegado durante la etapa de deliberación previa. Esto se lleva a cabo gracias a la aplicación *Assembly Evaluation*. Una vez implementada, se comprueba que lo ideado inicialmente se corresponde con lo que desea trasladar al *software*, se lleva a cabo la simulación de la secuencia de ensamblaje y se fijan las bases para la definición de los nodos del árbol, ya comentados.

Tras la primera aproximación al problema, se realiza la definición de los nodos propiamente dichos. Estos son los nodos de producto, proceso y sistema. Gracias al hecho de contar con un diseño completamente integrado en la plataforma desde el inicio, el nodo de producto se encuentra prácticamente listo. Solo es necesario realizar unos pequeños ajustes, ya que el archivo de diseño contiene toda la aeronave y otros elementos que carecen de utilidad en la aplicación práctica y han de ser eliminados. Definido el nodo de producto, se pasa a crear el nodo de proceso, o lo que es lo mismo, se define el *Manufacturing Bill Of Material* (MBOM). En este caso se hace uso del módulo *Manufactured Item Definition*. Para ello, se define la secuencia básica de ensamblaje y se asignan las diferentes piezas a esta secuencia (es decir, se relacionan los nodos de producto y proceso), de acuerdo a lo previsto en la evaluación inicial. Además, con objeto de explorar un poco las funciones del módulo, se crea un catálogo con la estructura del ensamblaje que pueda ser reutilizada de ser necesario, y se recoge una pequeña valoración de los problemas encontrados durante la creación de este MBOM e indicaciones que eviten repetir los errores cometidos en este proceso.

Siguiendo con este interés por explorar las posibilidades dadas por la herramienta, se pretende hacer uso de nuevo de *Assembly Evaluation* con objeto de que sirva como mecanismo de autocomprobación y con carácter inspector, pretendiendo así detectar fallos antes de la realización completa del árbol. No obstante, la aparente falta de utilidad de acciones como la exportación/importación de *tracks*, unido al hecho de que no es necesario hacer modificaciones entre lo planteado inicialmente y lo realizado en el MBOM, provocan que el revisitar este módulo en un paso intermedio carezca de utilidad práctica. Es por eso que se omite realizar este mismo paso una vez acabado el nodo de sistema. Sin embargo, se cree que este uso del módulo puede ser interesante y de utilidad en aplicaciones prácticas diferentes, en las cuales haya una evolución de la secuencia de montaje durante la realización de las mismas, y se planteen diferentes alternativas para la misma.

Definidos los nodos de producto y proceso, resta crear el nodo de sistema. Este nodo, introducido como concepto nuevo por el *software* empleado, pretende colocarse a medio camino entre la organización teórica de los pasos que han de darse para conseguir ensamblar un conjunto final, y la organización de las ubicaciones físicas en las cuales se llevan a cabo dichos pasos dentro de una factoría real. Presenta por tanto grandes ventajas para compañías que ensamblen los mismos productos en diferentes plantas, en las cuales, debido a razones puramente pragmáticas (diferente tamaño y/o forma de las instalaciones, distinto número de operarios o maquinaria), deban tener distinto *layout*.

Antes de proceder con la creación del nodo, se realiza una pequeña introducción a los diferentes tipos de *layout* existentes en la industria y la elección de uno u otro en función del volumen de producción y la variedad del producto. Esta introducción, de gran utilidad para el lector no familiarizado con los conceptos, permite justificar el aspecto que presenta el nodo de sistema posteriormente creado. Tras la explicación de las nociones básicas de *layouts* y su elección, se concluye que la aplicación elegida obedece a un *layout* de producto fijo. Esto supone una serie de dificultades añadidas, como se ha recogido en la opinión personal.

Con el fin de superar algunos de estos obstáculos, y atendiendo a lo que se entiende como concepto de nodo de sistema, se proponen tres planteamientos diferentes para elaborar el mismo. El primero consta de una única baldosa en la que se insertan todas las operaciones, buscando imitar el hecho de que físicamente se encuentra una única estación en la cual el producto está fijo y se lleva a cabo el ensamblaje. El segundo va más allá, y propone un cambio en la filosofía de trabajo, pasando de empresa subcontratada a empresa matriz que realiza líneas de ensamblaje intermedias antes de proceder a la integración en la FAL. Así, se crea con varias casillas que organizan los grandes subconjuntos y contienen las operaciones para conformar cada uno de ellos. Ambas soluciones presentan el inconveniente de no poder presentar la información de forma clara en pantalla, contribuyendo a crear un entorno caótico para futuras revisiones, y problemas derivados de la propia construcción del programa, que hacen difícil el empleo de diagramas de Gantt o equilibrado de líneas con este tipo de distribuciones. La evolución lógica plantea un caso en el cual cada operación está contenida en un *tile* de sistema. No obstante, debido a la gran cantidad de casillas que esto supondría, y no compensando el beneficio que reportaría, se opta por llegar a una solución de compromiso entre lo último expuesto y el segundo caso. Nace así un tercer caso en el cual las operaciones se agrupan en pequeños conjuntos o *clusters*, de acuerdo a etapas del proceso de ensamblaje, siguiendo un orden común entre subconjuntos: Largueros horizontales, largueros verticales, mecanismos de anclaje, y mecanismos de unión y protección. Este tercer caso supone una mejora notable en flexibilidad, tanto en operación como en presentación de la información, y permite un mejor uso de las herramientas dadas por la aplicación, al emular la estructura que se tendría en una distribución de fabricación por lotes o células de fabricación.

Decidido el escenario a implementar, se hace uso del módulo *Process Planning* para crear el último nodo que compone el árbol. En esta situación, se cuenta con el hecho de haber elaborado la estructura de cada uno de los sistemas con el fin de compararlos entre sí y determinar la mejor alternativa. Esto supone que el nodo de sistema, una vez elegido el caso óptimo, ya se encuentra creado, y también las operaciones que lo conforman, lo que se traduce en que también existe ya la relación entre nodos de proceso y sistema. Por tanto, una vez se determina el mejor escenario posible, queda automáticamente determinado el nodo de sistema.

Como ya ha sido comentado en varias ocasiones, el árbol no se encuentra completo, siendo necesario definir el nodo de recurso para dar el último paso y fijar la producción del conjunto seleccionado a una planta concreta, y ubicar en ella los diferentes medios auxiliares que la hacen posible (trabajadores, robots, *conveyors*, herramientas, estaciones de trabajo, etc, esto es, recursos *who*, *with* y *where*). La omisión de este nodo se debe a varios motivos ya expuestos: en esencia, la premura de tiempo y las dificultades para encontrar modelados CAD de utillaje específico como es el aeronáutico.

4.2 Opinión Personal

Una vez expuestas las conclusiones principales, se recoge la valoración personal del alumno acerca de varios aspectos, como el *software* empleado, tanto la plataforma en su conjunto como los diferentes módulos con los cuales se ha trabajado, la metodología de trabajo, y el modelado y simulación del MBOM y el sistema. Por tanto, y de forma excepcional, se adopta un estilo personal en este apartado, en contraposición al estilo informal con el cual se ha redactado el resto del documento.

4.2.1 Acerca del *software*

Personalmente, considero que el *software* con el que he trabajado a lo largo del proyecto presenta los problemas típicos de una tecnología puntera que aún se encuentra en fase de desarrollo. Aunque tiene grandes ventajas y promete una gran integración entre departamentos, en la práctica resulta algo engorroso trabajar con una gran cantidad de ficheros en una nube compartida, y más aún su modificación y/o eliminación. Esto hace que los errores cometidos tengan un precio muy alto, ya que es necesario rehacer por completo el progreso conseguido hasta ese momento. Supongo que se debe a la mentalidad clásica de ficheros locales en cada ordenador, y que es necesario un ejercicio mental de cambio de paradigmas para acostumbrarse a este nuevo método de trabajo.

Uno de los aspectos más negativos es la escasa compatibilidad con las tarjetas gráficas del mercado. Si bien es posible ejecutar las diferentes herramientas en ordenadores con gráficas no compatibles (de hecho, así se ha hecho para llevar a cabo este trabajo), las incompatibilidades dan lugar a multitud de errores de visualización en las piezas o los códigos de colores de *B.I. Essentials*, y hace totalmente inservibles herramientas como el *Smart zoom* o diferentes técnicas de asignación de piezas, *manufacturing items* o recursos empleando la interfaz gráfica. Del mismo modo, aparecen multitud de ventanas vacías cuando se ejecutan ciertos comandos, como la definición del *shift model*, haciendo muy difícil el uso de los mismos.

Otro de los aspectos que creo que debe mejorar es el hecho de que la herramienta está claramente diseñada para modelar sistemas de producción con un *layout* de línea de fabricación en serie o de producción por lotes. Si bien parece una elección sensata, ya que el grueso de las aplicaciones industriales que puede tener este programa obedecen a estos sistemas de fabricación, en el caso práctico elegido ha supuesto un escollo. El hecho de elegir un producto cuya organización en planta es de producto fijo supone multitud de problemas a la hora de modelar los diferentes *tiles*, el diagrama de Gantt y hacer análisis posteriores como la distribución de la carga de trabajo. Estos problemas se han solucionado mediante el cambio de rol en el transcurso del proyecto, como ya ha sido comentado, pero para otro tipo de aplicaciones esta solución no es posible.

No obstante, me parece justo comentar que se trata de un *software* que se distingue de los demás desde el primer minuto de uso, ya que presenta una filosofía de trabajo completamente revolucionaria. Creo que se trata de una apuesta arriesgada y valiente por parte de Dassault, y que, con las modificaciones necesarias en siguientes actualizaciones, supondrá un referente en el mundo CAD/CAM en el futuro próximo. Han sabido crear un entorno intuitivo y de fácil uso para el usuario novato, y más aún para usuarios que, como es mi caso, contamos con conocimientos en herramientas anteriores como es CATIA. Al igual que considero que la adaptación de pasar a ficheros físicos de forma local a ficheros en la nube compartida es de lenta asimilación, el paso de hacer uso de los comandos de CATIA a los propios de los diferentes módulos de 3DEXperience ha sido casi inmediato. La filosofía *drag&drop*, unido a la variedad de métodos para realizar una misma acción ofrecidos por el programa, lo convierten en una herramienta de gran utilidad y flexibilidad. Además, considero que el aunar todas las herramientas de los distintos gremios (los antiguos CATIA, DELMIA y ENOVIA) en una única plataforma es sin duda algo muy cómodo para trabajar en proyectos de cierta envergadura.

No puedo llevar a cabo una valoración de la parte social y colaborativa que promete el entorno ya que este proyecto se ha llevado a cabo en solitario, aunque parece funcionar de forma correcta.

En resumen, creo que estamos ante una herramienta con una base muy bien fundamentada y respondiendo a un planteamiento innovador, que tiene como objetivo cambiar la forma de trabajar de los entornos CAD/CAM. Si se tienen en cuenta los diferentes aspectos a pulir, y estoy convencido de que se subsanarán en un futuro no muy lejano, se tendrá una herramienta sólida, cómoda y útil para cualquier tipo de usuario, con escaso tiempo de formación/adaptación, lo que permitirá que se convierta en uno de los *softwares* de este ámbito más influyentes del mercado, como ya han hecho sus predecesores.

4.2.2 Acerca de la metodología de trabajo

En cuanto a la metodología seguida a la hora de desarrollar este proyecto, considero que ha sido la apropiada, teniendo en cuenta que era la primera vez que se trabajaba con este *software*. Las reflexiones iniciales, antes de tomar contacto con la herramienta, han sido de enorme valor y han permitido tener una idea clara de las directrices que iban a marcar el proyecto durante todo su desarrollo. Esto ha supuesto una gran ventaja a la hora de modelar el árbol PPS y la simulación del ensamblado, así como superar los obstáculos que se han ido presentando.

La realización de los tutoriales facilitados por Dassault han hecho posible la formación básica en los módulos principales de la herramienta y tener una idea general de cómo debe procederse a la hora de acometer un proyecto como el llevado a cabo. En este sentido, probablemente sería de utilidad algo más de profundización en estos tutoriales, ya que en ocasiones dan la sensación de ser demasiado superficiales, y se detienen demasiado en aspectos triviales como el uso de las barras de navegación o el establecimiento de las preferencias de visualización. No obstante, y al igual que como he comentado en el apartado anterior, supongo que conforme avance la herramienta y se vayan puliendo los errores de la misma, se irán perfeccionando también los tutoriales para su uso.

La construcción del árbol ha seguido un orden lógico, partiendo del ya definido nodo de producto, pasando por el nodo de proceso, y llegando al de sistema. Gracias a esta secuenciación lógica se ha tenido claro en todo momento el grado de avance del proyecto y qué era lo próximo a realizar. En este sentido, considero que ha sido muy importante dicha estructuración temprana para conseguir una sensación de seguridad continua acerca de la labor realizada, la restante, y evitar sentirse perdido acerca de cómo hacer frente a los obstáculos. El uso de la herramienta Assembly Evaluation ha sido de gran utilidad para el estudio inicial y la simulación completa del conjunto, otorgando un aspecto visual más llamativo y aclarador. Como se ha dicho en numerosas ocasiones, en caso de haber sido una aplicación real, a cargo de un equipo con muchos integrantes y elevada cantidad de elementales, el uso de dicha herramienta como sistema de evaluación de la labor llevada a cabo y la detección temprana de errores habría sido de una utilidad innegable. Es por eso que creo muy instructivo el hecho de haber intentado emplear la aplicación con este carácter inspector.

4.2.3 Acerca del modelado y simulación del MBOM

En cuanto al modelado y simulación del MBOM, personalmente, creo que la herramienta se ha desarrollado siguiendo una buena línea, ya que parece tener como meta principal la accesibilidad y la facilidad de uso para todo usuario. El empleo del módulo de Manufacturing Item Definition es algo cómodo e intuitivo, y desde el primer momento es posible realizar pequeños ejemplos para practicar las diferentes funciones que ofrece. La apuesta por el uso del *drag&drop* contribuye a este aspecto intuitivo, y en general la tarea se ha hecho amena y disfrutable. La creación de las diferentes casillas, y la asignación de las piezas del producto, puede llevarse a cabo en un tiempo razonable si se tiene claro qué estructura va a seguirse. Se comenta de nuevo la enorme utilidad de una cuidadosa planificación de lo que va a realizarse antes de empezar a usar el *software*.

Quizá el aspecto más difícil de asimilar haya sido la definición de los *scopes*. Al tratarse de un concepto nuevo, y algo más de utilidad para el propio *software* que para el usuario, se hace al principio algo difícil de comprender y de utilizar, ya que no queda demasiado claro el alcance de su importancia y su labor concreta en el empleo del módulo. No obstante, una vez acostumbrado al *modus operandi*, no es más que un paso más a tener en cuenta, y que no reviste mayor dificultad.

4.2.4 Acerca del modelado y simulación del sistema de producción

Las ideas que pueden sacarse del modelado y simulación del sistema de producción son similares a las expuestas para el MBOM. De nuevo, el hecho de ser una plataforma basada en el uso de la interfaz gráfica, mediante *drag&drop*, definición de flujos de producto, y asignación directa de elementos manufacturados, la convierten en una herramienta cuyo uso es intuitivo y cómodo, sin duda uno de sus puntos fuertes, que contrarresta en cierta medida los defectos de compatibilidad gráficos y otros inconvenientes ya expuestos. La creación de los diferentes casos para sistemas de producción y su análisis para determinar el más apropiado fue en cierta medida rápido, aunque si cabe mencionar el hecho de que es una labor tediosa la organización de las operaciones dentro de los *tiles* de sistema, siendo necesario en algunas ocasiones borrar por completo todo lo realizado y comenzar nuevamente. En este aspecto, creo que deberían mejorar la selección múltiple y la detección de las reorganizaciones, para hacer más cómoda y sencilla la gestión simultánea de grandes grupos de operaciones. De nuevo, puede decirse que lo más arduo de comprender es la necesidad de definir un *scope* entre nodos, pero una vez asimilado, no es más que otro paso a realizar.

Tras la definición del nodo, destaca asimismo por su sencillez y facilidad de operación el uso de las herramientas de análisis. La definición de modelos de demanda, de *shift model* o el equilibrado de carga de trabajo se presentan en ventanas claras y fácilmente entendibles, y su uso es cómodo y rápido. En el caso del equilibrado, la información presentada a modo de gráficas de barras constituidas por segmentos hace posible una comprensión inmediata del estado en el que se encuentra la línea, y la capacidad de trasladar operaciones entre estaciones sin más que arrastrarlas en este gráfico facilita enormemente las labores de equilibrado. Si bien estéticamente son mejorables, y presentan ciertas dificultades cuando se reescalan las ventanas, cumplen con su función de manera solvente.

4.3 Trabajos Futuros

Este último apartado tiene como fin plantear las líneas de progresión y mejora para futuros proyectos de índole similar.

Como ya se ha ido comentando a lo largo de esta memoria, el presente trabajo tenía como objetivo ser una primera toma de contacto con el *software* empleado, y servir de punto de partida a futuras líneas de investigación. Por tanto, las líneas de desarrollo pasan lógicamente por la profundización en el conocimiento y utilización de la herramienta. Futuros proyectos podrían entrar en más detalle en funciones del programa no usadas durante el trabajo actual, como el mayor empleo de catálogos, conseguir una mejor reutilización de lo implementado y extrapolarlo a proyectos similares, o herramientas de análisis de la producción más complejas. También podría completarse en un trabajo posterior el árbol que ha empezado a definirse en este proyecto, que como ya se ha expuesto carece de nodo de recursos ante la falta de tiempo y de modelados de utillaje. Esto supondría asimismo el empleo de módulos que han quedado en desuso tras la formación del alumno en los mismos, módulos como Equipment Allocation, Plant Layout Design, o Work Instructions. Esto permitiría tener una visión completa del proceso de creación de un sistema de producción, desde el nodo de producto, propio de la ingeniería de diseño, a la implementación física de los recursos que hacen posible su fabricación o ensamblaje en una factoría concreta.

Siguiendo en esta línea, podría llevarse a cabo una optimización en la distribución de la carga de trabajo. Si bien la solución adoptada puede considerarse válida, existen alternativas, algunas ya comentadas, que harían posible un mejor reparto de tareas entre estaciones, con la consiguiente mejora en el rendimiento global de la producción y de los trabajadores de la planta. Además, se deja como futura investigación la realización de un equilibrado automático de la línea, posibilidad muy interesante ofrecida por el *software* y que no ha podido ser explotada en este proyecto. Sumado a esto, podría estudiarse en mayor detalle las relaciones entre operaciones en el diagrama de Gantt, de manera que un mayor grado de simultaneidad contribuya a una mejora general del citado equilibrado, y una reducción importante del tiempo de ciclo.

Otra posible línea de desarrollo persigue completar el ensamblaje del conjunto ya simulado sobre el avión completo. Podría decirse que, tras el supuesto de realizar una labor similar a la que llevan a cabo las empresas subcontratadas, o bien lo llevado a cabo por las empresas tractoras en una fase intermedia, se persigue en un futuro realizar una simulación de aquello realizado por las mismas en la etapa final. Se trata de un proyecto de mucha mayor envergadura, ya que implica la simulación de una FAL completa, con un gran número de subconjuntos y, por tanto, un número enorme de elementales. Asimismo, supone la realización de complejos análisis de equilibrado entre estaciones y gestionar un gran número de recursos, materiales y humanos.

Además, se busca la formación del alumno en otros módulos interesantes en el mundo aeronáutico, que han quedado relegados debido a la necesidad de limitar el alcance de este proyecto. Ejemplo de esto son los módulos correspondientes a la antigua ENOVIA, de vital importancia a la hora de coordinar a los departamentos y recursos humanos dentro de una empresa, y que permiten manejar con comodidad los diferentes archivos en la nube y garantizar un correcto aprovechamiento de la ingeniería concurrente; módulos propios de diseño, correspondientes a los contenidos en CATIA, que, si bien no son actualmente muy utilizados, sin duda se convertirán en el referente del panorama aeronáutico en un futuro a medio plazo; o módulos nuevos creados a partir de la aparición de nuevas tecnologías de fabricación, encontrando aquí el mayor exponente en la fabricación aditiva y en concreto la afamada impresión 3D. Se cree que el conocimiento de todas estas áreas puede ser de un enorme valor personal y profesional, y facilitar la incorporación del alumno al mercado laboral y la realización de los objetivos de éste.

REFERENCIAS

- [1] Mikell P. Groover: "Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing". Prentice Hall, 2001.
- [2] Apuntes de la asignatura "Ingeniería de Fabricación" del Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales. Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación, Universidad de Sevilla, 2017.
- [3] Víctor M. Olmos Sierra: "Maqueta Digital de Fabricación para la simulación de procesos de industrialización", Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Madrid, 2013.
- [4] Juan Pérez González: "Diseño e implementación en una herramienta PLM de un prototipo de proyecto aeronáutico". Trabajo Fin de Máster de Ingeniería Aeronáutica, Universidad de Sevilla, 2016.
- [5] Erik Bernérus, Marc Karlsson: "Simulation with 3DEXPERIENCE: Evaluation of software for production flow simulation in manufacturing industry". Master's Thesis in Production Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg (Suecia), 2016.
- [6] Salomón Benasuly Labuz: Curso "Ustillaje de montaje", ETSI de Sevilla, marzo de 2017.
- [7] Plataforma de Dassault Systèmes para cursos y tutoriales online. <https://academy.3ds.com/> (último acceso el 19/1/2018).
- [8] GrabCAD, comunidad online de diseñadores CAD. <https://grabcad.com/> (último acceso el 19/1/2018).
- [9] Directorio online de fabricantes de aviones y subcontratas. <http://www.airframer.com> (último acceso el 19/1/2018).
- [10] Noticia en la web: "British Prime Minister opens new Airbus wing factory for A350 XWB".
<http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2011/10/british-prime-minister-opens-new-airbus-wing-factory-for-a350-xwb.html> (último acceso el 19/1/2018).
- [11] Noticia en la web: "Airbus cuts A380 production to eight in 2019".
<https://www.flightglobal.com/news/articles/airbus-cuts-a380-production-to-eight-in-2019-439712> (último acceso el 19/1/2018).