

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Aeronáutica

Definición y simulación de procesos de montaje aeronáuticos como parte de la maqueta digital industrial en un entorno PLM Colaborativo

Autor: Alberto Pulido Herrera

Tutores: Fernando Mas Morate

Domingo Morales Palma

Depto. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Depto. Ingeniería de la Construcción y Proyectos
de Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Sevilla, 2015



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Aeronáutica

Definición y simulación de procesos de montaje aeronáuticos como parte de la maqueta digital industrial en un entorno PLM Colaborativo

Autor:

Alberto Pulido Herrera

Tutores:

Fernando Mas Morate

Profesor asociado

Domingo Morales Palma

Profesor contratado doctor

Depto. Ingeniería Mecánica y Fabricación

Depto. Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Proyecto Fin de Carrera: Definición y simulación de procesos de montaje aeronáuticos como parte de la
maqueta digital industrial en un entorno PLM Colaborativo

Autor: Alberto Pulido Herrera

Tutor: Fernando Mas Morate
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, 2015

El Secretario del Tribunal

AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primer lugar a toda mi familia, tanto los que están como los que ya se han ido, y en particular a mis padres, Agustín y Catalina. Ellos con su constante afecto, apoyo y capacidad de esfuerzo son un referente para mí, y siempre tendré en cuenta los valores morales que me han enseñado, tanto a nivel profesional como personal. Parte de todos mis logros pasados, presentes y futuros llevan su nombre.

En segundo lugar quiero agradecer a Alba, por reconocer y sacar lo mejor de mí día a día, siendo una fuente incondicional de apoyo. Con ella de la mano estoy aprendiendo que para ser feliz el desarrollo profesional no puede ir aislado del desarrollo personal.

No se me pueden olvidar los amigos. De esta etapa me llevo grandes amigos, que espero conservar durante mucho tiempo, y que en muchos casos me han ayudado incondicionalmente a cumplir mis objetivos. De los antiguos y viejos amigos de la infancia y adolescencia quiero remarcar que aunque por ahora nuestros caminos se alejen, para mí son para toda la vida, nuestra relación es fuente de consejo y apoyo mutuo, y que algún día nuestros caminos se volverán a entrecruzar.

Agradecer a aquellos profesores que se esforzaron por potenciar mi curiosidad, a veces desbordante, desde temprana edad. En especial a Paco, un viejo “maestro” con mayúsculas, que impulsó mi deseo de aprender constantemente sobre cualquier cosa.

Agradecer a Fernando, cotutor del proyecto. De él me llevo muchas cosas y todas valiosas. Como jefe he aprendido mucho sobre cómo desarrollar profesionalmente a una persona, cómo no dejar nunca de aprender en tu trabajo y que el ingeniero debe siempre cuestionarse la situación presente y tratar de mejorar el trabajo de los demás. Como tutor me ha enseñado a tratar los problemas con un método científico y ha renovado mi curiosidad.

Agradecer también a Domingo, cotutor del proyecto. Su ayuda en las últimas etapas del proyecto me ha servido para tener un proyecto rigurosamente escrito, legible y estructurado. Espero que el presente proyecto le sirva como primer peldaño de una nueva y fructífera línea de investigación para él y su departamento.

Por último dar las gracias a los compañeros del trabajo, que desinteresadamente han dedicado su tiempo y conocimiento a resolver las dudas que me han surgido durante el proyecto.

RESUMEN

Este Proyecto Final de Carrera surge de la compaginación con unas prácticas de empresa, recogiendo contenidos tanto del aspecto más académico como de las necesidades industriales actuales de la Ingeniería Aeronáutica.

En él se ha establecido una metodología para el diseño del producto aeronáutico, los procesos de montaje aeronáuticos y los recursos asociados. Esta metodología tiene como objetivo la implementación de una maqueta digital industrial, iDMU. Con ello se persigue la adaptación del diseño industrial y funcional del producto aeronáutico a las nuevas técnicas de ingeniería colaborativa.

Se ha creado un caso de estudio en el que se ha creado una iDMU, con el que se ha establecido además un procedimiento de trabajo para poder implementarla en la plataforma PLM de nueva generación, Catia v6. Por último se ha hecho un estudio de las metodologías de simulación en Catia v6 como herramientas de validación de la iDMU.

ABSTRACT

This Master Engineering Thesis comes from an internship activity, joining both academic contents and nowadays industrial needs from the Aeronautical Engineering.

It has been established a design methodology for an aeronautical product, its assembly processes and its resources associated. This methodology has as objective the implementation of an industrial Digital Mock Up, iDMU. The purpose with it is the adaptation of functional and industrial design of an aeronautical product to the new collaborative engineering techniques.

A case study has been deployed where an iDMU has been created. Furthermore a working procedure has been developed in order to implement the iDMU into a new generation PLM platform, Catia v6.

In the end there is a study of simulation methodologies in Catia v6 as an iDMU validation tool.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice de contenidos	xiii
Índice de Figuras	xv
Lista de abreviaturas	xix
1 Introducción y objetivos	1
1.1 Contexto del proyecto	2
1.2 Objetivos y alcance	2
1.3 Estructura del proyecto	3
2 Revisión bibliográfica	5
2.1 Ingeniería Concurrente	5
2.1.1 Origen y desarrollo de la Ingeniería Concurrente	6
2.1.2 Técnicas de la Ingeniería Concurrente	7
2.1.3 Resultados de la aplicación de la Ingeniería Concurrente	9
2.2 Ingeniería Colaborativa	9
2.2.1 Aproximación científica de la Ingeniería Colaborativa	10
2.2.2 La Ingeniería Colaborativa y los nuevos retos de mercado	11
2.3 Los sistemas PLM	11
2.3.1 Aparición del PLM	11
2.3.2 Alcance de los sistemas PLM dentro del ciclo de vida del producto	12
2.3.3 Funciones y aplicaciones incluidas en un sistema PLM de última generación	13
2.3.4 Contribución de los sistemas PLM a superar los nuevos retos de mercado	14
3 Estado del arte en la ingeniería aeroespacial	17
3.1 Los sistemas PLM en la industria aeronáutica actual	17
3.2 Los avances en Airbus	17
3.2.1 La maqueta digital DMU como vector de la Ingeniería Concurrente	18
3.2.2 La maqueta digital industrial iDMU como habilitante de la Ingeniería Colaborativa	19
4 El ciclo de vida del producto avión	23
4.1 La estructura de producto y el ciclo de vida del avión	23
4.2 As Designed.	25
4.2.1 Metodología de creación del As Designed.	26
4.2.2 Análisis de la metodología de creación del As Designed y propuesta de mejoras.	28
4.3 As Planned.	28
4.3.1 Metodología de creación del As Planned	29
4.3.2 Análisis de la metodología de creación del As Planned y propuesta de mejoras	30
4.4 As Prepared.	32
4.4.1 Metodología de creación de los procesos.	33
4.4.2 Análisis de la metodología de creación de los procesos y propuesta de mejoras	34
4.4.3 Metodología de creación de los recursos.	36
4.4.4 Análisis de la metodología de gestión de los recursos y propuesta de mejoras	36
5 Caso de estudio: el XDA15	39
5.1 As Designed.	39
5.1.1 Implantación de la metodología As Designed en Catia v5.	39
5.1.2 Creación del As Designed del XDA15.	40

5.1.3	Interoperatividad entre Catia v5 y Catia v6.	44
5.2	<i>As Planned.</i>	45
5.2.1	Estructura As Specified.	45
5.2.2	El Entorno Delmia v6. Process Definition.	46
5.2.3	Implantación de la metodología As Planned de Airbus en Delmia v6.	49
5.2.4	Creación del As Planned del XDA15.	53
5.3	<i>As Prepared</i>	56
5.3.1	El entorno Delmia v6. Manufacturing System Definition.	56
5.3.2	Implantación de la metodología As Prepared en Delmia v6.	59
5.3.3	Creación del As Prepared del XDA15. Procesos de montaje.	61
5.3.4	Validación preliminar del Process Plan.	66
5.3.5	Entorno Delmia v6. Resource Definition and Layout. Implantación de la metodología As Prepared en Delmia v6.	68
5.3.6	Creación del As Prepared del XDA15. Recursos.	71
5.4	<i>La simulación como validador del caso de estudio del XDA15.</i>	76
5.4.1	La metodología de simulación en Catia v6.	77
5.4.2	Live Simulation Environment. La simulación en el XDA15.	78
6	Conclusiones y líneas futuras	86
6.1	<i>Conclusiones</i>	86
6.2	<i>Líneas futuras.</i>	88
	Referencias bibliográficas	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de definiciones de Ingeniería Concurrente [2].	5
Figura 2. Desarrollo de las tecnologías de fabricación [3].	6
Figura 3. Comparación entre aproximación secuencial y concurrente [2].	6
Figura 4. Pasos en el Design for Manufacturability [2].	7
Figura 5. Técnicas de calidad según la etapa del desarrollo de producto [2].	8
Figura 6. Aplicación del método científico a la Ingeniería Colaborativa [4].	10
Figura 7. La evolución del PLM [6].	12
Figura 8. El ciclo de vida del producto [6].	13
Figura 9. Fases de desarrollo de la DMU en Airbus [10].	18
Figura 10. Definición de la DMU configurada [10].	19
Figura 11. Distribución de la Extended Enterprise de Airbus a fecha de 2005 [10].	19
Figura 12. Aproximación tradicional frente a la aproximación concurrente [11].	20
Figura 13. As Is (DMU)-To Be (iDMU) [11].	20
Figura 14. Comparación entre la FAL virtual y real del A400M [12].	21
Figura 15. Ejemplo de iDMU del fan cowl del A320neo [12].	22
Figura 16. Ciclo de vida de un avión Airbus [13].	23
Figura 17. Áreas del ciclo de vida y de la empresa afectadas por el proyecto [13].	24
Figura 18. Ejemplo de estructura As Designed [15].	25
Figura 19. Ejemplo de nivel configurable [13].	26
Figura 20. Creación del As Planned a partir del As Specified y el As Designed [13].	30
Figura 21. Estructura e interacción del As Prepared con el resto de vistas [13].	34
Figura 22. Modelo inicial de As Prepared [17].	34
Figura 23. Modelo propuesto de As Prepared.	35
Figura 24. Diseño de los recursos en Catia v5 [17].	36
Figura 25. Estructura As Designed en Catia v5.	40
Figura 26. Skeleton de apoyo según metodología de diseño Airbus [17].	41
Figura 27. Posicionamiento de los componentes.	42
Figura 29. Elementos de unión en el XDA15.	42
Figura 28. Ejemplo de diseño contextual.	43
Figura 30. Estructura antes y después del diseño contextualizado de los elementos de unión.	43
Figura 31. Diseño final del XDA15.	44
Figura 32. XDA15 importado en v6.	45
Figura 33. Modelo de As Specified.	46
Figura 34. Entorno Delmia v6. Process Definition.	46
Figura 35. Tipos de proceso del Process Definition.	47
Figura 36. Código de colores y simbología del Process Definition.	48

Figura 37. Process Definition. Assignment Assistant for Assemblies.	48
Figura 38. Process Definition. Assignment Panel.	49
Figura 39. Process Definition. Smart Zoom.	49
Figura 40. Caso de estudio 1. Creación del Process Structure.	51
Figura 41. Caso de estudio 1. Generación de la estructura de producto As Planned.	51
Figura 42. Estructura planteada y estructura permitida por el Process Group.	52
Figura 43. Creación del As Planned del XDA15.	53
Figura 44. Scope links a niveles inferiores al de producto raíz.	54
Figura 45. Fallo detectado en la gestión por Scope Link.	55
Figura 46. Defecto del Process Definition. Información de montaje residente en CA y no en cada CI.	55
Figura 47. Ejemplo de Build Process [17].	56
Figura 48. Entorno Delmia v6. Manufacturing System Definition.	57
Figura 49. Tipos de Sistema y de Operación.	57
Figura 50. Ejemplo de dos sistemas con Scope Link al mismo nodo de procesos.	58
Figura 51. Código de colores y simbología del Manufacturing System Definition.	58
Figura 52. Manufacturing System Definition. Assignment Panel.	59
Figura 53. Manufacturing System Definition. System Assignment Assistant.	59
Figura 54. Ilustración de la Golden Rule 2 [15].	60
Figura 55. Lista de operaciones y tareas dentro de una solución de fabricación [17].	61
Figura 56. Operación de montaje consecuencia de considerar el CA como nodo de montaje.	61
Figura 57. Tipos de precedencias entre operaciones.	62
Figura 58. Manufacturing System Definition. Manufacturing System Gantt.	62
Figura 59. Efecto del Product Flow en el Manufacturing Gantt	63
Figura 60. As Prepared XDA15. Distribución de estaciones y flujo de producto.	64
Figura 61. Secuencia de montaje de Ala.	64
Figura 62. Secuencia de montaje de fuselaje.	65
Figura 63. Proceso de industrialización del XDA15.	65
Figura 64. Manufacturing Gantt del XDA15 sin considerar recursos.	66
Figura 65. Manufacturing System Definition. System Simulation.	67
Figura 66. Assembly Path Definition. Systems Simulation.	68
Figura 67. Resource Definition and Layout. Tipos de recursos.	69
Figura 68. Resource Definition and Layout. Herramientas de posicionamiento.	70
Figura 69. Layout en planta preliminar. Caso estudio XDA15.	71
Figura 70. Resource Definition and Layout. Sistemas de ejes PPR, planta y avión.	72
Figura 71. Imposibilidad de posicionar producto en el PPR sin cambiar posiciones en el árbol de diseño.	73
Figura 72. Módulo Line Balancing. Resource Utilization Gantt.	74
Figura 73. Detalle del posicionamiento del útil en el raíl.	76
Figura 74. Útiles posicionados. PreFAL fuselaje del XDA15.	76
Figura 75. Ejemplo de comportamiento programable [18].	77

Figura 76. Ejemplo de simulación determinista mediante Tracks [18].	78
Figura 77. Live Simulation Environment. Manufacturing Scenario.	79
Figura 78. Manufacturing Simulation. Sequence Gantt.	79
Figura 79. Información gráfica mostrada al crear el Track y al simular el proceso.	80
Figura 80. Remodelación de la línea después de la simulación.	81
Figura 81. Prueba donde se ve que el recurso se mueve según el último Track ejecutado.	82
Figura 82. Manufacturing System Gantt una vez insertados los Tracks.	82
Figura 83. Interferencia detectada y solucionada durante el montaje del XDA15.	83
Figura 84. Track por defecto partiendo de donde se tiene el producto avión dentro del PPR.	84
Figura 85. Simulación del proceso de ensamblaje.	84

Tabla 1. Coste de un cambio de diseño según el estado del ciclo de vida [2].	8
--	---

LISTA DE ABREVIATURAS

- **ASO (CI/LO/DS):** Assembly Stage Operations. En la vista As Prepared según metodología antigua de Airbus, equivalentes en Ingeniería de Fabricación a los CI/LO/DS de diseño. Contienen la configuración y la información de los procesos de montaje. Se adjuntan a los CI/LO/DS, manteniendo una estructura similar al As Planned.
- **BOM:** Bill Of Materials. Es equivalente a la estructura de producto. Se define como un desglose de todas las materias primas, componentes y conjuntos que forman un producto.
- **CA:** Constituent Assembly. En las vistas As Specified/As Planned, es un nodo delimitador de responsabilidad de cada socio dentro del desglose industrial del producto. Es un conjunto de componentes de avión físicamente representativo, cuyo responsable es el socio que los ensambla hasta que este subconjunto desaparece como montado en el CA inmediatamente superior.
- **CAX:** Computer-Aided Technologies. Se denomina así al paraguas de herramientas que forman parte de un PLM que permiten crear y gestionar los diferentes tipos de información que se genera sobre un producto. Se incluyen en él las herramientas Computer Aided Designed (CAD), Computer Aided Manufacturing (CAM), Finite Element Analysis (FEA), Computational Fluid Dynamics (CFD) entre otros.
- **CC:** Configuration Component. En las vistas As Specified/As Planned, es un nodo que representa trasposos de responsabilidad entre socios a través de los planos de interface, zonas de los conjuntos donde se integran con otros CA. No contiene por tanto componentes a ensamblarse, sino dibujos con información de montaje.
- **CI:** Configuration Item. En las vistas As Designed/As Planned, es un nodo de carácter abstracto, de gestión. Define un requerimiento funcional, por lo que se utiliza como la unidad básica de trazabilidad de la configuración.
- **CRM:** Customer Relationship Management. Es el proceso de gestión de la información referente a la relación entre el cliente que desea un producto o servicio y la compañía que lo produce. a lo largo del ciclo de vida del mismo.
- **DMU:** Digital Mock-Up. Maqueta digital del producto avión, la cual representa funcionalmente el producto, asegurando que el diseño cumple con los requerimientos del cliente.
- **DS:** Design Solution. En la vista As Designed/As Planned, es la respuesta de la oficina de Diseño del producto al requerimiento dado por el CI. Pueden existir diferentes soluciones de diseño para un mismo requerimiento funcional, determinando el LO que lo llama su aplicabilidad.
- **ERP:** Enterprise Resource Planning. Sistema de gestión de la información sobre la producción de un producto, poniendo en una escala temporal los recursos necesarios para llevarla a cabo, ya sean recursos humanos, máquinas o materias primas de fabricación, estos últimos gestionados por el MRP, que se incluye en el ERP.
- **FAL:** Final Assembly Line. Línea de ensamblaje en la que los componentes a ensamblar son grandes conjuntos aeronáuticos, completamente equipados, al final de la cual el avión está completamente integrado y preparado para la entrega a cliente.
- **HTP:** Horizontal Tail Plane. Estabilizador horizontal del avión. Por regla general incluye al timón de profundidad.
- **iDMU:** industrial Digital Mock-Up. Maqueta digital industrial, que debe contener el entorno industrial definido por el producto, los procesos de montaje y los recursos asociados.
- **LO:** Link Object. En las vistas As Designed/As Planned, es el nodo que relaciona la entidad abstracta CI con la información de diseño de la DS. Esta relación se manifiesta a través de la efectividad, el único atributo que contiene el LO, que es el rango de aviones para los que se aplica la DS.
- **MS:** Manufacturing Solutions. En la vista As Prepared según metodología propuesta en el proyecto,

contiene la información de los procesos de montaje. La diferencia entre ellos y los ASO es que no reproducen una estructura similar al As Planned sino que se establece una red de MS con precedencias entre los procesos.

- **MRP:** Material Resource Planning. Sistema de gestión de los materiales de fabricación, planificando cantidades, tiempos de llegada, inventarios, etc.
- **MSN:** Manufacturer's Serial Number. Código identificativo unívoco para cada avión.
- **PDM:** Product Data Management. Área del PLM responsable de la gestión de la información del producto. Esta puede ser tanto de tipo gráfico, generada mediante CAD, o de tipo metadato, como pueden ser estados de madurez, autor, fechas, etc.
- **PLM:** Product Lifecycle Management. Engloba los métodos, procesos y herramientas de gestión de toda la información que define un producto a lo largo de su vida, desde su concepción hasta su obsolescencia.
- **ROI:** Return of Investment. Razón financiera que compara el beneficio obtenido respecto a la inversión realizada.
- **TQM:** Total Quality Management. Estrategia de negocio en la que la calidad del producto o servicio prestado no está basada en la inspección del mismo sino que está embebida en todos los procesos que conforman el ciclo de vida del producto. El objetivo primario es no satisfacer un estándar sino los requerimientos del cliente. Para ello utiliza herramientas de mejora continua, control estadístico de procesos (SPC) entre otros.
- **VTP.** Vertical Tail Plane. Estabilizador lateral-direccional del avión. Por regla general incluye también al timón de dirección.

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El desarrollo de productos complejos como coches, barcos o aviones presenta a menudo problemas comunes. Uno especialmente relevante es que la aproximación tradicional de flujo secuencial y por tanto unidireccional de la información generada a lo largo del ciclo de vida del producto ha dejado de ser válida si se quiere tener una mínima competitividad de mercado.

Con la *ingeniería secuencial* se produce el fenómeno conocido como *over-the-wall* [1]. Este consiste en que tras establecer un diseño funcional que cumple con los requerimientos de cliente, el diseño se congela. Si aguas abajo en la fase de industrialización se encuentran restricciones tecnológicas que impiden la fabricación del producto, es muy difícil cambiar el diseño por estar ya fijado. En el pasado, esto se traducía en desviaciones recurrentes del diseño que según su gravedad podían ser consideradas como concesiones y aceptadas por el cliente o bien obligaba a continuos retrabajos y bloqueos de línea, suponiendo un aumento muy significativo en coste y tiempo de entrega.

Durante mucho tiempo, las debilidades de la ingeniería secuencial fueron aceptadas por el mercado, siempre que no apareciera una cierta competitividad en el sector del producto. Este fue el caso de industrias como la del automóvil, que ya en la segunda mitad del siglo XX se mantenía una feroz lucha por la supervivencia. Las empresas de este sector se vieron obligadas a introducir mejoras continuas en la aproximación secuencial (*lean manufacturing*) y establecer métodos concurrentes que a través de la consideración simultánea en fase preliminar de aspectos del producto en todas las fases del ciclo de vida resolvían parte de los problemas encontrados aguas abajo. De esta forma, tanto el tiempo de entrega como el coste decrecieron considerablemente.

Sin embargo, con la aparición de las potencias emergentes del siglo XXI, estas mejoras son insuficientes. El cliente no está dispuesto a pagar más por algo con la misma calidad que le oferte otra empresa a un precio menor. Hay empresas cuya estrategia para mantener la competitividad ha sido la de desplazar sus centros de producción a lugares con la mano de obra más barata. Sin embargo esto no aumenta la calidad del producto, solo reduce el coste.

Las empresas que quieren mantener u optar al liderato en un sector deben de dirigir sus esfuerzos en el aumento de la calidad de todo su proceso productivo y entregar un producto que cumpla con las especificaciones del cliente, o incluso las mejore, pero reduciendo los costes y el tiempo de entrega. En la actualidad es este aumento de calidad a paridad de coste lo que diferencia a un producto de otro.

Por tanto, se pone de manifiesto que la única arma que posee la empresa de hoy en día para luchar contra el bajo coste de producción en países en vía de desarrollo es su propio conocimiento, tanto del producto como del proceso productivo. El conocimiento residente en la empresa debe ser capturado, conservado, clasificado, enseñado y ampliado dentro de ella.

Actualmente las tecnologías de la información permiten tanto almacenar volúmenes muy grandes como crear flujos muy complejos de información. Estos sistemas informáticos ponen a disposición del usuario la información que justamente necesita, aumentando la eficiencia en tiempo, coste y calidad de los procesos de la empresa.

Las aplicaciones asistidas por ordenador (CAx, *Computer-aided technologies*) y los sistemas de gestión del ciclo de vida del producto (PLM, *Product Lifecycle Management*) constituyen el entorno tecnológico facilitador del trabajo colaborativo en la creación y gestión de la maqueta digital (DMU, *Digital Mock-Up*) del producto a lo largo de su ciclo de vida. En teoría, los sistemas PLM permiten promover el concepto de *Ingeniería Colaborativa*, mediante la integración de equipos de diseño tanto funcional (orientado a diseñar el producto funcionalmente), como industrial (orientado a diseñar cómo fabricar el producto). La utilización de los sistemas PLM-CAx debe permitir generar un único entregable a lo largo de todo el proceso de diseño, denominado *maqueta digital de industrialización* (iDMU, *industrial DMU*). La creación de la iDMU utilizando sistemas PLM-CAx integra el diseño funcional (producto) con el diseño industrial (procesos y recursos) y permite realizar simulaciones para validar tanto los recursos como los procesos de montaje.

1.1 Contexto del proyecto

Este proyecto está enmarcado dentro de unas prácticas de empresa en la compañía Airbus Defence & Space. Por ello y a pesar de que en muchos casos los resultados serían extrapolables a otros sectores se considerará como entorno de trabajo el sector aeronáutico.

En ningún caso se ha utilizado material confidencial para la elaboración del proyecto y cualquier información referente a Airbus a la que se hace referencia ha sido modificada de forma que no coincide con la realidad, sin afectar la función académica de este proyecto.

El software PLM-CAx utilizado en este proyecto ha sido el del proveedor de Airbus, Dassault Systèmes. Se ha utilizado Catia v5 como herramienta representativa de la generación PLM anterior y la plataforma Enovia/Catia/Delmia v6 (versión r2013x) como PLM de nueva generación.

Se ha decidido además mantener Catia v5 como software de diseño funcional y Catia v6 como software de diseño industrial. Esto es así porque no hay previsión de aparición de nuevos programas de avión en Airbus para los próximos años y los últimos modelos de la compañía están en v5. Por tanto, en el corto plazo no tiene sentido una migración de la oficina de Diseño a v6. Sumado a que los desarrollos de v6 están más orientados a potenciar las capacidades de industrialización que al diseño funcional, lo que se busca es una interoperabilidad entre ambos sistemas que asegure un trabajo colaborativo entre las áreas de Diseño e Industrialización.

Otro requisito del proyecto es partir de metodologías ya existentes en Airbus a la hora de analizar las diferentes etapas del ciclo de vida.

1.2 Objetivos y alcance

El objetivo principal de este proyecto es la definición de un procedimiento de trabajo en un entorno PLM-CAx de nueva generación que permita la definición y validación de procesos de montaje aeronáuticos y los recursos asociados, como parte de la maqueta digital industrial iDMU.

Para poder alcanzar este objetivo principal se ha establecido la realización de la siguiente serie de objetivos concretos:

- Investigar posibles incompatibilidades entre la metodología de Airbus y los sistemas PLM tanto de la generación anterior como de la nueva generación. A la vista de los resultados que se obtengan, proponer posibles cambios en la metodología de Airbus o establecer nuevos requerimientos a los proveedores de PLM.
- Documentar las carencias o defectos que se encuentren tanto en las metodologías como en los sistemas PLM, indicando sus posibles causas y los *workaround* que lo resuelvan.
- Comprobar la interoperabilidad entre los sistemas PLM de antigua y nueva generación.
- Demostrar la viabilidad de creación de la iDMU en la plataforma PLM de nueva generación.
- Desarrollar un caso de estudio del ciclo de vida de un producto simplificado.

Se hace patente la importancia no solo de demostrar que la generación de la iDMU es posible con los nuevos sistemas propuestos por los proveedores de PLM sino además evaluar el grado de cumplimiento con la metodología utilizada actualmente por Airbus.

El caso de estudio del ciclo de vida se ha desarrollado sobre un modelo de avión ficticio simplificado, diseñado ex profeso durante el proyecto. El alcance del proyecto incluye como ciclo de vida solamente las fases de diseño e industrialización. Quedan fuera del ámbito de este proyecto otras actividades del ciclo de vida como el estudio de marketing y la adquisición de los requerimientos del cliente aguas arriba, o las fases de la producción en serie y de servicios aguas abajo.

Como ya se ha comentado, la fase de diseño del modelo se realiza en Catia v5 mientras que la industrialización del mismo se lleva a cabo en v6. Por tanto el resultado que se genera es un entregable iDMU, pudiendo validarse en él tanto los procesos como los recursos de montaje del mismo, sin considerar simulaciones ergonómicas complejas.

1.3 Estructura del proyecto

El capítulo 2 contiene una revisión bibliográfica de los conceptos clave a un nivel genérico, sin entrar en las aplicaciones concretas en un sector.

El capítulo 3 muestra cómo la industria aeronáutica ha implementado los conceptos clave y en particular los avances desarrollados por el gigante europeo Airbus.

El capítulo 4 es un desarrollo metodológico de las etapas del ciclo de vida afectadas por el proyecto.

En el capítulo 5 se crea un procedimiento de trabajo a través de un caso de estudio. Con él se trata de implementar la metodología desarrollada en el PLM de nueva generación Catia v6.

En el capítulo 6 se establecen las principales conclusiones extraídas a lo largo del proyecto y se plantean posibles desarrollos futuros que se derivan de este trabajo.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo se centra en el estudio del origen y aplicabilidad de la Ingeniería Concurrente, la Ingeniería Colaborativa y los Sistemas PLM. Con ello se pretende dar al lector un marco de referencia genérico a los conceptos involucrados en el problema planteado en la Introducción, con el objeto de definirlos, hallar sus relaciones y describir las técnicas empleadas sobre las que se asienta la investigación realizada.

2.1 Ingeniería Concurrente

El concepto *Ingeniería Concurrente* no tiene una definición clara y establecida [2]. La más aceptada es la que recoge el *Institute of Defence Analysis* que la define como *una aproximación sistemática al diseño concurrente de productos y sus procesos, incluyendo su fabricación y soporte. Esta aproximación lleva a los desarrolladores a considerar todos los elementos del ciclo de vida desde la concepción hasta la entrega incluyendo calidad, coste, tiempo y requerimientos del cliente.*

Sin embargo, se han realizado múltiples estudios que demuestran un abanico de definiciones. Estas pueden ser clasificadas según su nivel operacional: a nivel de objetivo, estratégicas o tácticas.

La definición a nivel de objetivo es la más genérica puesto que presenta a la Ingeniería Concurrente como el vehículo principal para mejorar la introducción de un producto en el mercado y por tanto de mejorar el rendimiento global de la compañía. Esta definición es demasiado ambiciosa puesto que existen otros métodos igualmente válidos para conseguir este objetivo como es una mejor gestión de las tecnologías, mejor selección de ideas, etc.

En un segundo nivel estaría la definición a nivel estratégico. Esta es la definición propuesta al principio como más aceptada, la ingeniería concurrente entendida como la estrategia de considerar simultáneamente todos los aspectos del producto. Esta estrategia estaría contenida en el objetivo principal de primer nivel ya descrito.

Por último se tendría una serie de definiciones a nivel táctico, que describe la ingeniería concurrente como un conjunto de técnicas y herramientas que articulan la estrategia propuesta en el segundo nivel. Estas técnicas estarían divididas a su vez en técnicas orientadas al Total Quality Management (TQM) y técnicas de diseño para la fabricación (CAX, equipos multidisciplinares).

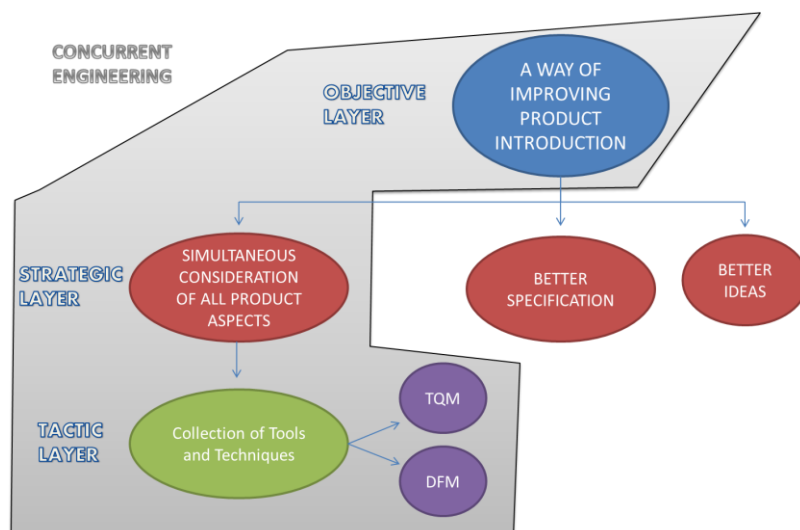


Figura 1. Clasificación de definiciones de Ingeniería Concurrente [2].

2.1.1 Origen y desarrollo de la Ingeniería Concurrente

El mercado siempre ha tendido a ser cada vez más exigente. Los clientes quieren una respuesta más personalizada pero a la vez más rápida, de mayor calidad y de menor coste. Esto ha obligado a la empresa proveedora a optimizar sus procesos para satisfacer a sus clientes. Metodologías como la fabricación flexible o el lean han sido empleadas desde hace más de medio siglo, pero no dejan de ser optimizaciones de un proceso de fabricación básicamente secuencial.

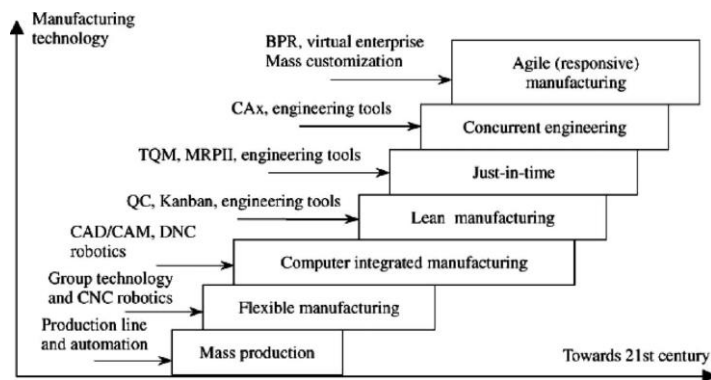


Figura 2. Desarrollo de las tecnologías de fabricación [3].

La generación de un nuevo producto comenzaba con la selección de uno entre una serie de posibles diseños, orientados por objetivos de cara al mercado y las restricciones tecnológicas del momento. El diseño elegido era transferido a la función de industrialización que desarrollaba un plan de fabricación del mismo guiado principalmente por objetivos operacionales (minimización de costes, optimización de capacidad y de carga de trabajo). Finalmente se trazaba un plan logístico y de proveedores teniendo como restricción todo lo anterior.

Este proceso secuencial presenta dos principales deficiencias. La primera es que es lento porque se pierde la oportunidad del proceso en paralelo. La segunda es que lleva al máximo a soluciones parcialmente óptimas ya que al estar desacopladas las funciones a lo sumo, cada una puede alcanzar un óptimo local.

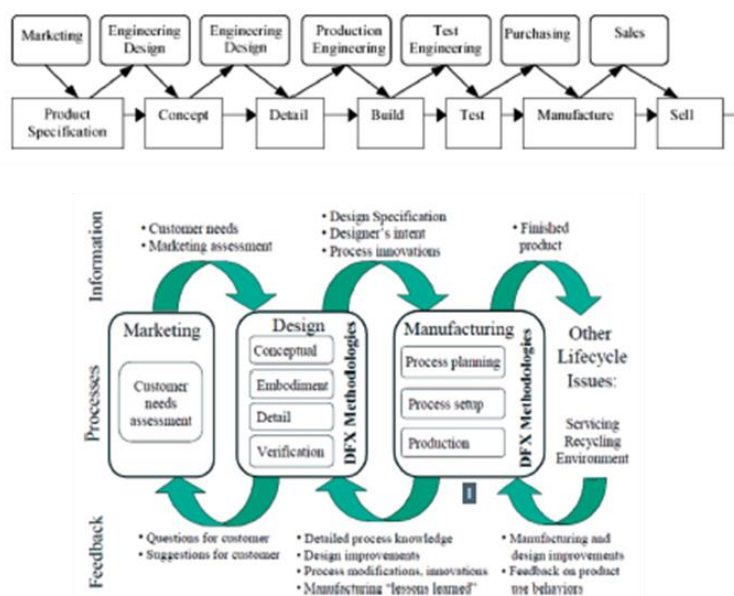


Figura 3. Comparación entre aproximación secuencial y concurrente [2].

Sin embargo a finales de los años ochenta surge el paradigma de Ingeniería Concurrente que trata de eliminar el anterior proceso. La Ingeniería Concurrente se basa en flujos paralelos de decisiones sobre el producto y su producción tan pronto como sea posible, tomando en consideración la industrialización en las etapas más tempranas de diseño.

Por un lado esto disminuye el tiempo de desarrollo respecto a una aproximación secuencial ya que reduce el número de rediseños y retrabajos. Además gracias a ello se suaviza la producción, ayudando a reducir costes y aumentando la calidad.

Por otro, se puede llegar a una optimización global del desarrollo del producto, pero complica el problema de diseño ya que el objetivo es más complejo y el número de variables y restricciones a tener en cuenta es mucho mayor.

2.1.2 Técnicas de la Ingeniería Concurrente

Design for Manufacturability

Es la práctica del diseño simultáneo del producto y su posterior fabricación. En la práctica los sistemas ingenieriles son demasiado complejos como para verdaderamente considerar todos los aspectos que influyen en él simultáneamente luego la aproximación que se suele hacer es una espiral iterativa en la que expertos en marketing, diseñadores, ingenieros de fabricación y de otras áreas interactúan con sus niveles inmediatamente superior e inferior. En teoría a través de estos bucles la información podría moverse desde y hacia cualquier punto del ciclo de vida del producto.

Esta técnica viene a implementar el concepto de paralelismo en el flujo de trabajo. Sirve para compañías de cualquier tamaño y en todos los casos reducen el tiempo y coste de desarrollo y asegurando una transición suave a la industrialización, disminuyendo el tiempo de lanzamiento al mercado. Integra el diseño del producto con el diseño del proceso productivo a través de una serie de pasos escalonados pero con cierto grado de simultaneidad.

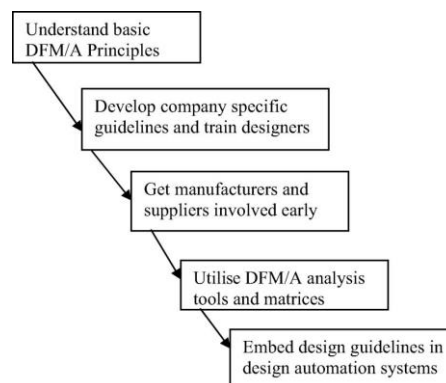


Figura 4. Pasos en el Design for Manufacturability [2].

Design for Quality.

La calidad debe ser incluida dentro del desarrollo de un producto, no un elemento de inspección. Se busca seguir el modelo TQM. Anteriormente la calidad era percibida como la conformidad entre el producto en estado de entrega y sus especificaciones. Esto llevó a desarrollar técnicas que mantuvieran bajo control los procesos productivos dentro de las especificaciones, como el control estadístico de procesos (SPC). Más tarde la calidad se expandió al cumplimiento de requerimientos del cliente. Hoy el concepto es el de superar las propias expectativas del cliente, proporcionando un producto con un valor superior al esperado.

Para ello se están implementando una serie de herramientas de calidad que enfatizan la mejora continua, entre las que cabe destacar el Quality Function Deployment (QFD), el modelo de ingeniería de calidad de Taguchi y

el benchmarking.

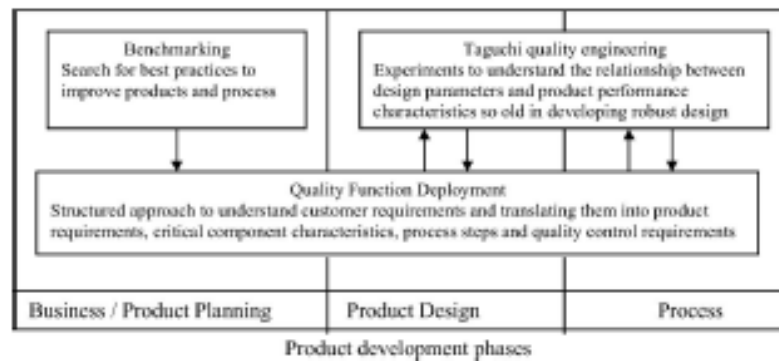


Figura 5. Técnicas de calidad según la etapa del desarrollo de producto [2].

Design for Cost.

Los costes de producto son de importancia vital a la hora de plantear un nuevo desarrollo. Anteriormente la función marketing hacía una estimación del precio necesario para alcanzar la cuota de mercado deseada y esto marcaba el precio propuesto en las negociaciones de contrato al comienzo del desarrollo del nuevo proyecto y por ende el coste del mismo. Este coste era trasladado como requerimiento, sin ser consensuado con diseño.

Esta falta de coordinación entre diseño y marketing podía provocar cambios sustanciales en los costes totales del producto si ocurría alguna desviación aguas abajo, provocando renegociación de contratos, pérdida de mercados y en algunos casos finalización del proyecto. Está demostrado que la relación entre el estado del ciclo de vida en el que se encuentra un producto y el impacto asociado al coste total del mismo sigue una distribución de Pareto.

Tabla 1. Coste de un cambio de diseño según el estado del ciclo de vida [2].

Lifecycle Stage	Total Cost of Design Change (\$/Change)
Early Design	1.000 \$
Design Testing	10.000 \$
Process Planning	100.000 \$
Production Testing	1.000.000 \$
Final Production	10.000.000 \$

Si se integra en la valoración del coste total aspectos de todo el ciclo de vida del producto cuando este se encuentra en sus etapas más tempranas, las estimaciones serán mucho más cercanas al coste real. Actualmente existen sistemas que modelan parcialmente los costes indirectos y diferentes mapas de procesos para obtener costes estimados de producto. Sin embargo son incompletos puesto que no incluyen una gama amplia de operaciones de procesos de fabricación o elementos como el coste de las herramientas o la prueba de equipos.

Todas estas técnicas tienen como misión la idea de encontrar el punto óptimo global del desarrollo de un producto en vez de alcanzar óptimos locales por función pero que pueden resultar muy perjudiciales aguas abajo.

2.1.3 Resultados de la aplicación de la Ingeniería Concurrente

La Ingeniería Concurrente ha sido implantada con éxito en grandes compañías desde finales de los ochenta, como Ford, Boeing, Rolls-Royce así como en la pequeña y mediana empresa y en sectores tan diversos como la automoción, el aeroespacial, dispositivos médicos, electrónica o material agrónomo. A modo ilustrativo se exponen los valores medios de mejora con la ingeniería concurrente:

- Descenso del Lead Time
 - 50% de reducción del tiempo de desarrollo.
 - 50% de reducción del tiempo de lanzamiento al mercado.
- Mejora de la calidad
 - 75% de reducción en el número de rediseños.
 - 75% menos de desperdicios y retrabajos.
 - 400% de mejora total de la calidad.
- Reducción de costes
 - 50% de aumento de la productividad.
 - 70% de aumento de los beneficios.
 - 40% de reducción de los costes de fabricación.

2.2 Ingeniería Colaborativa

Al igual que ocurre con la Ingeniería Concurrente, no hay una única definición que se emplee para describir la Ingeniería Colaborativa [4]. La definición más formal la describe como *una disciplina de la ingeniería, de carácter socio-técnico, que facilita el establecimiento de acuerdos técnicos dentro de un equipo multidisciplinar en el que cada uno de los miembros trabaja con un objetivo común pero con recursos limitados o con intereses en conflicto con otros miembros*.

Puesto que no hay unicidad de definiciones para los términos Ingeniería Concurrente e Ingeniería Colaborativa, a menudo son confundidas. Son muchas las empresas que dicen estar empleando actualmente métodos de ingeniería colaborativa y en realidad están aplicando métodos de concurrencia o ni una ni la otra. Se hace pues necesario aclarar la diferencia entre ambas expresiones.

La anterior definición empieza diciendo que la Ingeniería Colaborativa es una disciplina de la ingeniería con componente técnico pero también social. Quizá este sea un punto de partida claro que refleje la diferencia entre concurrente y colaborativo.

Se puede decir que en la Ingeniería Concurrente la comunicación está mediada [5], es decir, la información es transmitida según la dirigen unos procesos ya establecidos. Sin embargo en la Ingeniería Colaborativa es la comunicación la que genera los procesos.

La filosofía básica de la Ingeniería Concurrente es desarrollar los productos con procesos paralelos en vez de secuenciales, pero esto a menudo es más una serie secuencial de procesos con subprocesos en paralelo. Aunque los equipos de trabajo que se forman son multidisciplinarios suelen seguir teniendo que reportar a su superior funcional y normalmente la vida de estos equipos solo se alarga hasta alcanzar el grado de detalle requerido para alcanzar la siguiente fase secuencial del producto. Además el grado de colaboración es muy bajo puesto que los integrantes del equipo solo se comunican en las reuniones de seguimiento del proyecto y en entornos poco favorecedores para la comunicación. Esta es la problemática más habituales en empresas geográficamente dispersas.

Una solución tradicional a ella ha sido la instalación de un entorno permanente de trabajo en el que se desplazan todas las personas implicadas en el proyecto y que cara a cara trabajan en el mismo, estableciéndose una comunicación directa. Es la propia comunicación la que crea los procesos de trabajo y se eliminan las revisiones discretas. Esto conduce a una reducción del tiempo de desarrollo del proyecto puesto que la

información está disponible en el momento en el que se necesita y además la siguiente función no tiene por qué esperar a recibir el paquete completo de la anterior para poder trabajar.

Se observa que el concepto no es nuevo. En lo que se está trabajando es en el desarrollo de herramientas y métodos virtuales que simulen ese “entorno colaborativo” sin necesidad de desplazar a los integrantes de un equipo de trabajo a un sitio concreto.

2.2.1 Aproximación científica de la Ingeniería Colaborativa

La ingeniería colaborativa persigue entender los mecanismos de toma de decisiones y dinámica de grupos desde un punto de vista centrado en el humano, que pueda crear en todos los participantes de un grupo de trabajo una conciencia colectiva que los oriente a llegar a acuerdos racionales y orientados al objetivo. Solo una vez entendidos estos mecanismos y usando las tecnologías actuales, se pueden simular los entornos colaborativos.

De siempre se ha conocido que el objetivo alcanzado de un trabajo en equipo *es* mayor que la suma del trabajo individual de los integrantes. El origen de este axioma es tan antiguo como la propia humanidad y prueba de ello es nuestra naturaleza gregaria y el desarrollo de comunidades y civilizaciones.

Sin embargo se dan ocasiones en las que el axioma anterior se contradice y es aquí donde la ingeniería colaborativa entra como disciplina científica. Desconocemos aun muchos de los mecanismos de colaboración, coordinación y cooperación humana hasta el punto que cuando se reconoce un buen ejemplo de ellos y se quiere reproducirlo en otro ámbito se antoja bastante difícil.

Esto es así porque anteriormente se ha pensado que la colaboración humana era una habilidad social adquirida y que por tanto no podía ser estudiada puesto que no existía modelo matemático completo, estable, convergente y único en el que asentarse. Esto no exenta a la colaboración humana de ser estudiada de una manera analítica, rigurosa y sistemática. Se le ha intentado encuadrar matemáticamente pero sin éxito en el campo de la teoría de juegos y socialmente en la dinámica de grupos pero por sí solos no son ni tan siquiera una buena aproximación al problema real.

La solución ha sido tratar de desarrollar una estructura base que ante la falta de ciencias que soporten un modelo sea la propia estructura que cumpliendo con el método científico la que genere la ingeniería colaborativa como ciencia.

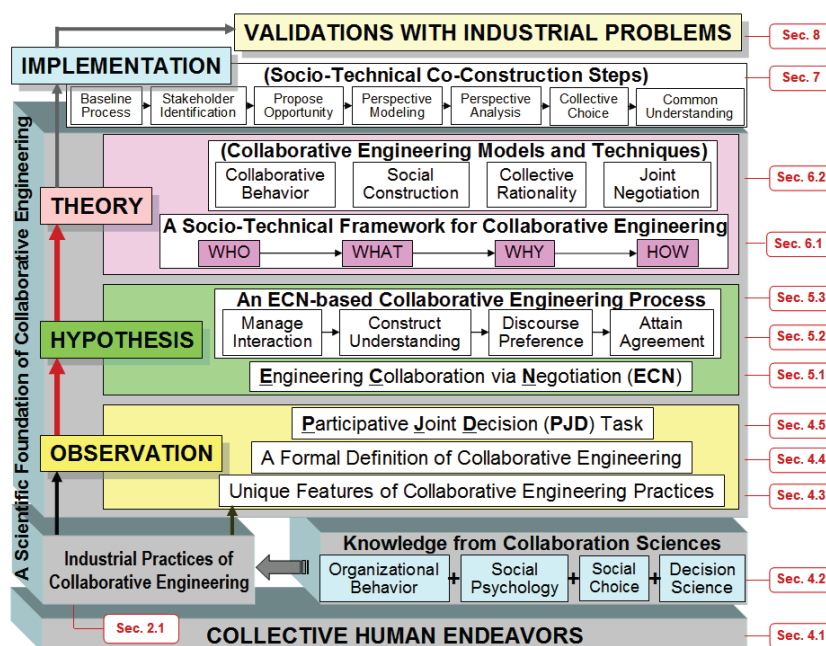


Figura 6. Aplicación del método científico a la Ingeniería Colaborativa [4].

2.2.2 La Ingeniería Colaborativa y los nuevos retos de mercado

A pesar de la falta de madurez de la disciplina y la dificultad al evaluar los Returns on Investments (RoIs) se han aplicado algunas iniciativas que han resultado satisfactorias en términos de ahorro y mejora de la productividad para las empresas afectadas.

El planteamiento que lleva a considerar la ingeniería colaborativa como una necesidad real es la globalización del mercado. Nadie puede lograr una producción por sí solo, es necesaria una colaboración a todos los niveles, ya sean técnicos o de organización. A pesar de encontrar aplicaciones en el mercado que dicen ser soluciones de ingeniería colaborativa, es necesario analizar si cubren los principales problemas de la industria para los cuales se ha identificado como idónea para corregirlos. Estos son:

- Mala definición del problema.
- Problemas abiertos debido a la escasez de recursos o de conocimientos.
- Fuerte interdependencia entre los socios.
- Heterogeneidad en estructuras, recursos, conocimientos e intereses entre los socios, por lo que a menudo interpretan el problema de manera diferente.
- Diferentes perspectivas a menudo contrapuestas entre los socios.

Las mejoras se ponen de manifiesto mejorando el trabajo en equipo (posibilidad de equipos remotos, generación colaborativa de ideas, conclusiones comunes y mejores decisiones) y el flujo de trabajo (reducción del tiempo de desarrollo, productos más innovadores, mejor integración de la tecnología, mejora de la calidad del producto y el proceso e incremento del valor añadido).

Por último se exponen casos reales de implantación de la ingeniería colaborativa.

- Canon ha reducido significativamente el número de iteraciones de diseño, costes totales y Lead-Time.
- Hewlett-Packard ha reportado un aumento del 240% del RoI en el desarrollo de sus productos globales.
- McDonell Douglas ya había usado aproximaciones de ingeniería colaborativa para distribuir y sincronizar información de producto a lo largo de la Extended Enterprise.
- La NASA utilizó para el programa de lanzadera la ingeniería colaborativa para compartir e intercambiar datos de ingeniería entre sus empleados.

2.3 Los sistemas PLM

CIMData define PLM [6] como *una estrategia de negocio que implanta una serie de soluciones que soportan la creación, gestión, disseminación y uso colaborativo de la información que define el producto a través de la “extended Enterprise” desde su concepción hasta el final de su vida, integrando personas, procesos, sistemas e información.*

Esta es una definición extensa y compleja, en el siguiente apartado se tratará de describir el recorrido que se ha tenido hasta alcanzar dicha definición y posteriormente analizar las consecuencias del uso de esta estrategia en la empresa.

2.3.1 Aparición del PLM

El concepto “product lifecycle management” (PLM) ha emergido después de unos veinte años de evolución tecnológica y del mercado.

En los años ochenta se desarrollaron múltiples sistemas Computer Aided (CAx) que hicieron crecer enormemente el volumen de información de producto. Había una cierta confusión en determinar qué se podía considerar como información relacionada con el producto y su categorización. Tanto es así que todo se englobó bajo la expresión “product data”. Rápidamente se introdujo el concepto Product Data Management (PDM), cuya aplicación era gestionar y mantener el control de toda la información ingenieril generada.

El PDM permitía estandarizar elementos, controlar documentación, revisiones, mantener actualizada la lista de materiales (BOM) y establecer una estructura de producto. Esto además reducía el riesgo de usar versiones incorrectas de diseño y poder reutilizar una mayor cantidad de información. Esta función no ha desaparecido y los modernos sistemas PLM incluyen PDM en su arquitectura.

Sin embargo en breve tiempo comenzaron a aparecer múltiples acrónimos derivados con sus respectivas definiciones, algunas veces solapándose entre sí, que confundieron a los usuarios. Este fenómeno ocurrió porque en sus primeras fases era más una implantación personalizada para cada empresa de soluciones muy concretas y en principio independientes, solo manteniendo en común el enfoque al dato de producto y en particular al dato tecnológico. En su mayoría trataban de gestionar planos técnicos, luego su uso era limitado a los departamentos de ingeniería.

Ya a mediados de los noventa, tras reconocer que muchas de las necesidades de las empresas eran en gran medida comunes, se trató de agrupar las funciones en kits de aplicaciones genéricas según el tipo de función que resolvían. A finales de los noventa y en vista de las mejoras obtenidas se empezó a trabajar en la idea de la estandarización de las aplicaciones para resolver ciertos problemas a nivel ya de compañía, que permitieran el uso de una plataforma común para áreas muy diversas en la empresa y que trabajasen sobre partes del ciclo de vida del producto diferentes. El concepto de solución PLM había surgido.

Hoy en día la tendencia es a definir un conjunto de soluciones de negocio que permita al PLM convertirse en la herramienta clave en la gestión estratégica de la compañía. Esto ha hecho que la adquisición de un PLM por parte de la compañía sea una de las decisiones más importantes de la misma y por tanto requiere de la implicación de toda la alta dirección.

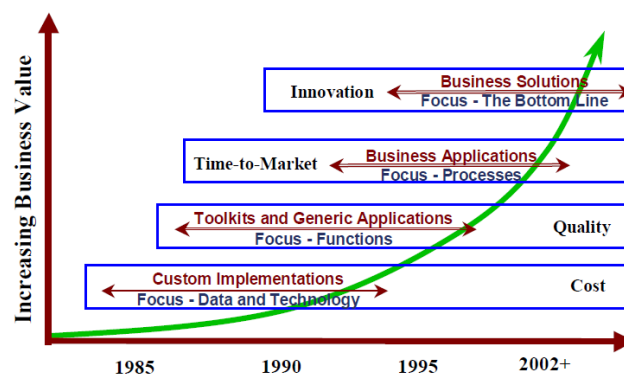


Figura 7. La evolución del PLM [6].

2.3.2 Alcance de los sistemas PLM dentro del ciclo de vida del producto

El ciclo de vida de un producto genérico está compuesto por una serie de etapas. Según la etapa en la que se encuentre el producto actuarán con mayor o menor relevancia las distintas funciones de la empresa. Por ejemplo para la etapa de toma de requerimientos y estudio de oportunidades de mercado la función de Marketing será la que cobre mayor protagonismo, para la fase de diseño será Ingeniería la que aporte mayor valor al producto al igual que Servicios en la etapa de soporte y mantenimiento.

El ciclo de vida del producto se puede entender además como la interacción de tres ciclos de vida diferentes pero que deben estar coordinados entre sí:

- Ciclo de vida de la Definición de Producto. Intangibles que definen el producto.
- Ciclo de vida de la Producción de Producto. Parte física del producto.
- Ciclo de vida del Soporte a las Operaciones. Recursos financieros y humanos asociados al producto.

Cada ciclo engloba los procesos, información, sistemas y personas que lo gestionan. En el contexto de un PLM lo primordial es la gestión de la definición intelectual del producto. Al igual que el ciclo de vida global, este

comienza en el primero momento de la toma de requisitos y de concepción del producto, extendiéndose hasta la obsolescencia y no soporte en servicio. Debe de incluir la definición completa del producto: componentes mecánicos, electrónicos, software, documentación, etc.

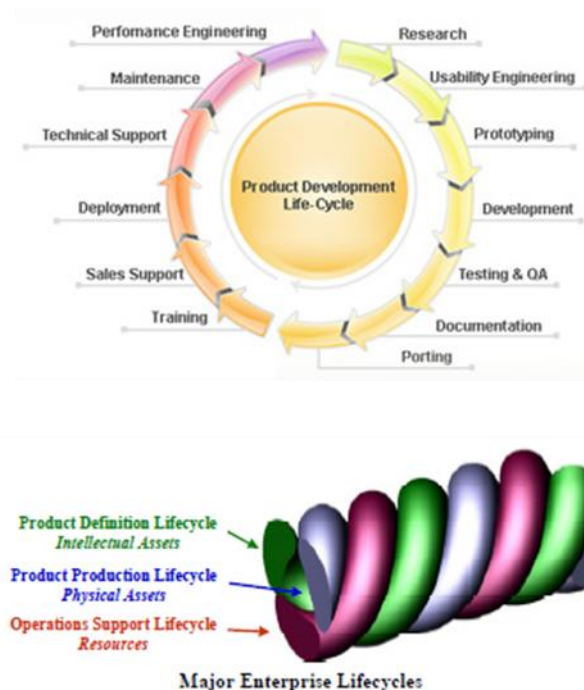


Figura 8. El ciclo de vida del producto [6].

Por tanto no se reduce a la etapa de diseño sino que la definición del producto realmente es la propiedad intelectual del mismo. Esta propiedad intelectual debe ser debidamente capturada, mantenida y contrastada. Además no reside exclusivamente en la propia empresa tractora sino que se extiende a través de la red de proveedores, colaboradores y clientes, es decir, el PLM debe ser capaz de gestionar el conocimiento por toda la Extended Enterprise.

No es un alcance primario del PLM el enfoque sobre la gestión de la producción del producto, desde la primera pieza hasta la entrega, es decir, la planificación, control de la producción, logística o gestión de la cadena de suministro. En esto el ERP es la principal solución propuesta en el ámbito empresarial.

Tampoco entra dentro del alcance de un PLM la gestión de las áreas soporte que posee la empresa. Esto es gestión de los recursos humanos, finanzas, marketing o ventas. El Customer Relationship Management (CRM) constituye una solución para ello.

Por tanto a modo aclarativo el PLM nos daría el qué, el cómo y el con qué fabricamos y el ERP nos daría el cuándo y el dónde. Sin embargo, la estrategia de los proveedores de PLM de nueva generación es la de ampliar el terreno hacia áreas tradicionalmente ocupadas por el ERP, favoreciendo la interoperabilidad y transición entre ambos.

2.3.3 Funciones y aplicaciones incluidas en un sistema PLM de última generación

Como se ha dicho previamente, los nuevos sistemas PLM están considerados como una herramienta estratégica de la empresa y como tal transversal a todas las áreas funcionales de ella. Entre las funciones de un PLM destacan [7]:

- Gestión de Documentación/Datos. Permite acceder, organizar y almacenar toda la documentación generada durante la vida del producto, incluyendo mecanismos de revisión, control, clasificación, análisis y generación de informes. Pueden ser documentos de texto, tablas, planos, audiovisuales, etc.

- Gestión del producto/configuración de producto. Posibilitan la gestión de productos, estructuras de producto, atributos, nuevas revisiones de diseño, reutilización, etc.
- Gestión del cambio. Capacitan para trazar, actualizar y dar visibilidad de cambios en la compañía, ya sean de producto, de organización, etc.
- Gestión de flujos de trabajo y de procesos. Permiten crear procesos de negocio y definir flujos de trabajo además de automatizarlos con lógicas y patrones.
- Gestión de proyectos y programas. Posibilitan la planificación, gestión y control de proyectos a través de hitos y control de entregables. Dan visibilidad del estado del proyecto tanto en coste como en progreso. Muestran relaciones entre los recursos y los entregables. Están disponibles diversas formas de visualización con gráficas, grafos, cuadros de mando, etc.
- Gestión colaborativa. Son capaces de gestionar equipos geográficamente diversos pero trabajando sobre una misma plataforma y usando datos actualizados.
- Visualización. Incluyen formas de visualización ligeras y de maquetación virtual.
- Integración. Gran capacidad de intercambio de datos de diferente forma y proveniente de otros sistemas externos como Enterprise Resource Planning (ERP) o CAx.
- Gestión de infraestructuras. Pueden dar soporte y gestionar redes, servidores y bases de datos.
- Gestión del conocimiento. Ideas, opiniones, experiencia adquirida tanto de la empresa como del exterior (clientes, proveedores) pueden ser capturadas, analizadas y puestas a disposición de la compañía.

2.3.4 Contribución de los sistemas PLM a superar los nuevos retos de mercado

El mercado actual, sea cual sea el producto, tiene una tendencia común. Cada vez las expectativas del cliente son más altas, tanto en calidad del producto como en su personalización, además de a un coste razonable y entregado a tiempo. Esto sumado a la globalización hace mucho mayor la competitividad entre empresas y acrecienta la necesidad de ser líder del sector. La empresa tiene que proveer un producto robusto, de valor para el cliente y rápidamente.

Para alcanzar esta excelencia operativa es necesario operar con eficacia, eficiencia y flexibilidad. Es entonces cuando la innovación en la empresa juega un factor determinante. Mientras que anteriormente era el producto físico en sí el que poseía el valor actualmente es el uso de nuevos métodos, procesos y herramientas las que aportan el valor frente a la competencia. El cliente ahora valora más el capital intelectual que lleva el producto que lo propiamente tangible.

Sin embargo, de nada sirve que un producto lleve consigo un gran componente innovador si su coste no viene acompasado con la demanda del mismo. Por ello, la innovación debe ser llevada a cabo siempre para reducir el coste total de producto.

En su momento el ERP abordó y mejoró la eficiencia operativa, pero la continua presión sobre la reducción del tiempo de desarrollo de productos, la mejora de la calidad y la reducción de costes ha convertido a esta herramienta por sí sola como insuficiente para encarar la gran exigencia del mercado.

El PLM es la herramienta estratégica necesaria para superar estos retos, puesto que provee una plataforma común en la que las organizaciones pueden desarrollar y llevar al mercado sus productos de una manera mucho más eficiente y eficaz. Aunque la empresa sea geográficamente dispersa el PLM asegura una estructura de organización global, uniforme y estandarizada, creando una cadena de valor virtual que no entiende de tiempo o distancia. Esto mejora la capacidad, eficiencia y eficacia de la compañía.

Desde el punto de vista de la integración es capaz de bajo una única plataforma gestionar toda la información de producto generada a lo largo de su ciclo de vida. La información es generada, clasificada, mantenida y protegida, a sabiendas que es este conocimiento el elemento de valor más importante de la empresa.

El PLM por tanto es un catalizador perfecto para actividades colaborativas, favoreciendo la reutilización de la información y facilitando la gestión del cambio.

En general, el PLM ayuda a la empresa a superar los retos anteriormente comentados entregando productos más innovadores, reduciendo costes, mejorando la calidad, acortar el tiempo de lanzamiento al mercado y de retorno de la inversión y estableciendo relaciones mucho más colaborativas entre clientes, socios y clientes. Todo esto se traduce en un aumento del beneficio para toda la Extended Enterprise y asegurando por tanto su supervivencia a largo plazo. Este aumento del beneficio es habitual que esté en el rango del 10 al 100 por ciento.

El PLM ha sido implantado con éxito en empresas de muy diversa índole: aeroespacial, automoción, farmacéuticas, servicios sanitarios, financieras, etc.

A modo de conclusión se exponen los datos extraídos sobre una empresa tras implantar un PLM.

- 40% de reducción del tiempo de ciclo de cambio en el producto.
- 15-30% de reducción en número de prototipos.
- 40% de reducción del Lead Time.
- 25 % de incremento de la productividad en ingeniería de diseño.
- Reducción del tiempo de desarrollo en un 75%.
- Reducción del tiempo para saber el coste incurrido sobre un producto de días a minutos.
- 83% de reducción del tiempo de una revisión de ingeniería.

3 ESTADO DEL ARTE EN LA INGENIERÍA AEROESPACIAL

Este capítulo trata específicamente la adaptación de los conceptos genéricos de Ingeniería Concurrente, Ingeniería Colaborativa y los sistemas PLM a la industria aeroespacial. Tras un breve repaso a la industria aeroespacial en general se entrará en más detalle en los proyectos llevados a cabo por el fabricante Airbus, acorde con la línea de desarrollo del trabajo planteada en la Introducción.

3.1 Los sistemas PLM en la industria aeronáutica actual

Un avión en la actualidad está compuesto por un número ingente de piezas, superando el más de medio millón de componentes. Además la cadena de suministro tiene unas dimensiones globales, con decenas de socios y proveedores deslocalizados geográficamente. Es por ello que los grandes constructores de aeronaves son compañías idóneas para la introducción de prácticas colaborativas.

Además como se ha visto en el capítulo anterior, las nuevas plataformas PLM son catalizadoras de la ingeniería colaborativa, pues permiten trabajar a todos los implicados con una metodología, entorno e información comunes y disponibles en tiempo real. Se pueden enumerar ciertas introducciones de soluciones PLM en la industria aeronáutica que han tenido un alto impacto positivo en el negocio [8]:

- La solución PLM de IBM-Dassault Systèmes, ENOVIA, ha permitido a Dassault Aviation y sus 27 socios de Norteamérica y Europa diseñar de una manera colaborativa el Falcon 7x.
- La solución PLM de Siemens, Teamcenter, fue usada para el desarrollo colaborativo del Boeing 787 y el F-35.

La enorme penetración de los sistemas PLM en la industria aeronáutica respecto a otros sectores se debe a varios factores. Uno es el producto en sí. El avión se caracteriza por un ciclo de vida muy largo, llegando en algunos casos al medio siglo; es un producto muy complejo en número y diversidad de componentes y además el número de prototipos físicos generados es muy pequeño.

El otro y más importante es el mercado. Tradicionalmente los fabricantes de grandes aviones civiles han sido dos, Airbus y Boeing. Este duopolio se ha mantenido estable durante muchos años, estando equilibradas las cuotas de mercado de ambas compañías. Sin embargo en los últimos tiempos han aparecido una serie de fabricantes cuya estrategia a medio y largo plazo es la de ocupar la cuota de mercado de los anteriores, como son Embraer, Bombardier y otras compañías de países emergentes como Rusia o China.

La baja competitividad hacía que los precios y tiempos de entrega fuesen marcados por el fabricante y no el mercado. Sin embargo esto ya está dejando de ocurrir. Es esta necesidad de competición en precio, o lo que es lo mismo en coste, y en Lead Time la que ha llevado a las empresas aeronáuticas a la adopción acelerada de soluciones PLM.

3.2 Los avances en Airbus

Hasta principios de los años noventa, Airbus había mantenido la estructura tradicional secuencial para el desarrollo de sus productos. Sin embargo, con la llegada de los nuevos grandes programas de final de siglo (A340-500/600, A380 y A400M) se decidió pasar a una aproximación de ingeniería concurrente [9].

Esto fue así porque estos programas diferían bastante de los anteriores:

- El número de componentes era mucho mayor.

- Gran parte del desarrollo era subcontratado a empresas que ofrecían sus servicios de ingeniería. Esto obligaba a establecer unas reglas de intercambio de datos de una manera eficiente e infraestructuras que permitiesen el trabajo en paralelo.
- Presión por parte del mercado para reducir el tiempo de desarrollo de los nuevos programas.

Ante este cambio de paradigma a finales de los noventa la industria aeroespacial europea lanzó un enorme proyecto de I+D de mejora de la eficiencia de los procesos de creación de producto. Se denominó bajo las siglas ENHANCE (Enhanced Aeronautical Concurrent Engineering) y en él participaban organismos de investigación, proveedores y grandes fabricantes. Es por esto que las mejoras que se obtuvieron iban más enfocadas a los procesos que incluían relaciones entre socios y proveedores que al propio desarrollo interno.

Al mismo tiempo Airbus estableció una iniciativa interna de Ingeniería Concurrente llamada Airbus Concurrent Engineering (ACE). Trató con ella de abordar los siguientes objetivos:

- Reducción del tiempo de desarrollo de producto.
- Clarificación de las relaciones entre los diferentes roles y habilidades durante el desarrollo.
- Desarrollo de la cadena de suministros afectada por los programas de Airbus.

3.2.1 La maqueta digital DMU como vector de la Ingeniería Concurrente

Con la iniciativa ACE, Airbus cambió la forma de contener y generar la información de producto. Si anteriormente a pesar de que las piezas se generaban en 3D el medio de comunicación era el plano en 2D, a partir de ahora toda la generación de información sería incluida y distribuida virtualmente sobre una maqueta digital (Digital Mock-Up o DMU). Este cambio fue posible debido a que la madurez de los sistemas CAx era ya el suficiente como para representar maquetas 3D de productos con muchos componentes.

La implantación de la DMU fue progresiva, comenzando con pequeñas secciones en el A340-500/600 y madurando con el A380 y el A400M, con el objeto de tenerla afianzada para el desarrollo del A350 [10].

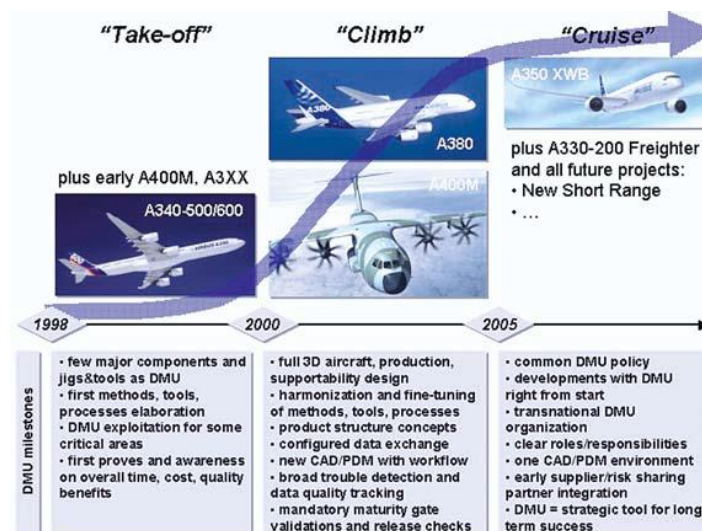


Figura 9. Fases de desarrollo de la DMU en Airbus [10].

La DMU es el objeto explotable que permite la validación y certificación del diseño funcional. Esto es debido a que no solamente es una representación geométrica de los elementos que componen el avión si no que además puede ser objeto de análisis cinemático, de colisiones, aerodinámico, estructural, térmico, acústico, etc.

La DMU en Airbus se asienta sobre una herramienta de altas prestaciones CAx, que permite el diseño funcional de cada componente, más un PDM que contiene todo el conjunto de metadatos asociado (matriz de posicionamiento de los componentes, estructura de producto, status de diseño, fechas, etc.).

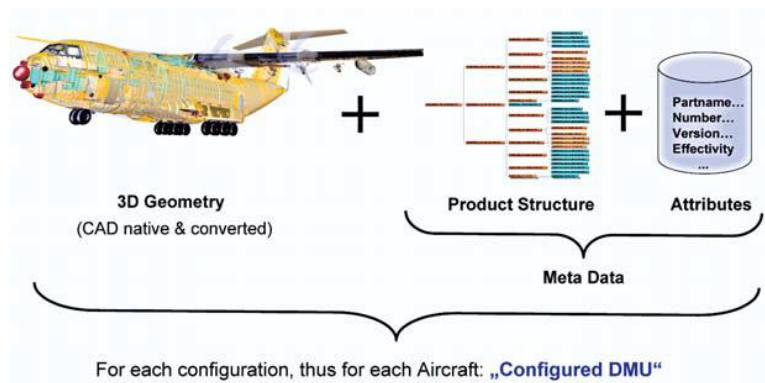


Figura 10. Definición de la DMU configurada [10].

La Ingeniería Concurrente se pone de manifiesto en la DMU a través del concepto *plateau*. Esto es una organización de equipos de diseño multidisciplinares, con integrantes de áreas como diseño, fabricación, servicios o compras. Se establecen así unas condiciones para una comunicación rápida y eficiente. Cada disciplina es partícipe del proceso de validación y toma de decisiones. Además, se incluyen en los equipos subcontratistas que comparten riesgos del programa para así optimizar sus propias cargas de trabajo.

La DMU es revisada y mantenida periódicamente. Han surgido roles como el integrador DMU cuya función es dedicación exclusiva a mantener actualizada la DMU, asegurando su coherencia y calidad en el tiempo.

El PDM implantado además tiene el poder comunicarse con el ERP de la empresa. Ello permite que la información generada durante el proceso de definición y diseño del producto fluya aguas abajo hacia las áreas de producción y da visibilidad de la información a la cadena de suministros.



Figura 11. Distribución de la Extended Enterprise de Airbus a fecha de 2005 [10].

Las pruebas con el A340-500/600 claramente demostraron el acierto de la DMU para cumplir con los objetivos propuestos en ACE. La reducción del tiempo de ciclo en casi un 25% respecto al programa A340-300 una década anterior fue un claro indicador del éxito de la iniciativa. Abrió la puerta a la inclusión de toda la cadena de suministro en la Ingeniería Concurrente e hizo imprescindible el uso de la DMU para la actividad de la empresa.

3.2.2 La maqueta digital industrial iDMU como habilitante de la Ingeniería Colaborativa

Las iniciativas de Ingeniería Concurrente anteriormente descritas redujeron el efecto “over the wall” pero no lo eliminaron [11]. Estos avances se centraron en diseñar funcionalmente en paralelo el producto, teniendo en cuenta aspectos y restricciones del resto del ciclo de vida pero no diseñando ni su industrialización, su mantenimiento u otras etapas del ciclo de vida.

Esto pone de manifiesto que la influencia de la DMU por sí sola decrece considerablemente aguas abajo una vez terminada la fase de diseño y por tanto deja de ser el driver de la empresa en áreas como Producción o Servicios.

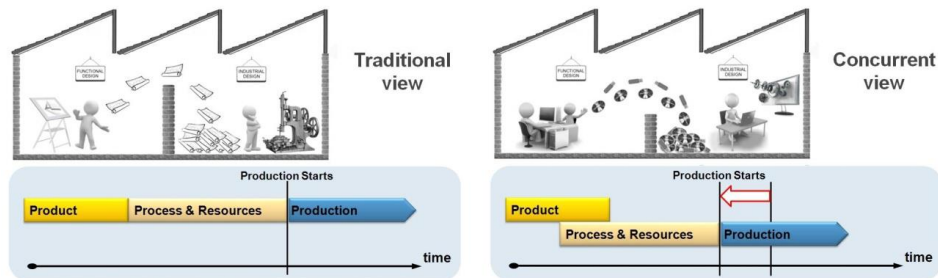


Figura 12. Aproximación tradicional frente a la aproximación concurrente [11].

La DMU no incluye modelos ni procesos de industrialización, ni de utillaje, ni de mantenimiento luego a menudo son soportados por diferentes sistemas para generar documentación de taller y servicios [12]. Por un lado en muchos casos explotan información de la DMU indirectamente y a menudo utilizando información obsoleta. Por otro, múltiples entregables son generados durante el ciclo de vida del producto, ocurriendo problemas de interoperabilidad y un flujo de información predominantemente unidireccional.

Una razón de no haber tratado este problema antes es por el proceso de certificación. Tradicionalmente las autoridades han certificado el final del diseño de un avión solamente con su diseño funcional.

Para cubrir esta necesidad surge el concepto de industrial Digital Mock-up (iDMU). La iDMU recolecta toda la información de diseño funcional más toda la información de diseño industrial: procesos de fabricación y ensamblaje, recursos, entorno industrial, etc. Todo ello definido en un entorno integrado, de manera que en todo momento se esté generando un único entregable con el que poder establecer simulaciones realistas que aseguren y validen una fabricación virtual. El entorno integrado y el trabajo sobre un único entregable son las condiciones de contorno necesarias para la práctica de la Ingeniería Colaborativa.

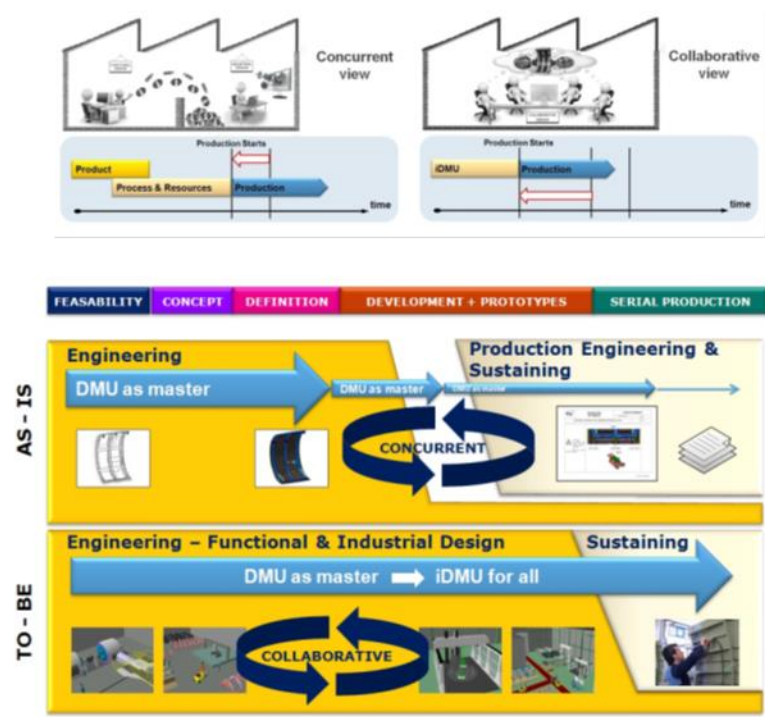


Figura 13. As Is (DMU)-To Be (iDMU) [11].

En los últimos años se han lanzado varios proyectos en Airbus para establecer una progresiva transición de la aproximación concurrente a una colaborativa. Un antecedente fue el proyecto de la virtualización de la Final Assembly Line (FAL) del A400M y la consolidación se produjo con el proyecto de la de la línea de fan cowls del A320neo.

El proyecto de la FAL del A400M

El programa del A400M supuso novedades en todas las metodologías de trabajo conocidas al momento. Esto afectaba también al diseño industrial de la Final Assembly Line (FAL), en el que se optó por primera vez en la compañía por una solución de Virtual Manufacturing para su validación. Se usó Catia v5 para el diseño de avión y de utillaje y Delmia v5, incluyendo paquetes personalizados, para establecer los procesos y sus precedencias y la posterior simulación de los mismos. Asimismo se utilizó un simulador de eventos finitos para optimizar el flujo y la secuencia en la línea.



Figura 14. Comparación entre la FAL virtual y real del A400M [12].

Las mejoras fueron sustanciales. Se desarrollaron métodos colaborativos entre los equipos que gestionaban las maquetas y su simulación con los equipos de diseño. Además se diseñaron y validaron tanto procesos de fabricación como el diseño del utillaje y los recursos de industrialización, descubriéndose con un bajo coste discrepancias entre el diseño funcional e industrial del avión.

Este proyecto no puede ser considerado una iDMU puesto que el grado de integración en las herramientas no era excesivamente alto. Después del proyecto el diseño funcional siguió permaneciendo independiente de la fabricación virtual, debiéndose construir una maqueta digital específica para cada caso a partir de una importación filtrada de los elementos que interesaban de la DMU. El grado de automatización de la creación de la fábrica virtual era prácticamente nulo.

Sin embargo, fue pionero pues permitió introducir a la comunidad ingenieril de la empresa en la práctica de la Ingeniería Colaborativa y demostró que eran posibles muchos de los beneficios atribuidos al diseño conjunto del avión funcionalmente y de todos los recursos y procesos asociados a su industrialización.

El proyecto del fan cowl del A320neo

El proyecto constituyó la primera implementación real del concepto iDMU. Era un proyecto ambicioso, que englobó el diseño de toda la industrialización del producto, en este caso una aeroestructura de tamaño medio, incluyendo los recursos y procesos asociados. Además se incluyó la generación de las instrucciones de taller y su implementación usando técnicas de Realidad Aumentada.

La implementación de la iDMU se hizo en Catia y Delmia v5. Además en esta ocasión la personalización de Delmia fue bastante más avanzada que en el proyecto del A400M y la capacidad de automatización mucho más elevada. Era capaz de proveer automáticamente para cada proceso la maqueta digital de producto, además de los recursos, lo que permitía definir y validar la línea mediante las simulaciones. Estas simulaciones además podían incluir factores como las curvas de aprendizaje.

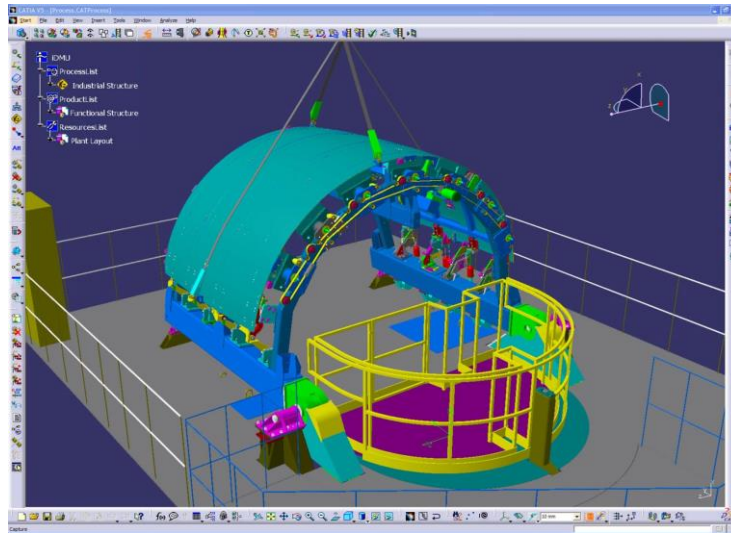


Figura 15. Ejemplo de iDMU del fan cowl del A320neo [12].

Aspectos como el control de las asignaciones entre producto/recurso y las operaciones o la gestión de las efectividades fueron satisfactoriamente comprobados.

Una vez validada la línea se hicieron varias pruebas de concepto donde se extraían instrucciones de trabajo con automatización bastante básica y puestas en producción mediante métodos novedosos de Realidad Aumentada.

Aún con la exitosa consecución del proyecto, la iDMU no fue implantada en la empresa debido a la decisión de no migrar la anterior arquitectura de PDM de acuerdo al nuevo modelo. Sin embargo, esto no ensombrece las conclusiones sobre el beneficio patente del uso de la iDMU como plataforma para la Ingeniería Colaborativa.

4 EL CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO AVIÓN

En este capítulo se plantea una discusión sobre las diferentes metodologías que tratan de resolver el problema ingenieril que supone la creación del producto avión a lo largo de las diferentes etapas de su ciclo de vida. Se pretende así hacer una revisión de ellas, destacando aspectos positivos y posibles líneas de mejora.

Tiene como objetivo además enmarcar el conjunto de variables a tener en cuenta a la hora de diseñar y acotar el caso de estudio, con el que se pretende demostrar el grado de validez de los métodos propuestos.

4.1 La estructura de producto y el ciclo de vida del avión

Un avión está compuesto de miles de componentes. Según el estado del ciclo de vida en el que se encuentre habrá disponible una cantidad y variedad diferente de información, generada conforme el producto avanza en su vida. Esta información debe ser clasificada para facilitar su gestión.

Además dicha información no es usada en su conjunto sino que es filtrada por los usuarios. Por ejemplo, la función Compras puede solicitar un conjunto de datos sobre el producto diferente del que le interese consultar al área de Producción, a pesar de ser información sobre el mismo producto. Sin embargo, en vez de tener diferentes estructuras de producto se ha considerado que el avión está compuesto por una única estructura genérica que según la función se reordenan los elementos que constituyen el avión de la manera que más interese a la función, pero sigue siendo la misma información. Esta reordenación se denomina *Layer* [13].

Estas capas pueden ser filtradas dinámica o estáticamente. El filtrado dinámico de la información puede compararse con las diferentes perspectivas desde la que un observador puede mirar un objeto siendo este algo animado, no estático. Airbus llama a esto *View*.

También puede ser deseable un filtrado estático, equivalente en el símil anterior a tomar una fotografía del objeto desde la perspectiva deseada (por fecha, por el número de avión, etc.). A esto se le denomina *Extracted View*. Estas vistas congeladas a menudo se usan para generar *Deliverables* que sirven para pasar hitos en el desarrollo del proyecto (contratos, el Bill of Materials, listas de atestación etc.)

Se describe a continuación brevemente a qué tipo de capa y por tanto qué tipo de información se accede desde cada vista. Cabe destacar que cada vista y en consecuencia cada capa se ha hecho coincidente con una etapa del ciclo de vida del producto:

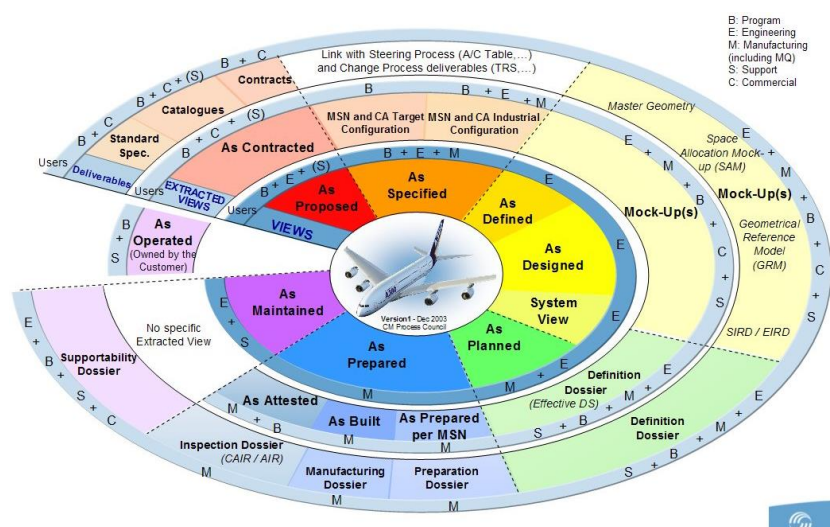


Figura 16. Ciclo de vida de un avión Airbus [13].

- **As Proposed.** Vista de catálogo. Se establecen las especificaciones standard del avión más un catálogo con características opcionales que se le proponen al cliente. Su congelación suele ser usada para crear los contratos entre Airbus y el cliente.
- **As Specified.** Desglose de los componentes a grandes rasgos. Se usa para gestionar la conformidad entre lo contractual y el avión real, es decir, que el avión que se está generando se corresponde con el contratado.
- **As Defined.** Boceto preliminar de Ingeniería para definir primeros espacios y superficies de avión. Se pueden obtener unas primeras maquetas virtuales de avión.
- **As Designed.** Vista funcional de un avión que está completamente definido y diseñado para volar. Está compuesto de un desglose por funciones y contiene todos los componentes que unidos forman el avión. La DMU es el principal entregable y permite certificar el avión para comenzar su fabricación.
- **As Planned.** Vista del desglose industrial del avión. Sigue siendo una vista de producto, tan solo es una reorganización industrial del mismo, definiendo los subconjuntos y por tanto qué carga de trabajo obtiene cada socio según lo contratado.
- **As Prepared.** Es la vista que se usa en Producción. Es una estructura compuesta por el producto más los procesos de fabricación y los recursos asociados. Es en esta capa donde se tiene la vista *As Built*, fundamental en el ciclo de vida del avión puesto que muestra el avión terminado y permite observar las diferencias entre la aeronave real de la prevista.
- **As Maintained.** Vista estructurada del avión donde se muestran las soluciones de mantenimiento correspondientes a cada solución de diseño.

Este proyecto no pretende abarcar todo el ciclo de vida del avión. Está enmarcado en el *As Designed/As Planned/As Prepared*. Esto es así porque tradicionalmente es en esta parte del ciclo de vida donde han surgido los sistemas *CAX* y que posteriormente se extendieron al PLM. A pesar de que actualmente las plataformas de última generación incluyen gestores que permiten trabajar en la toma de requisitos y estudiar conformidades y desviaciones, no es la línea de trabajo del proyecto.

Por tanto se trabajará de aquí en adelante solamente con las vistas anteriormente mencionadas y con su metodología asociada.

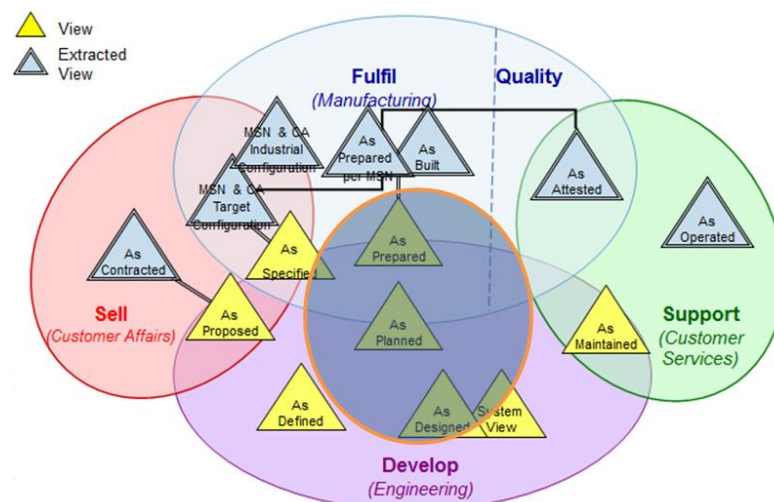


Figura 17. Áreas del ciclo de vida y de la empresa afectadas por el proyecto [13].

Previo al análisis de cada etapa del ciclo de vida, es necesario aclarar que el paso de una a otra no es secuencial. Un equipo puede estar trabajando en el *As Designed* a la vez que otro en el *As Planned* o el *As Prepared*. Si se quiere que sea posible la práctica de la ingeniería colaborativa resulta imprescindible que las metodologías permitan el trabajo simultáneo en una vista u otra.

Por ejemplo, mientras que tanto el As Designed o el As Planned son vistas con información solo de producto, en el As Prepared también deben aparecer datos de los recursos y procesos de fabricación. Esto no quiere decir que el producto sea el driver del proceso y el recurso solo porque aparecen más tarde en el ciclo de vida. Los métodos deben garantizar que los diseños del proceso y del recurso se hagan simultáneamente con el producto.

Esto supone un salto metodológico respecto a la situación actual, donde siguen estando todavía descompensados el avance del recurso y de los procesos respecto al producto.

4.2 As Designed.

La estructura As Designed solo contiene producto. Además, es una estructura cuya madurez es elevada, ya que normalmente se le ha dado una relevancia a su diseño superior a la del resto de estructuras. Tanto es así que se basa en gran medida en estándares internacionales y desde el punto de vista metodológico apenas se le puede encontrar debilidades. Desglosa perfectamente el producto avión según los grandes grupos que lo componen, dividiéndose cada según la función del componente, resolviendo el problema de tener un avión cuyo diseño cumple con los requerimientos de cliente.

Tanta es la confianza que se tiene en el diseño funcional que el avión se certifica con esta estructura.

La estructura que compone el As Designed está compuesta de tres niveles. Un alto nivel que permanece invariable ante la configuración que posea el avión. Este está basado en un estándar internacional el cual se adapta según el modelo de avión a diseñar. Se define previo al comienzo del diseño de los componentes pues es la estructura base en la que se adjunta la información de diseño. De esta manera se evita diseñar ningún componente cuya función no esté definida con anterioridad.

El siguiente nivel es el nivel configurable. En este nivel es en el que la empresa gestiona los cambios. La empresa juega con él para contener en una misma estructura las múltiples configuraciones y variantes que puede tener un avión así como para mantener una trazabilidad de los cambios de diseño.

El último nivel contiene conjuntos, normales y elementales no configurables. Sería imposible gestionar los cambios a este nivel debido al gran número de componentes que contiene un avión y la alta variabilidad de las configuraciones.

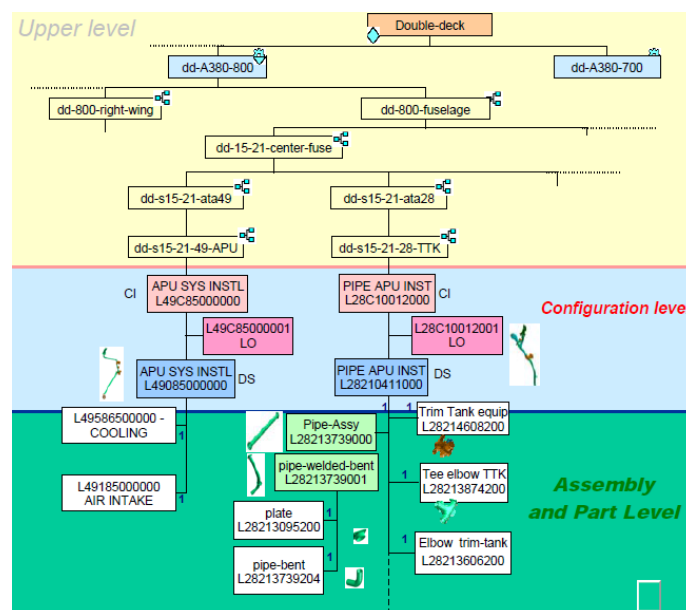


Figura 18. Ejemplo de estructura As Designed [15].

4.2.1 Metodología de creación del As Designed.

Para la generación del As Designed, se siguen los pasos propuestos por la metodología Airbus.

Las entidades más características del As Designed son el CI, el LO y la DS, que son las unidades mínimas de control de la configuración y de la información de diseño. Una explicación gráfica de los conceptos se puede ver en la figura 19.

- Configuration Item (CI). Es un nodo de gestión dentro de la estructura. Es un requerimiento abstracto y por tanto un objeto invariante dentro de la misma.
- Link Object (LO). Representa la relación unívoca entre cada par de CI y DS. Permite almacenar la efectividad (para qué rango de aviones se aplica) cada DS.
- Design Solution (DS). Define la solución dada al requerimiento por el CI. Contiene todos elementos que componen la solución.

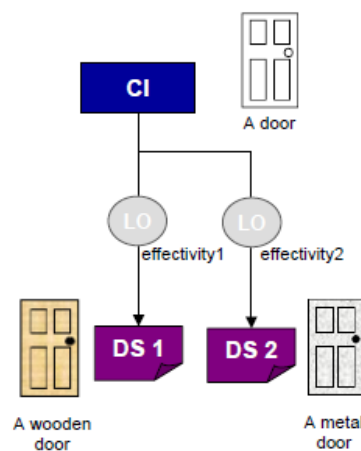


Figura 19. Ejemplo de nivel configurable [13].

Para crear una estructura As Designed lo primero es establecer un nivel no configurable superior, definido en etapas muy tempranas del ciclo de vida. El nivel no configurable superior está jerarquizado de la siguiente manera [14]:

- Programa: Si es un programa de aviones de largo recorrido como por ejemplo el A380 o de medio como el A350.
- Serie. Por ejemplo si se trata de la serie A340-500/600 o una serie A340-300.
- Major Component. Identifica los grandes conjuntos del avión. La adaptación de la norma para el caso de estudio es:
 - Mc01. Fuselage.
 - Mc20. Wings.
 - Mc30. Empennage.
 - Mc40. Power Plant.
 - Mc50. Undercarriage.
- Sección. Subdivisión dentro de un Major Component.
 - Mc01.
 - Sección 11-12. Nose fuselage.

- Sección 13. Forward fuselage.
- Sección 15. Centre fuselage.
- Sección 15.1. Sponson.
- Sección 15.2. Wing to fuselage fairing.
- Sección 17. Rear fuselage A.
- Sección 18. Rear fuselage B+C.
- Sección 19.1. Tail Cone.
- Mc20.
 - Sección 21. Centre wing box.
 - Sección 22. Outer wing box.
 - Sección 23. Leading edge.
 - Sección 25. Fixed trailing edge.
 - Sección 26. Spoilers.
 - Sección 27. Flaps.
 - Sección 28. Ailerons.
 - Sección 29. Wing tips.
- Mc30.
 - Sección 31. VTP General.
 - Sección 32. VTP Main box.
 - Sección 33. VTP Leading and trailing edge.
 - Sección 34. Rudder.
 - Sección 35. HTP General.
 - Sección 36. HTP Centre box.
 - Sección 37. HTP Leading edge.
 - Sección 38. Elevator.
 - Sección 39. Horizontal Stabilizer tips.
- Mc40.
 - Sección 41-43. Engine mounting.
 - Sección 42-44. Nacelle.
 - Sección 45-46. Engine.
- Mc50.
 - Sección 51. Nose landing gear.
 - Sección 52. Main landing gear.

Hasta ahora solo se ha clasificado atendiendo a las líneas de producto y a la división por zonas del avión. Los niveles ATA Section y ATA Zone son los encargados de clasificar por funcionalidad. Los capítulos ATA son un estándar internacional en el que cada capítulo recoge una funcionalidad incluida en el avión [16]. Están identificados por un código del 1 al 100. Por ejemplo el ATA 21 recoge todo lo perteneciente al sistema de aire acondicionado, el ATA 35 al sistema de oxígeno, el ATA 28 todo lo relacionado con el sistema de combustible, el ATA 52 al sistema de puertas, etc.

El siguiente nivel a crear es el nivel configurable gestionado por los CI/LO/DS. Este nivel nace como solución

propuesta por la empresa para configurar el producto. La empresa propuso como premisa trabajar con una única estructura bajo la cual están todos los tipos de avión fabricados y proyectados, además de las modificaciones sufridas. Es decir, en esta estructura genérica se almacenan todos los componentes de aviones contruidos en el pasado, en curso y proyectados o en otras palabras, el ciclo de vida de todos los aviones. A esta estructura genérica se le aplica un filtro (por número de avión, por fecha de efectividad, etc.) y el resultado es la estructura para el avión deseado.

Existen dos tipos de CI y en consecuencia de DS, CI que contienen elementos funcionales y CI que contienen los elementos de unión entre los funcionales. Esto quiere decir que en el As Designed no se diseña *qué* componentes conforman el avión sino que además en él está diseñado el *cómo* se montan.

Toda la definición del montaje cae bajo el nodo de una DS de montaje. En ella se incluyen datos como los elementos de unión que lo componen (remaches, tornillos, soldaduras), la lista de piezas que se unen a través de la unión, información sobre sellantes y aprietes torcométricos, etc. Estos CI de montaje deben de ser definidos colaborativamente con Ingeniería de Fabricación para asegurar que aguas abajo en el montaje no surjan problemas. Es fácil diferenciar un CI de montaje de un CI de diseño de partes. Cuando se mete el código identificativo en el PDM suelen tener incluido en el título palabras como *assembly* o *installation*.

Para terminar con la generación de un As Designed, debajo de la Design Solution vendría la capa de componentes no configurables (subconjuntos, elementales, normales).

4.2.2 Análisis de la metodología de creación del As Designed y propuesta de mejoras.

En el As Designed la metodología está muy madura y normalizada. El Upper Level está bien definido y asegura que los componentes cumplen con la función prevista.

En cuanto a la presencia o no del nivel configurable, es una consecuencia que deriva del hecho de querer gestionar con una única estructura todos los aviones. Existen teorías basadas en la gestión por espécimen por ejemplo que obligarían a revisar toda la metodología de configuración del producto. No es el objeto del proyecto valorar el impacto de una gestión por espécimen por lo que no se ha analizado esta situación.

La relación de los CI de montaje con los CI de componentes funcionales y con el Upper Level es el área donde la metodología As Designed tiene que trabajarse y depurarse más. Un problema común a la hora de integrar el CI de montaje en la estructura de producto es establecer un padre para él. A priori puesto que su función es la de unir otros componentes el padre en la estructura funcional As Designed podría ser uno cualquiera de los padres de los componentes que se unen. Se ha establecido por convención en la empresa que el CI de montaje cae debajo del padre cuyo centro de gravedad esté más próximo al centro de gravedad del avión. Podría haberse establecido cualquier otra metodología como por ejemplo que el CI de montaje tuviera siempre como padre el conjunto con mayor volumen.

4.3 As Planned.

La vista As Planned se define como la estructura de producto que refleja el reparto industrial del avión. No es una estructura de procesos, sino de producto. Tiene como principal objetivo redistribuir toda la información de diseño generada en el As Designed de acuerdo con el reparto de responsabilidades definido en el As Specified, permitiendo que cada socio conozca con exactitud los componentes que tiene que montar, pero sin diseñar todavía el proceso de montaje asociado.

En el As Planned por tanto no hay niveles planos como ocurría en el As Designed, sino que es una cascada de montajes donde está mezclada la información de diseño con información de responsabilidades de industrialización. Además el otro valor añadido del As Planned es que reutiliza exactamente la misma información para definir lo que cada socio va a industrializar que lo que la oficina de diseño ha pensado que debería de ser montado. Esto es lo que se conoce como monoconfiguración.

Antes de la práctica de la ingeniería concurrente, la oficina de Diseño creaba una estructura funcional similar

al As Designed pero sin el consentimiento de Ingeniería de Fabricación, que cuando le tocaba industrializar el producto la modificaba a su antojo añadiendo y quitando elementos, creando una estructura de fabricación. Estas dos estructuras no estaban reconciliadas y si ocurría algún cambio de diseño en muchos casos resultaba imposible trazar el cambio hasta la fabricación.

Los programas anteriores a la concurrencia pero aún en vigor siguen utilizando este tipo de estructuras, llamadas multiconfiguradas.

El As Planned además es importante en la creación del As Prepared. Toda la información generada por el As Planned es ampliada por áreas como Ingeniería de Fabricación, Producción y Planificación permitiendo ya la vista de la fabricación ya no a nivel de reparto entre compañías sino de estaciones de trabajo, lo que es el As Prepared.

Por último el As Planned tiene también relevancia en el proceso de atestación para la entrega del avión al cliente. Cuando un fabricante de un CA se entrega a su integrador en el CA inmediatamente superior, viene además adjunto un documento que refleja que todos los CI que lo componen han sido montados. Gracias a esta trazabilidad de las responsabilidades finalmente se tiene constancia de que el avión ha montado todos los componentes que eran necesarios para completarse.

4.3.1 Metodología de creación del As Planned

Previamente a crear el As Planned se ha tenido que definir un As Specified con el reparto de responsabilidades. En el As Specified no existe información de diseño adjunta luego solo se tiene una cascada de responsabilidades donde se aclara qué socio va a industrializar cada parte del avión. Esta estructura está compuesta por unos nodos llamados CA-CI, CA-LO y CA-DS y CC-CI, CC-LO Y CC-DS según se puede ver en la figura 20.

Primero se hace necesario definir los conceptos CA y CC.

- **Constituent Assembly (CA).** De acuerdo con la ISO 10007, es un elemento de configuración que refleja físicamente el desglose de ensamblajes que componen el avión completo y probado, que al mismo tiempo es el CA más general [16]. Un CA es un ensamblaje físicamente distinguible y relevante, resultante del reparto industrial y que forma la entidad básica de configuración en el As planned. Indica la distribución de los procesos de ensamblaje, instalaciones y propietarios que contribuyen al producto final. Cada responsable de un CA debe establecer y monitorizar sus procesos de ensamblaje. Además todos los CI que no se incluyen dentro del CA pero que el centro de producción los considera dentro de un mismo entregable, están bajo responsabilidad del integrador que los incluye para formar el CA superior.
- **Configuration Component (CC).** No contiene modelos de ensamblajes físicos, solo es un nodo que permite reunir la información de definición (estructuras, sistemas, eléctricos) que acompaña a un CA. Esta información es proporcionada por el socio que crea el CA para que otro que lo integra en el nivel superior sepa cómo ensamblarlo, como por ejemplo dibujos de las interfaces de unión.

En el As Specified estos CA y CC no llevan todavía la anterior información de diseño adjunta, en el As Specified lo que se busca es valorar diferentes repartos industriales, por ello al igual que pasaba con el As Designed se recurre a unos nodos CA-CI/LO/DS y CC-CI/LO/DS, con los que se traza diversas configuraciones de reparto.

Para crear el As Planned lo primero que ocurre es que se congela el reparto de responsabilidades, colapsando las diferentes configuraciones de CA y CC en un único nodo CA y CC para cada caso. Ahora estos CA y CC son invariables en el tiempo y son análogos al Upper Level del As Designed.

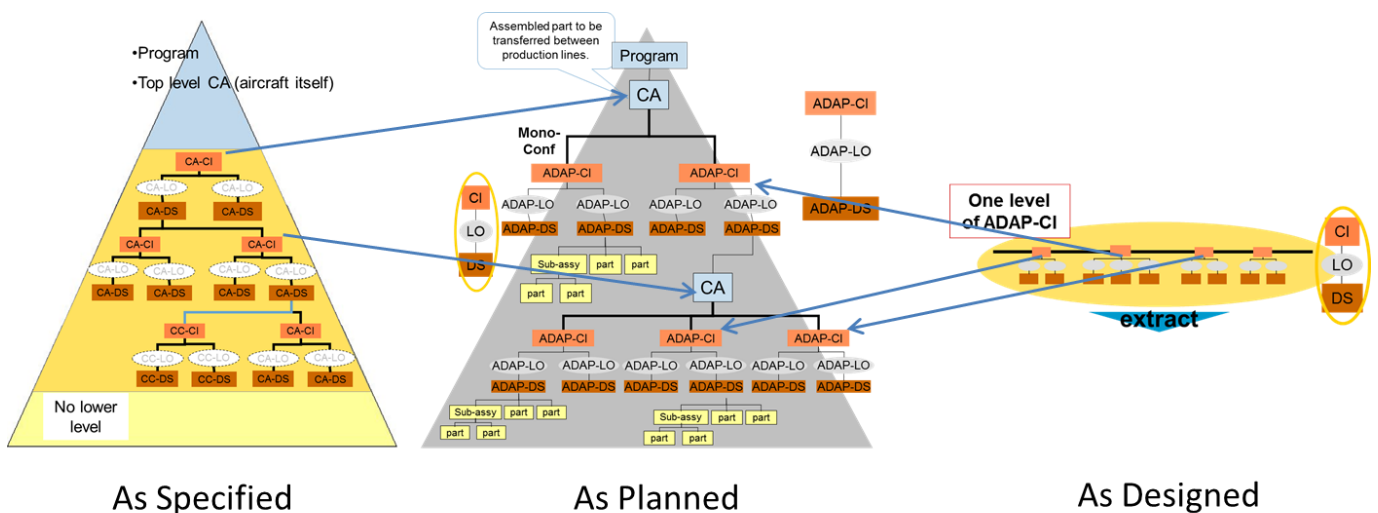


Figura 20. Creación del As Planned a partir del As Specified y el As Designed [13].

Posteriormente a estos CA y CC se le cuelgan los CI/LO/DS procedentes del As Designed, tal y como ilustra la figura 20. Este reparto de CI se busca que sea equilibrado en función del paquete de trabajo previsto. Aquí es donde claramente queda patente que el reparto de CI para industrializar no siguen en absoluto la distribución funcional de CI que presentaba el As Designed.

Por ejemplo, para el Airbus A400M el equipado de los pilones se realiza en la planta de Tablada en Sevilla, y aunque en la estructura funcional en teoría el pilón lo compondrían todos los CI de la sección 41 y la 43, el CA pilón equipado que es el que marca la responsabilidad incluye CI de otras secciones como la 42 o la 44. Asimismo hay CI de las secciones 41 y 43 que están en otros CA. Estas reorganizaciones se producen como consenso de los intereses de los diferentes socios involucrados.

Para asegurar una buena distribución de los CI en esta estructura, la metodología aconseja seguir unas Golden Rules. Las Golden Rules son las siguientes:

1. LA ESTRUCTURA VA PRIMERO. Ya ha sido comentada anteriormente, expresa la obligatoriedad de definir una estructura de producto previamente al diseño de los componentes.
2. 1 DS=1 RUTA= 1 ORDEN DE TRABAJO=1TURNO=8HORAS. Cada DS se corresponde con una solución de fabricación y a su vez viene ejecutada por una orden de trabajo de duración un turno de 8 horas.
3. CA COMO ENTIDAD PRIMARIA PARA MONITORIZAR ESTADOS INTERMEDIOS DE LA CONFIGURACIÓN. Ya expuesto en el capítulo.
4. EFECTIVIDAD BASADA EN APILAMIENTOS DE MODIFICACIONES.
5. ESTRUCTURA PLANA DE CI PARA SISTEMAS Y RECOMENDABLE PARA AEROESTRUCTURAS. Entre dos CA solo puede haber una capa plana de CI/LO/DS, eso quiere decir que no puede haber cascadas de CI/LO/DS.

4.3.2 Análisis de la metodología de creación del As Planned y propuesta de mejoras

El uso de las estructuras monoconfiguradas tiene sin duda la virtud de que en teoría asegura que el producto salido de diseño es un producto industrializable y que además el socio que lo industrializa es plenamente responsable de ello. La principal consecuencia es que se hace necesario tener mecanismos que reconcilien los CI del As Designed con los del As Planned.

Esta reconciliación se lleva a cabo actualmente en un PDM a parte del que gestiona el As Designed, en un

entorno web Windchill. Sin embargo este PDM no es utilizado por los maquetistas para crear maquetas As Planned por lo poco amigable del entorno para volcar la información en Catia v5, al contrario que ocurre con las maquetas As Designed. Además no permite una visualización ligera de los conjuntos y navegar por el árbol resulta en ocasiones bastante tedioso.

Sin embargo ocurre que a menudo se piden para las estaciones de trabajo maquetas de la estructura As Planned, en las que se pueden identificar las interfaces de montaje entre los diferentes CA. La práctica habitual para solventar esta necesidad es crear *Boxings* con parte de la estructura de la DMU funcional con los CI que componen los CA que se ensamblan, todo montado manualmente por el maquetista.

La otra debilidad fundamental es la poca robustez de la metodología que describe el As Planned. En ella solamente se cubre un pequeño porcentaje de la enorme combinatoria de fenómenos que se producen al intentar reconciliar una estructura funcional con una industrial. La metodología solamente se limita a establecer las cinco Golden Rules anteriormente descritas, que en teoría siguiéndolas se podría crear cualquier estructura As Planned.

La falta de una metodología completa obliga a establecer muchos workarounds para implementar el As Planned. Por ejemplo en ocasiones y bajo ciertas condiciones se permite no cumplir con la Golden Rule número 5 y crear cascadas de CI entre dos CA.

Con esta práctica sin embargo se está metiendo una cierta secuencialidad en el montaje la cual no es el objetivo del As Planned. A pesar de que en el caso de Airbus algunos partners industrializan así, es más beneficioso crear una capa plana de CI que no condicione el orden de montaje de los componentes de un CA, que otros socios de Airbus sí emplean. Así las precedencias vendrán aguas abajo al definir los procesos de montaje.

Esto no es que ponga en peligro la fabricación de los aviones puesto que la información no desaparece, solo que el objetivo del As Planned, que es tener una clara idea de exactamente qué cosa se debe fabricar en cada centro de trabajo se diluye. Esto ha provocado un desuso del As Planned, que de otra forma ayudaría a reducir mucho los costes de producción (costes por retrabajos, obsolescencia, mala secuencia de operaciones, etc.) pues facilitaría enormemente la labor de Producción.

La posible mejora propuesta debería ser una política común entre todos los socios a la hora de implementar el As Planned.

Por otro lado aparte de incumplimientos reiterados de las Golden Rules, directamente hay aspectos del As Planned que la metodología ni siquiera contempla o analiza. La principal de ellas y que se analiza en el proyecto es el choque entre la naturaleza de un nodo CA y el conjunto CI/LO/DS.

Si se tiene un nodo CA superior y una capa de CI/LO/DS inferior, lo que se está expresando es que todas las DS del nivel inferior se unen mediante una serie de planos de unión para formar un CA, sin embargo ese nodo CA no lleva asociado proceso de unión o montaje por sí mismo solo es un nodo que informa del conjunto montado y su responsabilidad por parte del fabricante del mismo hasta que este está montado en el conjunto superior. Los procesos de montaje se asocian por separado a cada DS, que es la que posee la información de cada unión.

Por otro lado, la metodología no explica cuál es la naturaleza del nexo de unión entre un CA inferior y la DS que lo llama a nivel superior. No se sabe si lo llama como si fuera un componente más de la DS cayendo al mismo nivel que las normales que están debajo de la DS o por encima o por debajo.

La principal razón es que no existe un modelo de datos que lo explique. Esto ha provocado que la conocida como cascada de CA solo se use hoy en día para el proceso de atestación y de gestión de las responsabilidades, que es en definitiva para lo que se hizo, y no como una estructura válida para la industrialización.

Se enumeran a continuación posibles cambios metodológicos que mejoren el As Planned.

Quizá sería conveniente eliminar el nodo CA como objeto de la estructura As Planned, establecer una cascada de CI/LO/DS y establecer la responsabilidad a este nivel, pero entonces debido al gran número de CI que integran un avión la responsabilidad se diluiría.

Otra posibilidad sería gestionar la responsabilidad del avión a nivel de espécimen completo, haciendo responsable a todos los stakeholders simultáneamente de cada avión tratado de manera independiente.

Otra posible solución sería mantener una estructura de fabricación ligada a otra de responsabilidad pero sin mezclarse ambas. Sea como fuere, es una realidad que el CA choca de frente con los CI/LO/DS y supone un problema de concepto para el montaje.

No está dentro de los límites del proyecto el cambiar el modelo de As Planned, pero sí lo está el reflejar la problemática existente y como eso afecta aguas abajo en el ciclo de vida y además como afecta a su implementación en el v6.

4.4 As Prepared.

En este punto del ciclo de vida se prepara la industrialización del producto, que se define como el proceso ingenieril mediante el cual a partir de un diseño que cumple una serie de requerimientos funcionales se consigue una fabricación a escala industrial del mismo, de la mejor manera en términos de calidad, tiempo y coste. Es Ingeniería de Fabricación la responsable del proceso.

Del As Planned se extraen los inputs necesarios al proceso. Por un lado se tiene una definición clara del reparto de trabajo, cada socio sabe exactamente lo que tiene que ensamblar. Y no solo esto sino que además, gracias al trabajo concurrente a la hora de definir los CI/LO/DS, se tiene constancia de que los requerimientos de fabricación se han tenido en cuenta en el diseño. Esto es el tipo de tecnología a usar, las tolerancias, accesibilidad, materiales, etc.

A parte, de la planificación estratégica se puede extraer el número de aviones a entregar en cada año. Con estos datos es factible comenzar a plantear una estrategia de diseño de línea de montaje (móvil, a pulso, única estación, etc.).

De las primeras decisiones que hay que tomar al industrializar es decidir el tipo de línea de montaje que se quiere, si de una sola posición, a pulsos o continua. Viene determinada por la cantidad de producto que se quiere fabricar.

En el caso de una fabricación puramente artesanal de bajo volumen de fabricación se suele trabajar en un único puesto de trabajo. En este caso el tiempo de ciclo de fabricación de producto coincide con el tiempo de entrega a cliente.

En el otro extremo se tiene la línea continua. En ella, cada operación es realizada por un recurso diferente, lo que permite un alto volumen de producto fabricado, puesto que aunque el tiempo de ciclo del producto es el mismo, el tiempo de entrega al cliente es determinado por la operación cuello de botella o más larga. Esto a costa de tener un producto semielaborado por cada operación, lo que genera un volumen de obra en curso muy grande. A pesar de tener mucho capital en curso, el tiempo de entrega del producto al cliente puede ser de órdenes varias veces inferior a la fabricación artesanal. Es conveniente esta aproximación para casos en los que la variabilidad del producto es mínima, puesto que los recursos están muy especializados en esa operación, y de un número de unidades muy altas. Los productos más complejos que se ha atrevido a hacer en línea continua son los del sector de la automoción, y aun así las velocidades de la línea son muy bajas.

En el medio de estos dos extremos están las líneas por estaciones. Constituyen agrupaciones de operaciones que se realizan en una misma estación. El producto no se mueve hasta que todas las operaciones asignadas a la estación están finalizadas. Las estaciones si no están equilibradas, es decir, el tiempo del producto en la estación no es el mismo en todas, generan buffers de producto en espera y por tanto mucha obra en curso.

Para un óptimo funcionamiento de estas líneas es necesario equilibrar todas las estaciones para que el tiempo total en la estación, que es la suma del tiempo de las operaciones asignadas a la misma sea más o menos lo mismo y no exista ningún cuello de botella, se puede decir que todos los productos se cambian de estación al mismo tiempo, esto es el Takt Time. El volumen de obra en curso disminuye notablemente puesto que existe un número de productos semielaborados equivalente al de estaciones. Si además se hace coincidir este tiempo con el tiempo de entrega a cliente se tiene una sincronización entre la demanda y la producción. Este sistema además es bastante flexible ante las demandas variables puesto que solo hay que redistribuir las operaciones entre las operaciones o modificar el número de estaciones para adecuarse a la misma.

En el As Prepared, al igual que ocurre en el resto de etapas del ciclo de vida, se comienza a trabajar desde fases muy tempranas del desarrollo de un nuevo producto. En la fase conceptual se tiene lo que se conoce como *Build Process* (BP). En él se establece una visión general del proceso de ensamblaje y todos sus actores, ya sea para el caso de una aerestructura o para el caso de una FAL. En él deben de estar presentes los siguientes aspectos:

- Visión general del proceso de ensamblaje, mostrando las diferentes fases y el flujo de producto.
- Definición de cada proceso de ensamblaje, fijando parámetros como el número de estaciones o el tiempo de ciclo de producto.
- Definición del layout de la planta, las instalaciones, el utillaje, los medios industriales y los recursos humanos necesarios para la producción. Con estos datos se obtiene un plan de inversiones y un plan de entrenamiento para los recursos humanos.
- Flujo y medios industriales desde el punto de vista logístico. Con ello se establece un plan de transporte logístico, tanto a nivel de planta como de cadena de suministro.

El BP es el documento con el que se intenta ganar una oferta de contrato de industrialización de un producto por parte de un cliente. Es por ello que se involucra a todas las áreas de la empresa. Este BP se va modificando conforme la gente de diseño funcional e industrial va completando los requerimientos, pero no es hasta la etapa As Prepared cuando se define con todo el nivel de detalle.

En este apartado por tanto se lleva a cabo la completa definición del proceso de montaje a nivel de planta. Es decir, de esta vista se tiene que extraer la información suficiente como para que el operario en taller siga una secuencia de pasos definida que asegure la consecución sin ningún tipo de problema del montaje de cualquier conjunto o subconjunto definido en el As Planned. Por tanto es necesaria una visión tanto de producto a montar como de las operaciones que conforman el proceso de montaje.

Además a diferencia de las anteriores vistas de producto aquí sí se tiene en cuenta el tiempo como variable. En el As Planned o el As Designed se habla de estructura de producto, es decir, no importa el orden cronológico. Por ello se pensó una estructura única que contuviese todos los productos de una manera puramente jerárquica, atemporal. Sin embargo el As Prepared tiene que tener en cuenta la fabricación de cada avión como un proceso completamente independiente del anterior, contextualizando las operaciones de montaje que necesita y los recursos empleados, que pueden ser completamente diversos del avión precedente o posterior.

En esta vista surge información que está relacionada con el producto, pero no son de producto. Son los procesos de fabricación y montaje y los recursos utilizados.

4.4.1 Metodología de creación de los procesos.

Actualmente la metodología Airbus en la etapa As Prepared es bastante escasa. El modelo propuesto por la normativa de la empresa define el As Prepared como una vista puramente de fabricación que se crea a partir de los planes de producción predefinidos en el As Planned, detallándolos con información de todos los niveles de la organización de producción (procesos productivos, rutas, utillaje, herramientas, recursos humanos).

Como se comentó en la revisión bibliográfica, la importancia de la DMU en el área de Producción es bastante escasa actualmente. El taller funciona a base de documentación generada por el departamento de Ingeniería de Producción del taller correspondiente, que es el que extrae información de la DMU, como el BOM o capturas de la maqueta. Son los ingenieros del mismo los que deciden qué capturas y datos y son a su mejor entender representativos y suficientes para que el operario entienda las operaciones de fabricación.

Aunque tener acceso a una DMU es beneficioso para el taller puesto que se puede ver en modelo 3D los componentes físicos en producción, no aporta la información de montaje. Se hace patente la necesidad de integrar la información de producción dentro de la maqueta digital, formando una DMU industrial.

El modelo propuesto originalmente por la empresa para crear los procesos en el As Prepared es básicamente añadir al As Planned la información detallada de producción, creando unos nuevos nodos llamados ASO igualmente configurables según el método de CI/LO/DS, como muestra la figura 22. Por tanto los nodos ASO reproducen la estructura del As Planned pero añadiendo la información del proceso de montaje asociado. La

información de los procesos de producción se incluyó en el ERP para ser utilizada por el taller.

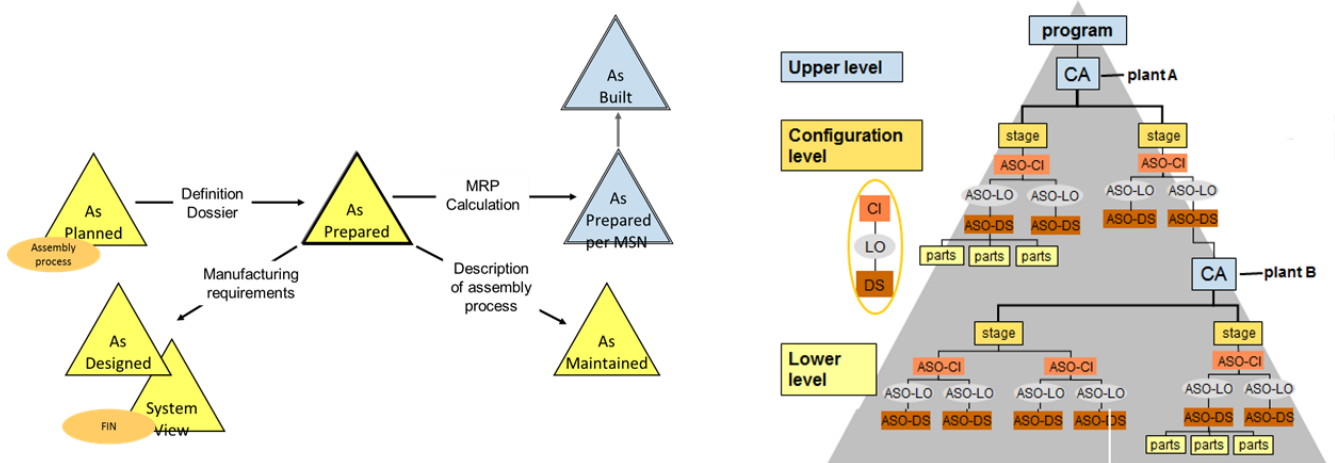


Figura 21. Estructura e interacción del As Prepared con el resto de vistas [13].

4.4.2 Análisis de la metodología de creación de los procesos y propuesta de mejoras

La principal deficiencia metodológica deriva de haber querido implementar en un ERP estructuras de procesos ingenieriles. Se ha querido adaptar la metodología a un programa que no tenía capacidades para esto y en consecuencia el programa ha determinado la metodología a usar y no al contrario, que es lo conveniente.

El principal problema que presenta un ERP es que no entiende de estructuras sino que actúa como un contenedor de procesos. Para la fabricación de piezas elementales, donde las operaciones del proceso son esencialmente secuenciales, aún el programa es capaz de calcular el valor económico de la obra en curso y otros parámetros. Para el ensamblaje, actual prioridad en la empresa, esto no sirve puesto que es necesario crear estructuras con un cierto orden lógico.

Al final, si cada nodo ASO reproduce la estructura del As Planned, se tiene en consecuencia una estructura jerárquica de los procesos de montaje, tal y como se ve en la figura 23.

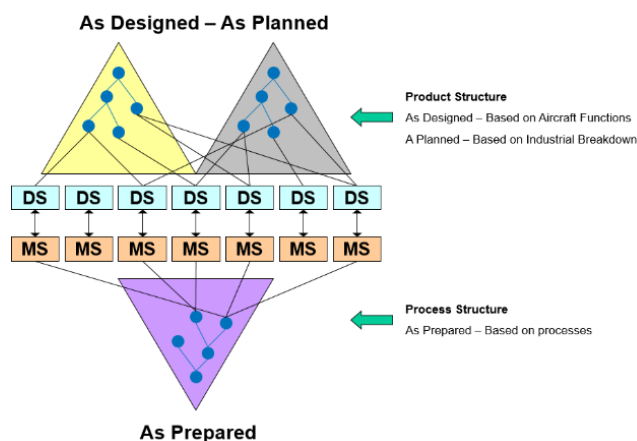


Figura 22. Modelo inicial de As Prepared [17].

El problema que se plantea con esta metodología es que probablemente una estructura de árbol no sea la forma más representativa de modelar los procesos. Una estructura jerárquica padre-hijo elimina el grado de libertad temporal que precisamente es lo que se busca en el As Prepared. Un mismo proceso puede ser utilizado para

diferentes productos, por ejemplo el proceso de pintura bien puede servir para pintar un ala que un fuselaje. Por otro lado un mismo producto puede ser generado por procesos diferentes, como puede ser un remachado entre dos piezas, que puede hacerse por remachado automático o bien manual. El elegir un proceso u otro depende de factores temporales como la capacidad de las estaciones en cada momento o el takt time deseado.

Además cada proceso en función de su relación con el producto dispondrá de más o menos precedencias técnicas a cumplir, pudiendo ser mayor o menor crítico en el proceso global. Esta combinatoria hace que las relaciones jerárquicas pierdan su sentido y se tienda a modelar los procesos como una red en vez de una estructura jerárquica.

Se ha decidido entonces plantear como principal avance metodológico un modelo de red de procesos con el que se pueda resolver toda la combinatoria anteriormente expuesta. Para ello se ha creado un nodo equivalente a la DS pero que sea contenedor de la respuesta industrial al requerimiento funcional de la DS.

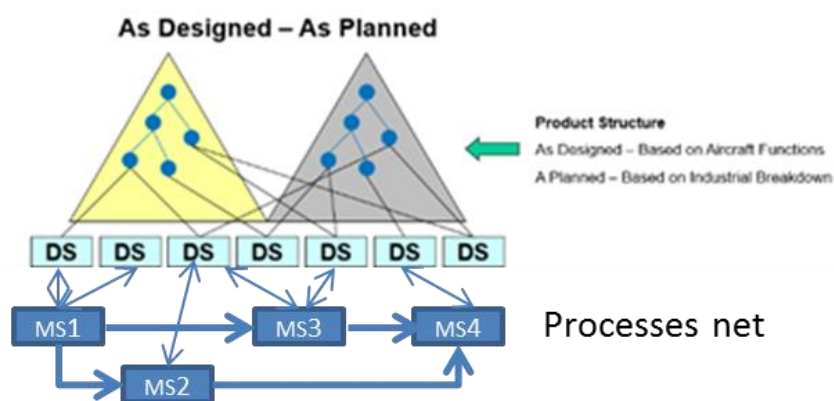


Figura 23. Modelo propuesto de As Prepared.

No se ha decidido meter capas de configuración en los procesos porque no aportan valor al proyecto, ya que en ningún momento se considerará el efecto de la misma en v6.

La estrategia a seguir en un proceso real de industrialización por parte de Ingeniería de Fabricación sería determinar las operaciones, tiempo de ejecución y precedencias que definen cada Manufacturing Solution. Este sería un nivel bajo de planificación, puesto que lo que sale de esta planificación son los tiempos de ejecución de cada MS. Por otro lado se definiría una planificación a alto nivel, estableciendo las precedencias y flujo de trabajo entre las diferentes MS, obteniéndose al final el tiempo de ciclo de fabricación del avión completo. El número de estaciones se sacaría del tiempo de ciclo obtenido dividido por el Takt time o tiempo de entrega al cliente.

Con esta estrategia se independiza el impacto de las precedencias entre operaciones que responden a una misma DS de las precedencias entre las MS. Por ejemplo, el montaje del fan cowl sobre el motor y el pilón (planificación de alto nivel), no debe verse influido por operaciones de equipado en el pilón aguas arriba.

Para establecer esta superposición de planificaciones es necesario validar cuidadosamente el proceso de fabricación, evitando así que el diseño del proceso de fabricación de una DS, aun respetando todas sus precedencias internas entre operaciones, afecte a otras realizadas aguas abajo en otras MS. Es fundamental mantener la granularidad de tal manera que una MS de sola y exclusivamente respuesta industrial a un requerimiento funcional o DS.

Actualmente la empresa está tratando de implementar modelos de red de procesos con proyectos basados en la customización de Delmia v5 e interfaces con SAP para seguir enviando la información de los mismos a taller con el ERP pero con las estructuras mantenidas en Delmia v5. El presente proyecto busca evitar esto y armonizar la arquitectura a través de un único sistema, Catia v6.

4.4.3 Metodología de creación de los recursos.

La metodología actual referente al diseño y utilización de los recursos es si cabe aún más escasa que para los procesos de montaje. Esto tiene en su origen en la externalización del diseño de los recursos. Tradicionalmente las empresas han externalizado el diseño de los recursos para poder así centrarse en diseñar y producir el producto. Airbus en particular es un fabricante de aviones, no de recursos para el montaje aeronáutico, luego Airbus emite una serie de requerimientos (capacidad de la línea, espacio disponible, pesos que debe soportar la línea etc.) a sus proveedores de recursos y estos son los que diseñan un recurso que cumpla con ellos.

Para la empresa matriz por tanto el recurso llega como una caja negra, luego para Airbus lo principal es establecer una metodología que permita clasificar correctamente a los recursos, de tal manera que según el tipo de recurso se defina una metodología de gestión.

Sin embargo, tomando como referente la metodología actual, esta hace más hincapié en aspectos de diseño que en gestionar los recursos. La metodología actual se centra exclusivamente en el diseño del utillaje, sin tener en cuenta otros tipos de recursos como los medios industriales o los recursos humanos.

En ella básicamente lo que se describe es cómo el utillaje se diseña en contexto a partir del producto que se va a fabricar con él y unas geometrías base. La única clasificación que se hace para el recurso es en este caso es que el útil queda asociado a la parte funcional que se fabrica.

En consecuencia en esta metodología el recurso queda asociado al producto y no al proceso de montaje. Esta metodología es incompleta puesto que existe utillaje modular el cual es capaz de fabricar diferentes productos. También se ha clasificado a los recursos según su proceso de montaje asociado, pero también el método es deficiente, puesto que ciertos útiles son capaces de realizar diferentes tipos de procesos.

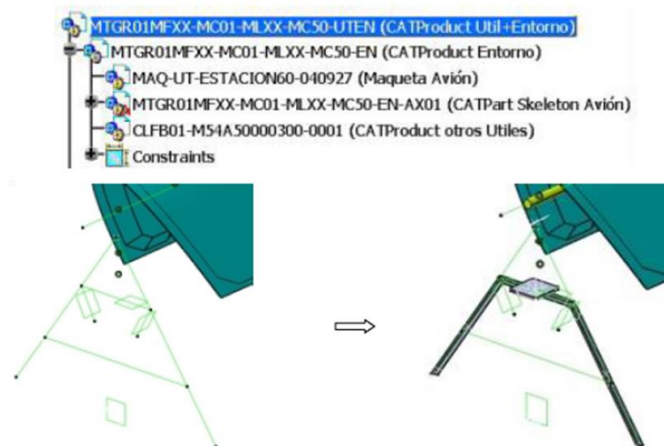


Figura 24. Diseño de los recursos en Catia v5 [17].

En consecuencia se hace necesario proponer un tipo de metodología de tratamiento de los recursos, que cubra más tipos de recursos que el utillaje y más orientado a su gestión que al diseño, puesto que se quiere mantener el modelo de externalización del diseño de los recursos.

4.4.4 Análisis de la metodología de gestión de los recursos y propuesta de mejoras

El primer paso para poder estudiar cómo gestionar los recursos es clasificarlos. Se han establecido tres posibles clasificaciones, cada una en función de un criterio:

- Si está pensado o no específicamente para fabricar un producto determinado.
 - Recursos humanos. Es obvio que el humano no está diseñado para producir nada en concreto, cambiando su entrenamiento la variedad de actividad que puede ejercer un recurso humano es prácticamente ilimitada. Este recurso debe ser integrado en la iDMU y además deben crearse

análisis ergonómicos con el producto y los recursos, pues su interacción con el entorno es máxima.

- Medios industriales. Este tipo de recurso es maquinaria, luego tiene una versatilidad media a la hora de fabricar diferentes productos. No está diseñado específicamente para fabricar un producto determinado. Ejemplos de medios industriales pueden ser la carretilla elevadora o las plataformas que portan los útiles en una línea móvil. En ambos casos les es bastante indiferente el producto que portan. Por ello el diseño contextual en este caso es inexistente. Su participación en el diseño de la iDMU es escaso, pues solo interesan sus dimensiones básicas para aspectos como el dimensionamiento de los techos, esquinas o pasillos. Sin embargo esto no quiere decir que no deban ser incluidos en ellas pues pueden ser elementos fundamentales a la hora de validar el proceso de montaje.
- Utillaje. Este recurso también es del tipo máquina pero a diferencia del medio industrial el utillaje está pensado para transformar únicamente un producto específico. El ejemplo más claro son las gradas de montaje de una aeroestructura, la grada solo está pensada para fabricar cierta parte de un modelo de avión concreto, no puede fabricar ningún otro producto. Debe ser diseñado en contexto en la iDMU.
- Según el grado de exclusión entre el recurso y los procesos de fabricación.
 - Exclusivos. El recurso es utilizado únicamente por un proceso productivo. El recurso no afecta a ningún otro proceso luego no hay problemas de saturación del recurso. Una grada de montaje de un empenaje es un recurso exclusivo pues no hay ningún otro proceso de montaje en el que se use dicha grada.
 - Compartidos. Varios procesos utilizan el mismo recurso para llevarse a cabo. El ejemplo clásico de este tipo de recursos es el puente grúa, que es llamado por las diferentes estaciones de una fábrica para levantar componentes. En este tipo de relaciones recurso-proceso el tiempo entra como variable. Procesos que a priori no tienen ninguna relación de precedencia temporal directa, se influyen a través de su conexión con el recurso, puesto que solo puede haber un proceso utilizando el recurso.
- Por función. Según el tipo de proceso para el que están pensados. Por ejemplo recantar, soldar, taladrar, voltear, transporte, tratamiento térmico, etc.

Una vez definidos unos criterios de clasificación de los recursos, se hace necesario definir la relación entre el recurso y sus componentes y la relación entre los diferentes recursos.

El recurso no debe llegar desglosado funcionalmente a Airbus, como un equivalente al As Designed del avión. El recurso tiene que llegar como un bloque indivisible a la fábrica, un diseño que entra a sabiendas que cumple con las funcionalidades previstas. Airbus actúa de contratista y como tal no tiene por qué tener una estructura funcional interna en la que se subdivide el recurso. Al máximo, el recurso podría tener un subnivel interno en el que aparezcan los bloques que constituyen sólidos rígidos en la cinemática del recurso. Por ejemplo la estructura del recurso puente-grúa estaría compuesta por subconjuntos, el puente con los carriles y la grúa. Con ello el recurso puede tener una cadena cinemática que se puede simular, si no se considerasen estas dos subestructuras, no habría manera de simular el movimiento de la grúa sin mover a la misma vez la estructura del puente.

Se sabe que una estructura jerárquica padre-hijo representa bien la dependencia funcional entre dos elementos. Aunque esto funciona bien para hacer el desglose funcional del avión, puesto que para la empresa el recurso es una caja negra en la que no se entra a valorar cual es la funcionalidad de cada componente, no merece la pena establecer una estructura interna jerárquica del recurso. Tampoco tiene sentido jerarquizar mediante un árbol los diferentes recursos puesto que no guardan dependencia funcional entre ellos. Por ejemplo, una taladradora no guarda ninguna relación funcional con el resto de taladradoras, no hay ningún padre que sea una taladradora maestra compuesta de muchas taladradoras ni nada semejante.

La única dependencia que se puede vislumbrar entre dos recursos es la temporal para aquellos que son compartidos por varios procesos. Ahí sí que sería necesario modelarla con una red de precedencias similar a la de los procesos.

De ahí que exceptuando recursos del tipo anterior, se podría considerar que los recursos están como en una piscina, sin orden alguno, de la que se les va llamando cuando el proceso los necesita.

Al igual que ocurría con el producto y con los procesos, los recursos también pueden ser configurables. Sin embargo no es tan obvia esta configuración como podía ocurrir con el producto. El recurso en función de si es mayor o menor modular podrá ser capaz de fabricar diferentes piezas con un mismo proceso, la misma pieza pero con diferentes procesos o diferentes piezas con diferentes procesos. Esta combinatoria hace que no haya una configuración cuyos conjuntos de efectividades sean complementarios, formando al final n configuraciones para n productos diferentes.

Debido a que no se han hecho todavía estudios de la configuración de los recursos, actualmente los recursos no son configurables en la compañía y como en el proyecto no se está considerando la configuración, no se ha contemplado a la hora de definir el modelo de gestión de los recursos.

En el proyecto se han hecho las siguientes consideraciones para los recursos:

- Solamente se ha decidido modelar recursos del tipo máquina, no de carácter humano, debido a que el proyecto no cubre el estudio ergonómico en las líneas de montaje.
- Las herramientas de pequeño tamaño tipo pistolas para los operarios no se incluyen en el modelo.
- Tampoco se ha tenido en cuenta los recursos compartidos, por lo que se considera que todos los recursos están en una piscina, sin relaciones entre sí.

5 CASO DE ESTUDIO: EL XDA15

En este capítulo se plantea el caso de estudio con el que se intenta llevar las anteriores metodologías a un PLM de última generación. Si bien se ha hecho en la revisión bibliográfica referencia a proyectos en los que se intentaban llevar algunas de ellas a PLM de la generación anterior, se encontraron muchas deficiencias por no estar pensado para la práctica de la ingeniería colaborativa.

El capítulo tiene como objetivo demostrar el grado de cumplimiento con la metodología del programa Catia v6, que en teoría debería recoger todas las lecciones aprendidas de los anteriores proyectos. Además se busca crear procedimientos de trabajo que implementen la metodología, remarcando aquellas áreas de mejora para futuras versiones de Catia v6.

El caso de estudio consiste en el diseño funcional e industrial de un nuevo avión, al que se le ha dado el nombre de *Extended Design Aircraft 2015*, XDA15. Como se ha dicho en el apartado anterior, el caso de estudio comienza en el As Designed y termina en el As Prepared. Puesto no se dispone de ninguna estructura previa sobre la que trabajar, como el As Defined o el As Proposed, se hace necesario partir de una estructura As Designed completamente nueva desde el principio. En la realidad la empresa tiene establecido un proceso de adaptación entre las estructuras, que se recuerda que son capas, luego no son independientes sino una reordenación de los elementos y/o modificación de información a los mismos.

Por tanto se asumen una serie de requerimientos iniciales de cliente que habrá que cumplir, por ejemplo: avión de transporte militar, de ala alta, cola en T, turbohélice, etc.

En un principio el caso de estudio del XDA15 tenía dentro de su alcance el estudio de la configuración del producto aunque no de los procesos y recursos, puesto que así lo reflejaban los métodos propuestos en el capítulo anterior.

Sin embargo, al comenzar el estudio se ha visto que era un alcance demasiado amplio por lo que se ha decidido solamente reflejar el impacto de la configuración en la implementación en v6 de las estructuras As Designed y As Planned y demostrar algunos posibles *workarounds*, pero no implementarlos en el modelo. Después de este estudio reducido, la configuración ha dejado de ser considerada también para el producto.

Por tanto, el caso se reduce a estudiar el diseño de un único MSN y que además no ha sufrido cambios en el diseño a lo largo del ciclo de vida.

La estructura del caso de estudio consiste en que para cada etapa del ciclo de vida se evalúa la posibilidad de integración de la metodología propuesta en el capítulo anterior en los diversos módulos y programas usados. Para ello no se utiliza los datos del avión completo sino una muestra, de cuyo análisis y extraer un procedimiento y unas conclusiones, a partir de los cuales se extrapola al caso de uso del avión completo.

5.1 As Designed.

5.1.1 Implantación de la metodología As Designed en Catia v5.

En Catia v5 los niveles no son más que árboles de Products. En la realidad, son los PDM los que tienen almacenado el metadato que indica los padres y los hijos de los diversos nodos. Es la interacción entre el PDM y Catia lo que genera la estructura del producto.

En el modelo se asume que la propia estructura generada en Catia v5 (Products y Parts) actúa de PDM y mediante los links entre los ficheros crea la estructura.

Una vez establecida esta hipótesis más las simplificaciones detalladas en el apartado anterior, se muestra cómo quedaría la estructura en Catia v5.

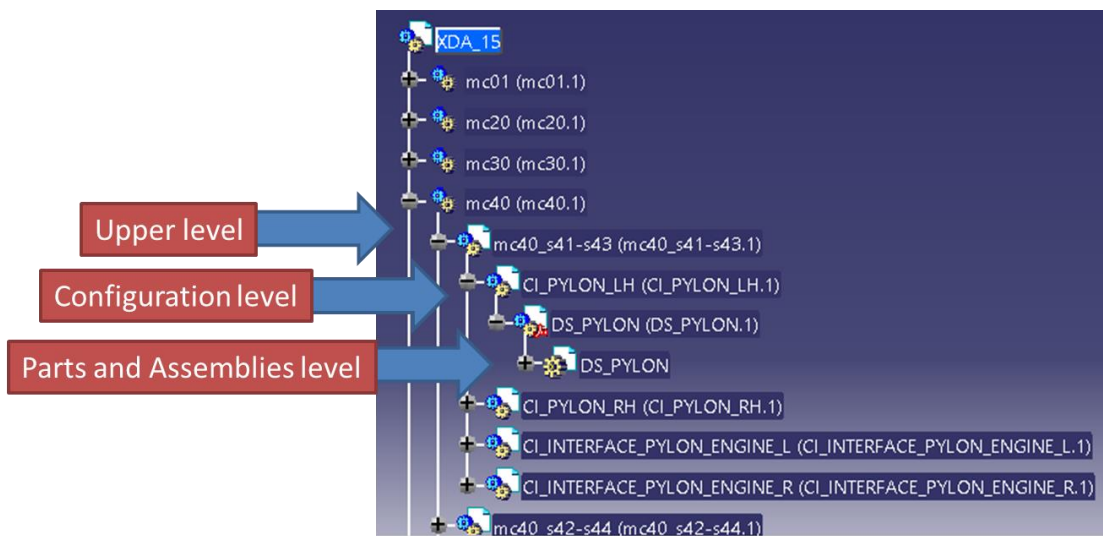


Figura 25. Estructura As Designed en Catia v5.

La adaptación del Upper Level al caso de estudio en v5 ha sido la siguiente:

- Los primeros dos niveles, que hacen referencia a diferentes líneas de producto, han colapsado bajo el nombre *XDA15*.
- Los Major Component se han modelado como Component, para tener así un único Product raíz con la información de los Major Component incluida. Las secciones si se han modelado como Products. Además para dejar libertad al modelo se han dejado las secciones no diseñadas como el Sponson como Product vacío, para permitir el modelado del mismo cuando se necesite, ya sea en este caso de estudio o en futuros usos del XDA15. Esto da una gran flexibilidad al prototipo planteado para otros proyectos donde se necesite aún una mayor complejidad en el número de componentes.
- No se ha considerado niveles de clasificación por ATA.

La adaptación del Configuration Level ha seguido las siguientes simplificaciones:

- No se ha incluido el elemento LO. Esto es posible puesto que no se está estudiando el problema de la configuración. Por tanto hay una relación única entre el CI y la DS.
- En muchos casos se ha identificado un único CI para una sección. Esto no es cierto, solo se ha considerado así por simplificación de la realidad, en la que una sección está compuesta por cientos de CI. Los CI de montaje se han identificado con el nombre *CI_Interface*. Se ha decidido mantener la metodología de Airbus y se ha adjuntado siempre al padre más cercano al centro de gravedad del avión.
- Otra hipótesis es que se ha considerado que el nivel DS está compuesto por únicamente un único componente o Part que define la solución, aunque a menudo una DS es un conjunto de decenas de partes elementales.

5.1.2 Creación del As Designed del XDA15.

La primera decisión a la hora de diseñar es la de si diseñar cada pieza en su sitio, es decir, tomando como referencia unos ejes absolutos; o bien diseñar cada pieza en ejes locales y después posicionarla en la maqueta.

En algunas empresas se sigue diseñando en ejes absolutos pero no es el caso de Airbus. Cuando se pasó del standard de diseño de Catia v4 a Catia v5 se decidió pasar al mismo tiempo de diseñar en ejes absolutos a en ejes locales.

Esto no quiere decir que cada pieza diseñada en ejes locales no tome referencias externas. En las primeras etapas del diseño se establecen una serie de planos, líneas y superficies que se congelan y se toman como

punto de partida para el diseño. Esto son por ejemplo las coordenadas en las que empiezan y terminan las secciones, el posicionamiento de los planos que las delimitan etc.

En este punto hay que aclarar que entiende Airbus por diseño en contexto y qué es lo que se entiende en Catia por diseño en contexto. El anterior párrafo describe que Airbus diseña a partir de un contexto de geometrías básicas (más conocido como *skeleton*), pero estas no son definidas a nivel de Part sino que aparecen dentro de él como Geometrical Sets que no están ligados a otro Part.

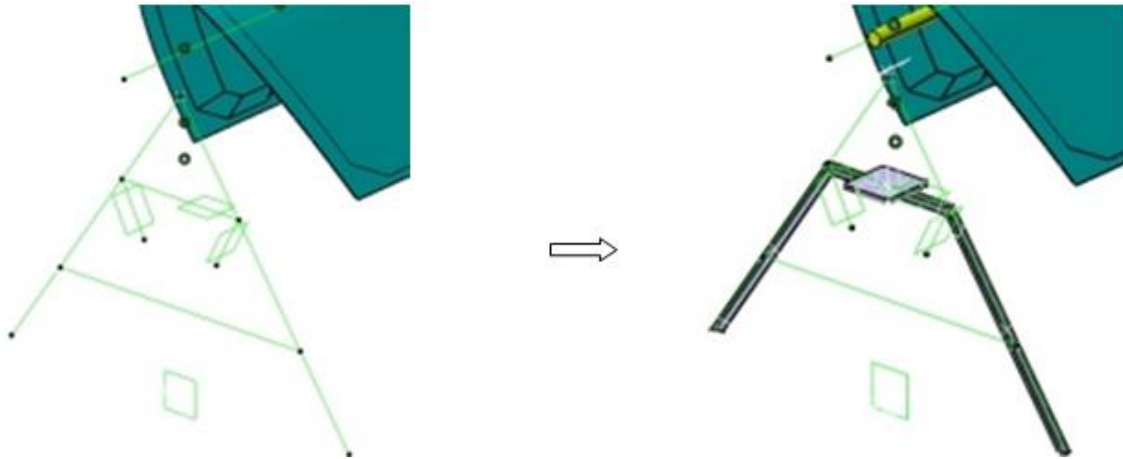


Figura 26. Skeleton de apoyo según metodología de diseño Airbus [17].

Sin embargo, Catia entiende por diseño en contexto cuando a partir de una cara, superficie, punto, línea o cualquier geometría de un Part ya existente se comienza a diseñar un nuevo Part. Esto crea una relación biunívoca entre los dos componentes a través de un link contextual en la estructura de producto.

Esta posibilidad tiene un impacto enorme en el diseño. Si el contexto cambia (la parte que sirve de soporte), afecta inmediatamente a la pieza diseñada, que alterará sus propiedades para seguir manteniendo las condiciones de contorno previamente establecidas. Esta alta capacidad de adaptarse al cambio de diseño puede ser muy buena para productos con pocos componentes, en los que el número de grados de libertad puede ser medianamente reducido. No ocurre lo mismo con productos con gran número de componentes, donde si se aplicase esta metodología, un cambio de diseño provocaría un impacto completamente impredecible, quedándose sin posibilidad de que el modelo virtual asegure la funcionalidad del producto.

Por ello se ha elegido la metodología Airbus para el diseño de los componentes y se han diseñado cada una de las piezas en ejes locales. Estas se han intentado dibujar de la manera más simplificada posible, pues no es el objeto de este proyecto el diseño de avión sino su industrialización virtual, pero manteniendo proporcionalidad y de una escala próxima al 1:1 respecto a las dimensiones de un típico avión de transporte militar.

Una vez dibujadas todas las piezas se hace necesario colocarlas en su posición. Podría pensarse que puesto que el avión debe formar un producto integrado se podría hacer el uso del módulo Assembly Design, creando Assembly Constraints que hicieran del avión lo que es, un ensamblaje de componentes. Esto no es permitido por la metodología de Airbus por el mismo motivo que el diseño contextual, por provocar en el modelo una incertidumbre inadmisible ante los cambios.

La técnica para crear la maqueta digital ha sido la de aprovechar las capacidades del módulo DMU Navigator para posicionar los componentes. Con él se pueden hacer tanto traslaciones como rotaciones de los ejes en los que se ha diseñado la pieza respecto a su padre o al primer elemento de su mismo nivel, dentro de la estructura. En la industria esta información, que al final es una matriz de rototraslación, se almacena en el PDM, pero en el proyecto ha bastado con la capacidad de almacenamiento de metadatos que tienen los Products.

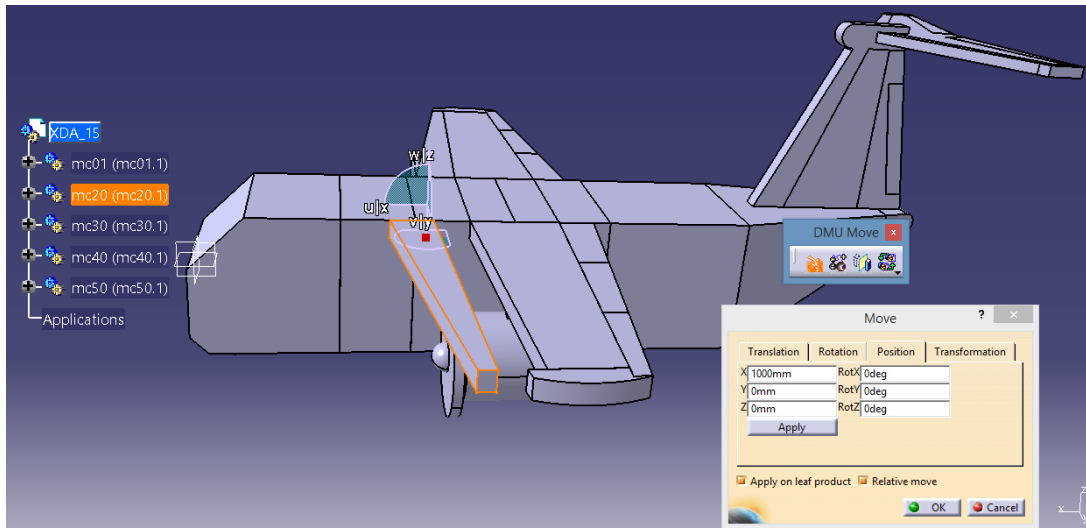


Figura 27. Posicionamiento de los componentes.

Tras tener todas las piezas posicionadas el siguiente paso ha sido diseñar las soluciones de montaje, es decir, los DS pertenecientes a los CI de montaje. Un problema bastante estudiado en la compañía y aún no resuelto es la incapacidad de correlacionar de manera gráfica y analítica qué elementos componen la unión entre componentes. Esto ocurre precisamente porque en la DMU las partes están *colocadas*, no *ensambladas* mediante restricciones físicas. A priori no hay ninguna relación en el modelo que indique que cierto remache va asociado a un componente u otro y lo único que se puede hacer son análisis de interferencia y colisiones que aseguren que la unión entra dentro de las tolerancias de diseño.

Esto hace que a menudo la única posibilidad que tiene ingeniería de fabricación para asegurar que la función de producción efectúe el montaje correcto es adjuntar capturas y planos globales de la maqueta que en la zona de la unión, establecer una lista de los materiales que intervienen en la unión y confiar en la pericia y experiencia del operario a la hora de interpretar los planos de montaje.

Para solucionar este problema se ha propuesto una posible metodología de diseño. Para los elementos de unión se ha decidido por un diseño completamente contextual (entendido ahora sí como el diseño en contexto de Catia v5) en función de los elementos que unen. Con ello se generan unos links contextuales que tienen una función doble, asegurar la coherencia de la unión ante el cambio de diseño y además permiten identificar rápidamente los elementos que unen.

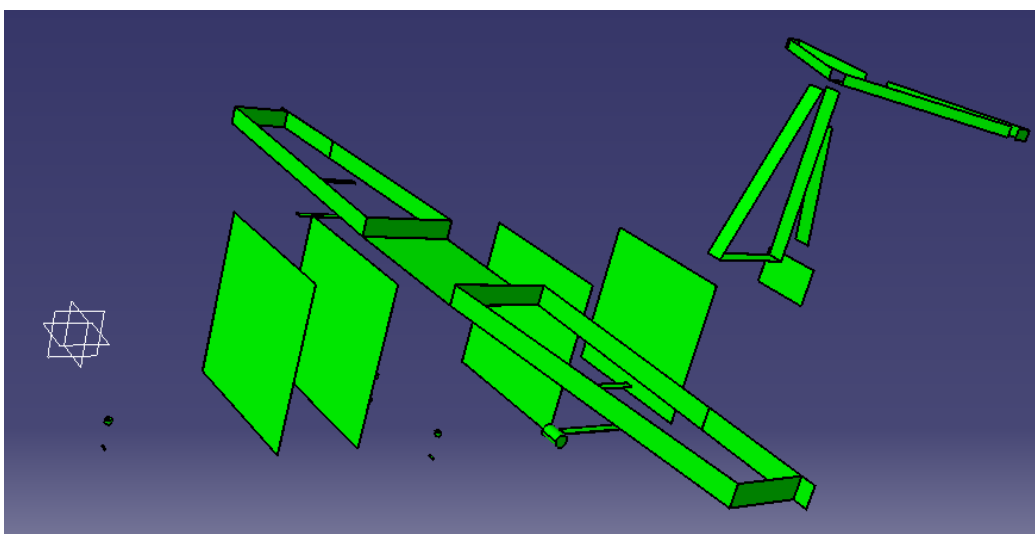


Figura 28. Elementos de unión en el XDA15.

Como este proyecto no trata de evaluar los diferentes tipos de uniones (remachada, soldada, atornillada, etc) se han tomado tres tipos de uniones simplificadas. Una es un plano de 2mm de espesor y extensión la superficie de contacto entre las piezas a unir, representando un hipotético *pegamento* como elemento de unión. Otra es un cilindro con inicio y final las superficies a unir (como en el caso de la unión motor-nacelle). Haría las veces de herraje o de eje. Y por último la unión de los trenes al fuselaje, que se ha hecho con un anillo cilíndrico que haría el papel de un cojinete.

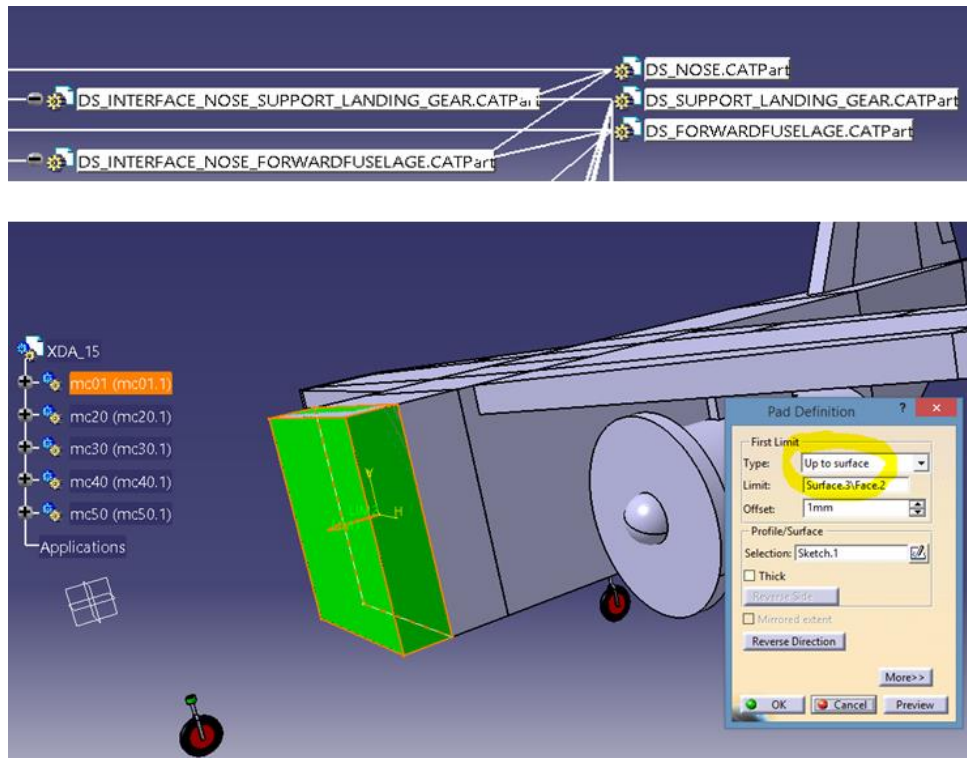


Figura 29. Ejemplo de diseño contextual.

Sin embargo esta metodología no es aplicable para un avión real por diversas razones. La primera es que como anteriormente se ha comentado la estructura de producto resultante tras crear los link contextuales alcanza un grado de complejidad muy alto, con una gran interdependencia entre los componentes. Esto, para un sistema con Catia v5 cuyo punto débil precisamente es el uso de links externos entre ficheros, aumenta mucho el riesgo de una carga incompleta de la maqueta, de pérdida de ficheros, de gran impacto de los cambios sobre el modelo, etc.

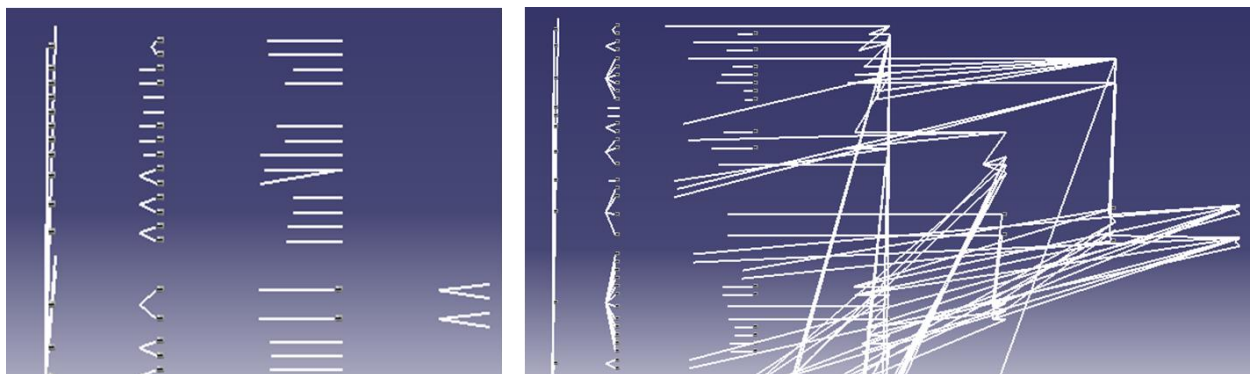


Figura 30. Estructura antes y después del diseño contextualizado de los elementos de unión.

La otra es que la mayoría de los elementos de unión (remaches, tornillos, tuercas) son estándar. Cada fabricante coloca en su página web un catálogo de modelos CAD de cada tipo. El pensar que estos modelos de unión deberían estar contextualizados haría perder todo el sentido estándar de estos componentes.

Finalmente ha quedado un modelo con 83 componentes entre componentes funcionales y sus elementos de unión, dejando total libertad para una posterior ampliación del mismo si hiciese falta.

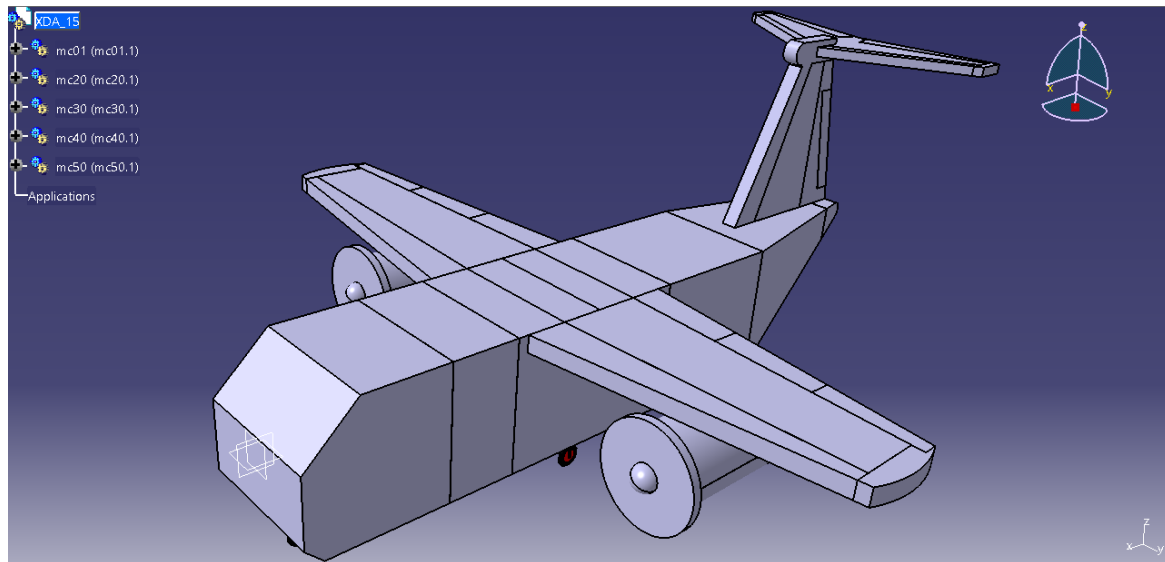


Figura 31. Diseño final del XDA15.

En conclusión el As Designed aunque no presenta metodológicamente dificultad de integración en v5, presenta aún incógnitas para investigar, pero que son más de discusión académica que de impacto a nivel industrial, como es la relación entre los planos de montaje y los productos que se montan.

5.1.3 Interoperatividad entre Catia v5 y Catia v6.

Es a esta altura del proyecto donde el diseño funcional podría considerarse finalizado y en gran medida congelado. La siguiente etapa del ciclo de vida es su industrialización. Se propone aquí por tanto la metodología de transición entre un sistema de links entre ficheros como es Catia v5 a una base de datos relacional como Catia v6.

Este PLM de nueva generación tiene un potencial enorme al usar una base de datos, pudiendo interrelacionar información de muy diferente índole: texto, gráfica, relaciones lógicas y conceptuales, etc. Es por ello el más indicado para implementar la industrialización del *XDA15*, donde no solo va a surgir información de tipo funcional del producto sino también procesos de ensamblaje e información sobre los recursos asociados.

Las anteriores versiones de Catia v6 tenían grandes dificultades para importar archivos de Catia v5. Sin embargo, en la versión r2013x han sido en su mayoría solventadas. Aun así, hay ciertos aspectos de v5 que v6 no puede importar: .txt con tablas adjuntas que toman elementos para fórmulas de parametrización, *assembly constraints* del módulo del Assembly Design, entre otros.

El problema de importación de los .txt por ejemplo sí afecta a las maquetas reales, perdiéndose información en la interoperabilidad, lo que demuestra que Dassault tiene que seguir trabajando en la interoperabilidad entre los dos sistemas si quiere que las grandes compañías se adhieran a v6.

En el caso de estudio no se presentan ninguna de estas dificultades, luego se reduce la complejidad de la interoperabilidad. En él lo único que hay que hacer previo a la importación en v6 es pasar la herramienta CATDUA (*Tools/Utility...*) al modelo en v5. Esta saca a la luz y trata de eliminar todos los errores de

coherencia entre links, que en muchos casos ni aparecen en la estructura del producto y por tanto el usuario los desconoce. Son de este tipo por ejemplo links a archivos que ya no existen o no están en la estructura, referencias a nombres antiguos de links, etc.

Una vez depurados los errores solo queda irse a v6 e importar el modelo.

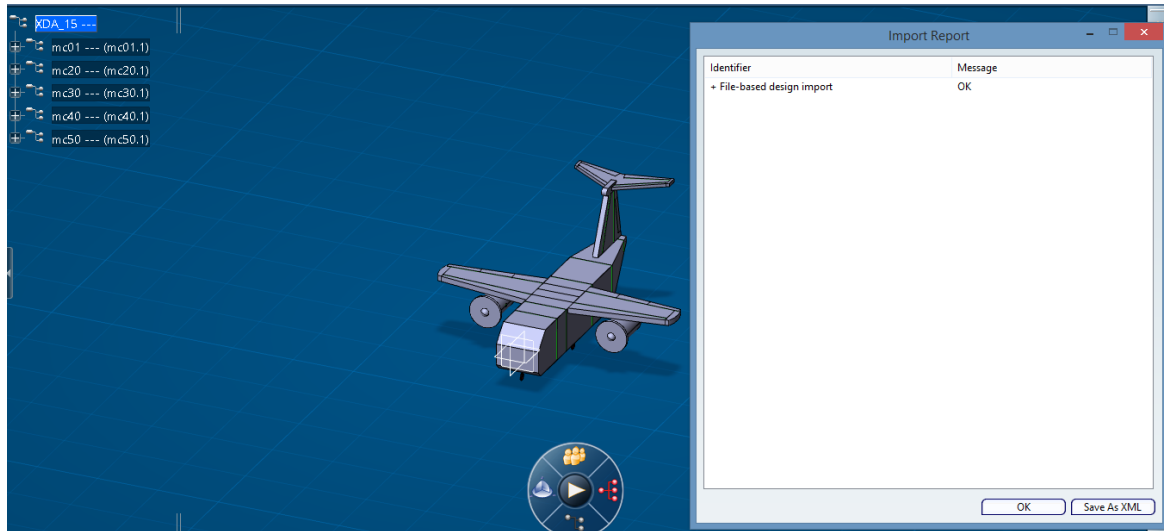


Figura 32. XDA15 importado en v6.

Si aguas abajo en la industrialización se descubriese que hay que hacer algún cambio de diseño, v6 dispone de herramientas que permiten remarcar o añadir anotaciones en las piezas. Estos archivos se exportarían a v5 para que la oficina de diseño los abriese, hiciese los cambios pertinentes y volviese a importarlos en v6 mediante los mecanismos de revisión y gestión del cambio que posee este último.

5.2 As Planned.

En este apartado se implementa la metodología propuesta de As Planned en Catia v6. Puesto que el As Planned bebía del As Designed y del As Specified se ha tenido que crear un As Specified previo en el que se han definido los CA. No se ha evaluado la metodología de creación del As Specified, solo se ha simplificado la estructura que propone la norma.

5.2.1 Estructura As Specified.

En primer lugar no se ha considerado a los CA/CC como entes configurables, es decir, se han colapsado los niveles CA/CC-CI/LO/DS en un único nivel como ya ocurría en el As Planned. Esta hipótesis asume que el reparto industrial a nivel de CA/CC permanece invariable en el tiempo.

En segundo lugar no se ha considerado el ente CC dentro de la estructura, puesto que queda fuera del alcance del proyecto el trasvase de responsabilidades y otros aspectos no materiales entre los diferentes socios.

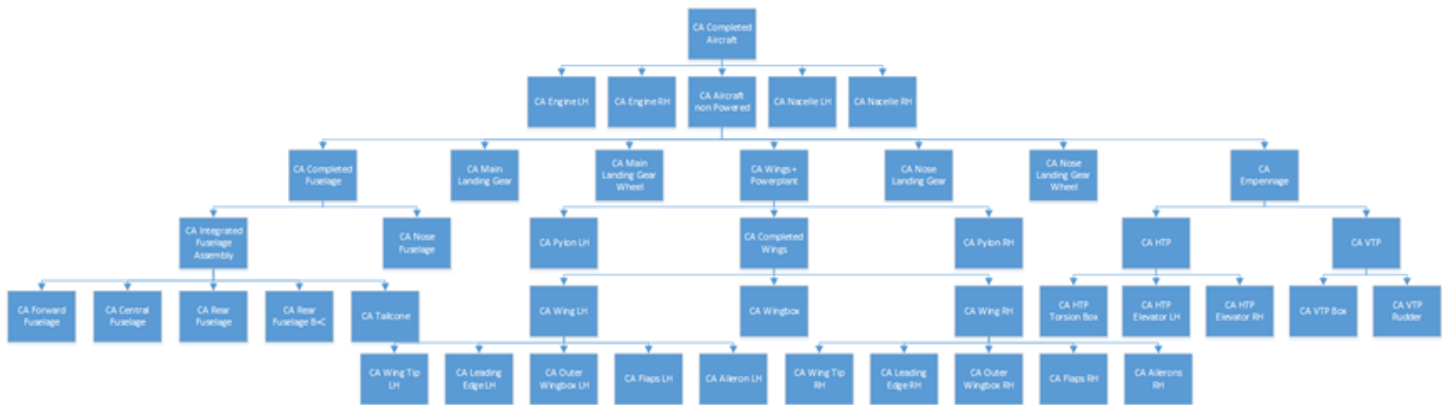


Figura 33. Modelo de As Specified.

5.2.2 El Entorno Delmia v6. Process Definition.

El salto tecnológico que se propone en este proyecto es la creación de una maqueta integral iDMU que contenga además de la información de diseño funcional la información de diseño de industrialización. Las pruebas de anteriores proyectos piloto demostraron que las soluciones que se ofrecían en el paquete Delmia v5 de Dassault tenían como punto débil una escasa interoperabilidad con Catia v5. Sin embargo, Dassault asegura que en el entorno v6 estas barreras han sido eliminadas, por tanto se ha elegido las soluciones incluidas en Delmia v6, que al igual que ocurría en v5 son módulos adicionales que aparecen en el entorno Catia.

Las soluciones de industrialización se encuentran en un conjunto de módulos agrupado bajo el nombre *Manufacturing Planning*. Todas se fundamentan en una estructura PPR: Producto, Proceso, Recurso, Sistema. Cada uno de estos hijos constituye a su vez un árbol independiente. El árbol de Producto lo constituye la estructura funcional del producto, el árbol de Proceso indica cómo se van creando los sucesivos ensamblajes hasta tener el producto fabricado, el árbol de Sistemas lo constituyen las operaciones y estaciones definidas para la fabricación y por último el árbol de Recursos son las herramientas, personas y utillaje necesario para llevar a cabo las operaciones.

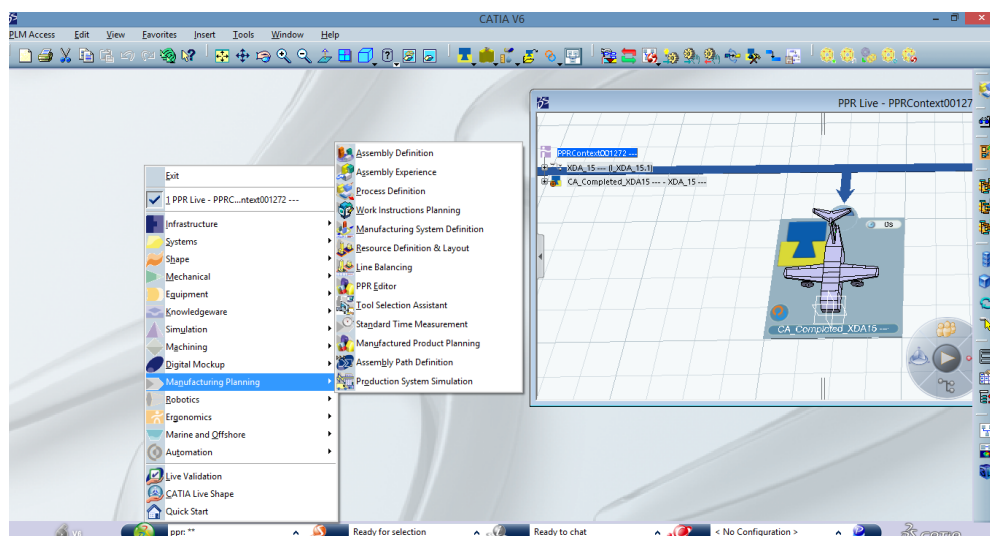


Figura 34. Entorno Delmia v6. Process Definition.

La creación de cada árbol viene dada por un módulo diferente. Concretamente el módulo del *Process*

Definition ha sido recomendado por Dassault como el más indicado para implementar el As Planned. Esto es así porque el PPR está pensado para industrializar, donde la segunda P indica los sucesivos montajes que llevan a tener el producto completo y por tanto se acerca más a la definición de As Planned. Por ello se ha intentado explorar las capacidades del módulo para su implementación.

Un aspecto importante es que no se pueden relacionar directamente todos los árboles entre sí. Solo se pueden relacionar dos a dos, estableciéndose los siguientes enlaces: Producto-Proceso, Proceso-Sistema y Sistema-Recurso. Puesto que en el As Planned no se detallan ni las operaciones de fabricación ni las estaciones solo será necesario el módulo *Process Definition*, encargado de establecer las relaciones Producto-Proceso.

Existen diversos tipos de proceso recogidos dentro del módulo: procesos de fabricación, de entrada de material, de montaje, discerniendo entre materiales continuos o discretos. En el alcance del proyecto solo se considera el aporte de partes discretas y sus procesos de ensamblaje. Queda fuera del estudio por tanto casos como la industrialización de la fabricación de piezas o de materiales continuos como áridos.

El tipo de entrada que se refiere a partes o subconjuntos que entran directamente a la línea para su montaje, sin importar su ensamblaje previo se modeliza mediante el proceso *Provide*. Refleja el hecho de la compra de componentes fabricados externamente pero que intervienen en procesos internos de montaje. No permiten ninguna transformación del material de entrada. El proceso de montaje se manifiesta mediante el *Assembly Process*.



Figura 35. Tipos de proceso del Process Definition.

Por defecto aparece un primer nodo de ensamblaje, al que hay que asignarle con Scope Link el nodo más alto del producto a fabricar. El Scope link establece una relación contractual entre el producto a fabricar y el proceso de fabricación, asegurando que no hay nada que tenga que estar montado que no lo esté y viceversa. Con este Scope se define en cascada una dependencia hacia el nivel inferior, que obliga a que esté todo montado.

El montaje puede ocurrir por asignación directa del componente al proceso de montaje correspondiente o por asignación indirecta. La asignación indirecta de componentes ocurre en dos casos. Uno es si todos los hijos de un padre están montados aunque esté ocurriendo en distintos procesos de montaje, indirectamente el padre está montado. El otro es el inverso del anterior, si se asigna directamente un padre con muchos hijos, el padre entra como un bloque al proceso de montaje conteniendo todos los hijos, que se asignan indirectamente.

Para establecer las metodologías no se utilizará el *XDA15* completo sino un fragmento compuesto por la sección 13 y la sección 15.

En la figura siguiente se identifica que el color verde que aparece en el árbol es la asignación por Scope Link al último proceso de ensamblaje. Esto provoca que aparezca un modelo transparente del producto completo en él, que se irá rellenando conforme se asignen componentes a sus procesos de ensamblaje. En el caso de la figura se ha asignado una pieza directamente (color azul claro), lo que provoca al mismo tiempo su entrada como un proceso *Provide* y que esta adquiera una textura sólida en el modelo transparente. Además como su padre en la estructura solo lo contiene a él, automáticamente su padre se asigna indirectamente (azul oscuro). El resto de componentes puesto que no está asignado a ningún proceso de ensamblaje permanece de color naranja.

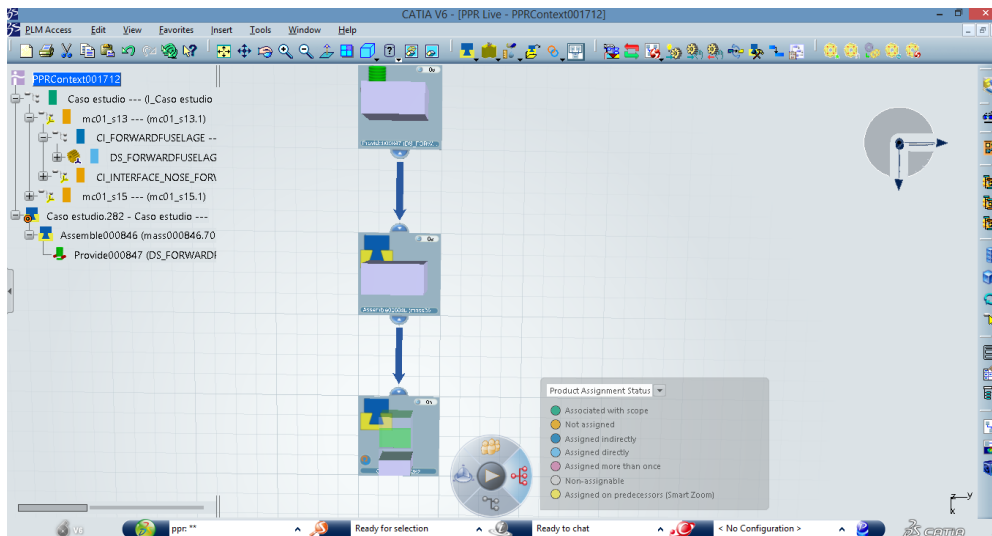


Figura 36. Código de colores y simbología del Process Definition.

Por último la característica más potente del Process Definition es la capacidad de asignación visual de componentes. Se tienen varias formas de asignación de productos a procesos y en todas ellas el producto es asignado directamente. Las asignaciones indirectas ocurren automáticamente conforme se dan las asignaciones directas. Una es la clásica del *Drag & Drop*. Consiste llevar con el ratón un nodo de producto y soltarlo en el cuadro de procesos. Otra es usar el *Assignment Assistant for Assemblies*. En él se puede ver qué componentes están ya asignados y cuales no, en qué proceso se quiere asignar y asignarlos o reasignar productos de un proceso a otro. Además se tiene tanto una representación gráfica como en lista comparativa entre el lo disponible y lo ya asignado en cada proceso.

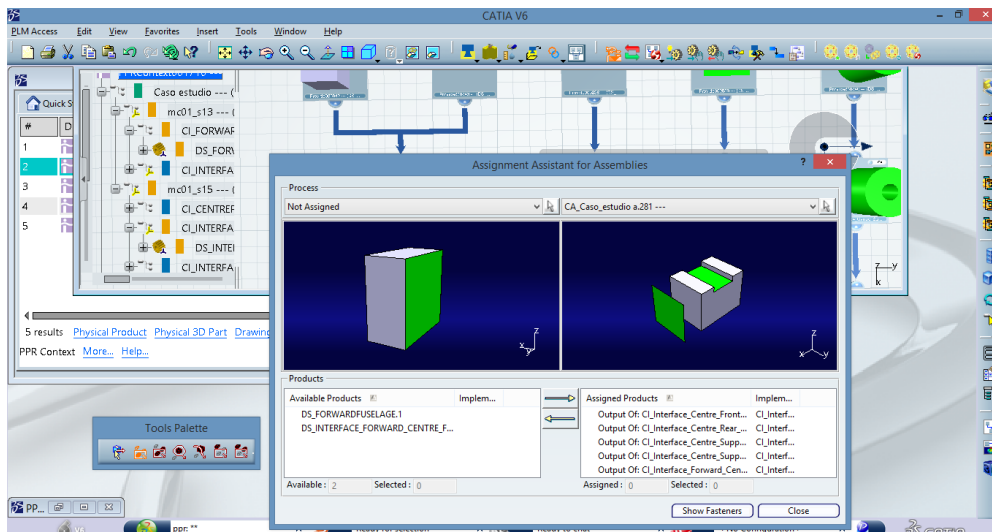


Figura 37. Process Definition. Assignment Assistant for Assemblies.

Por otro lado se tiene el *Assignment Panel*. No se tiene una comparativa gráfica entre lo asignado y lo asignable pero permite filtrar el tipo de componente de asignación, si es Product o Part, además de poder filtrar por atributos: fecha de creación del componente, estado de madurez, versión, etc.

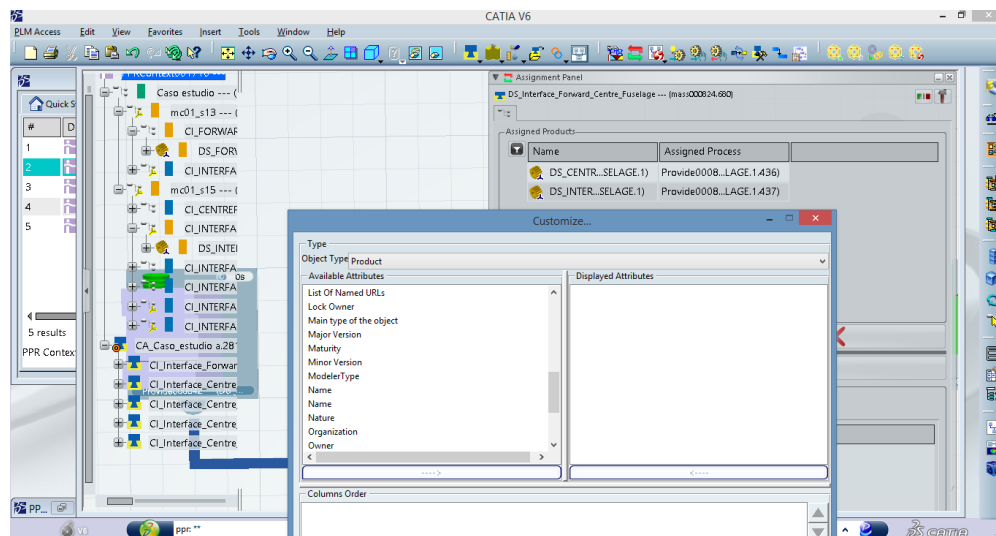


Figura 38. Process Definition. Assignment Panel.

Por ultimo se puede asignar con la herramienta *Smart Zoom*. Esta consiste en una representación gráfica del modelo con Scope Link y en ella se puede hacer click sobre cada componente y asignarlo/desasignarlo, pudiendo hacer transparente ciertas secciones del producto para acceder a cualquier parte que se desee asignar. Esta herramienta sería la ideal para productos muy grandes en los que se quiere hacer un primer filtrado de los elementos que compondrían el ensamblaje de una manera visual y ya terminar de definir qué productos asignar con otra de las herramientas previamente explicadas.

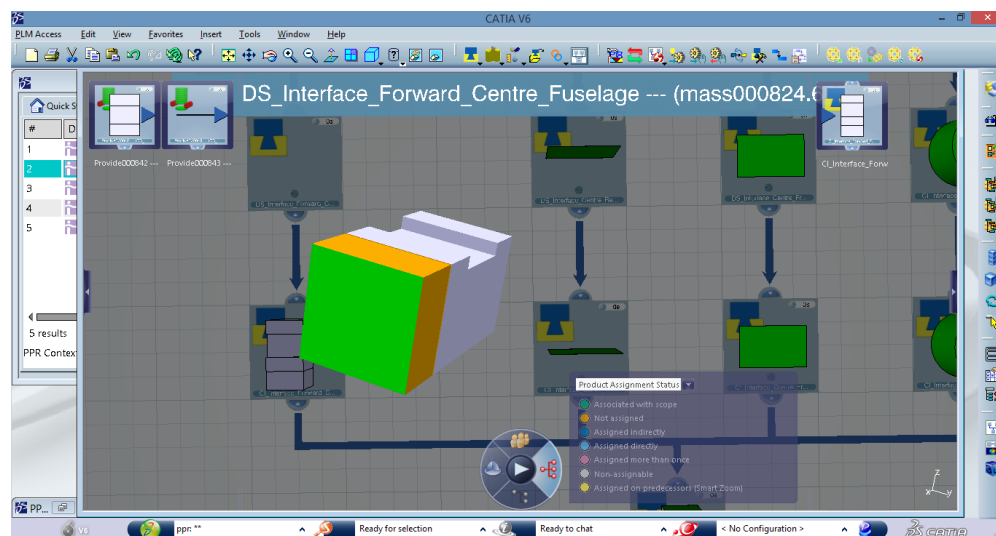


Figura 39. Process Definition. Smart Zoom.

5.2.3 Implantación de la metodología As Planned de Airbus en Delmia v6.

Llegado a este punto, ocurre una divergencia en la solución de Dassault y la metodología Airbus. Si el As Planned fuese una estructura de procesos, se amoldaría perfectamente a la arquitectura de datos planteada en el Process Definition. Esto es una sucesión de procesos de ensamblajes que al final componen el producto completo. Sin embargo ya se ha explicado que el As Planned es una estructura de producto en las cuales algunos nodos representan uniones de otros productos y otros nodos son para delimitar las responsabilidades. El problema de representar el As Planned con la estructura de procesos del Process Definition es que aquellos nodos CA en teoría no estarían asociados a ningún proceso de montaje puesto que el montaje global del CA es en realidad definido como consecuencia del montaje individual definido en cada DS.

Sumado al anterior problema, el As Planned contiene a parte de la información de montaje y responsabilidades la información de gestión de la configuración y cambios de diseño heredada del As Designed.

El nodo CI no genera ningún montaje adicional puesto que los DS1 y DS2 que caigan debajo de él jamás se montarán simultáneamente en el mismo producto porque su efectividad es diferente. Por tanto, en el Process Structure aparece un nodo redundante que desde el punto de vista de ensamblaje no aporta nada, afectando más tarde a las estructuras de Sistemas y Recursos, que no tendrían ninguna operación de montaje asignada al nodo CI (Se recuerda que las rutas de fabricación van asignadas a las DS según la Golden Rule 2).

Ha sido por tanto necesario evaluar diferentes posibilidades del PLM de Dassault para poder implementar esta estructura a parte del Process Definition que recomendaban. El método para analizar cuál sería la solución a este problema pasa por definir una posible decisión de configuración seguida de un caso de estudio en v6 para cumplirla, evaluando el impacto en el sistema y las pérdidas/ganancias de información causadas.

Se ha establecido los siguientes casos de estudio:

1. Mantener CI en la estructura de producto As Planned, reconciliando As Planned/As Designed a través de los CI.
2. Eliminar CI de la estructura de producto As Planned, reconciliando As Planned/As Designed a través de los DS.

Caso de estudio 1

Por un lado podría considerarse crear otra estructura de producto As Planned reordenando los nodos del árbol manualmente y reconciliar y sincronizar ambas estructuras. Por desgracia Delmia v6 no permite la reconciliación entre dos estructuras de productos o dos de procesos, las relaciones entre estructuras son exclusivamente las ya presentadas. Es irrelevante si el producto As Planned y el producto As Designed están insertados en un mismo PPR o en diferente, no existe capacidad de reconciliación. A esto hay que sumársele diversos problemas encontrados en la estructura de Procesos y Sistemas al añadir productos duplicados procedentes del As Designed y el As Planned en un mismo Process Structure. Por lo tanto esta opción ha sido desechada.

Por otro se ha valorado la potencialidad que tiene el Process Definition para crear estructuras de producto a partir de los elementos de entrada y de salida. Tradicionalmente el As Planned se ha construido de una manera no visual. Esto es que se tenía un CA y se le adjuntaba en una lista los CI que los componían, debiéndose buscar aparte cada CI en la DMU para ver físicamente del elemento que se trataba y poder establecer un reparto adecuado de la carga de trabajo.

Construir el As Planned visualmente a través del Process Definition y considerar el CI como un proceso de ensamblaje más aunque en los CI no ocurra nada de montaje y generar una estructura de producto As Planned a través del *Compute Process Output* supondría un avance considerable en la industrialización del producto. Luego con esta estructura nueva de producto se haría en otro PPR la relación Estructura de producto As Planned-Estructura de Procesos.

Utilizando la estructura de producto extraída del *XDA15* se ha definido un pequeño As Planned de un CA compuesto de dos CA más sus componentes de unión llamados a través de los diversos CI/DS.

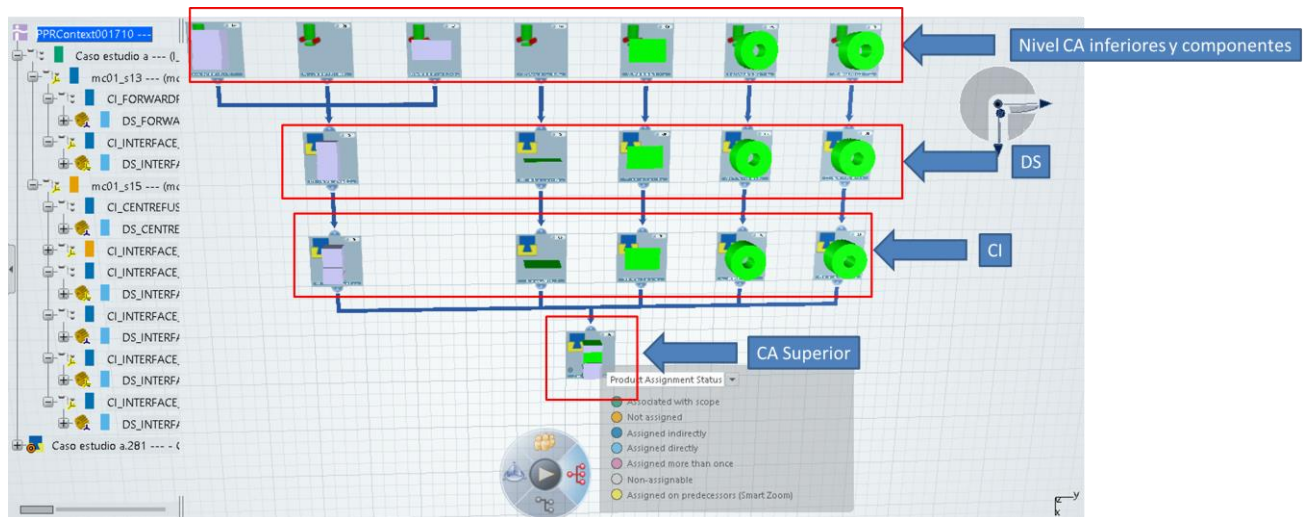


Figura 40. Caso de estudio 1. Creación del Process Structure.

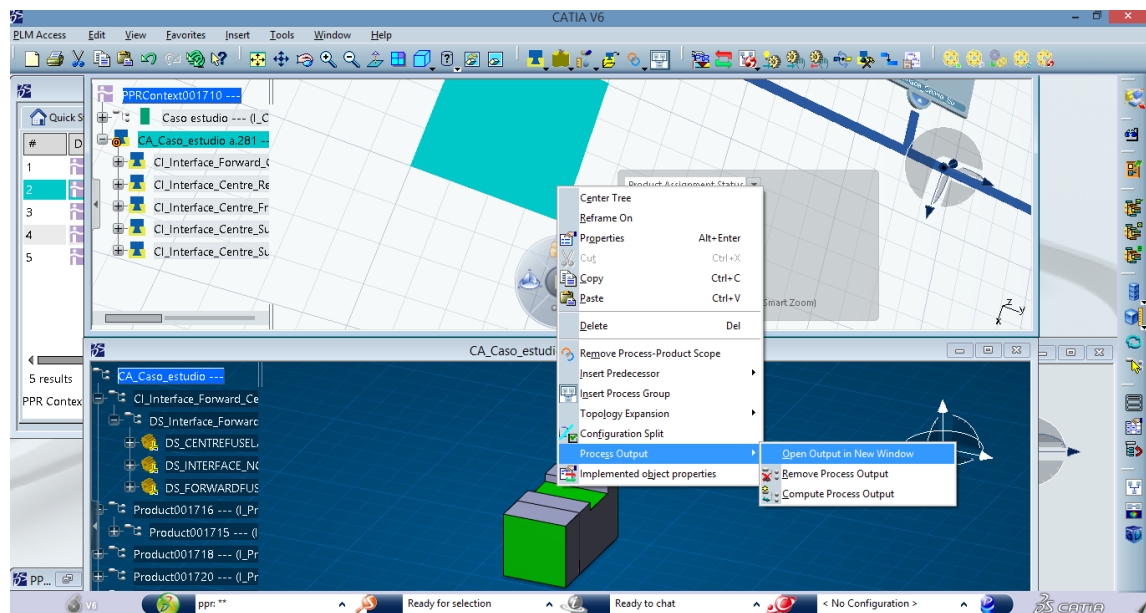


Figura 41. Caso de estudio 1. Generación de la estructura de producto As Planned.

Para construir la estructura de producto As Planned se debe hacer un *Compute Process Output* a cada nodo de *Assembly Process*. No basta con hacérselo al producto raíz porque lo que genera es una capa plana de todos los Parts que constituyen el producto raíz. Tras hacerlo se abre el producto raíz con la orden *Open Output in a New Window* al pinchar sobre el proceso raíz y se renombra todos los Products, que aparecen con nombres por defecto.

El principal problema de este método es que una vez construido el As Planned, cualquier cambio en la estructura As Designed habría que propagarlo manualmente en la nueva estructura As Planned pues son entidades distintas en la base de datos. Esto se vuelve más inestable aun cuando al actualizar el *Compute Process Output* en el primer PPR el producto creado no actualiza el antiguo sino que crea otro producto con otro nombre en la base de datos.

La conclusión es que al igual que ocurría con la reordenación manual del árbol As Designed al haber duplicidad de los elementos y no ser estructuras dependientes una de la otra se deja de tener una sincronización entre la estructura de diseño funcional y la industrialización.

A pesar de lo beneficioso de la asignación visual de CI obligaría a un mantenimiento permanente de ambas

estructuras y a la aparición de efecto *over the wall*.

Caso de estudio 2

Se ha retomado la capacidad del Process Definition de Delmia v6 para la reconciliación indirecta de elementos. Si se tiene en la estructura de producto As Designed un CI del que cuelgan una DS1 y una DS2 y ambas han sido asignadas a un proceso de montaje, el CI de la estructura de producto As Designed es automáticamente asignado indirectamente. Esto quiere decir que aunque el CI no aparezca en la estructura de procesos hay una reconciliación total entre la estructura de producto As Designed y la estructura de procesos, que puesto que no contiene el elemento CI como elemento de entrada, si utilizásemos el *Compute Process Output* no generaría un As Planned propiamente. El resultado sería una cascada de CA con una capa plana de DS1 y DS2.

Esto extendido a los múltiples CI que componen un CA provocaría una capa plana de cientos de DS. Existen diversas consecuencias derivadas de la capa plana DS. Por un lado se pierde la capacidad de identificar qué DS suponen solo un cambio de diseño de cuales son diferentes en su origen. Por ejemplo, si en origen se tiene por un lado una DS1 y una DS2 que pertenecen a un CI1 y por otro una DS3 y una DS4 debajo de un CI2, con la eliminación de los CI lo que queda es una capa con las cuatro DS. Salvo expresa búsqueda del código identificativo, resulta imposible discernir en la estructura qué DS son semejantes.

Otro resultado de eliminar el CI es el problema del control de la efectividad. La suma de todas las efectividades debajo de cada CI sea cual sea siempre suman el mismo número, el total de aviones a fabricar. Sin el CI este control en principio se pierde. Dassault ha propuesto en v6 que la efectividad es un atributo más del producto, que permite filtrar en la estructura y quedarse con el producto configurado. Sin embargo, se desconoce el mecanismo interno de coherencia de las efectividades entre los diversos componentes.

La única relación lógica permisible que mitigara la desaparición del CI debería ser la anteriormente expuesta: que el rango de efectividades atribuido a cada DS que en origen caían bajo el mismo CI sea complementario al resto, de tal manera que la unión de todos estos conjuntos dé el rango completo de los aviones.

Existen iniciativas en proyectos paralelos cuyo objetivo es este asegurar la configurabilidad de los productos. Aunque existen módulos en Enovia v6 como el *Variant Configuration Central* no es el objeto de este proyecto evaluar el impacto metodológico de la configuración en Enovia v6 sobre los elementos de configuración de producto de Airbus. Se recuerda que el modelo propuesto consta únicamente de un único MSN en el que no se le aplican efectividades.

Se ha propuesto como solución al menos al problema de identificar visualmente a los DS correspondientes a los CI el uso del *Process Group*. Solo sirve para agrupar procesos que estén a un mismo nivel simplemente rodeándolos de un cuadrado mayor que los circunscribe, no crea ningún proceso adicional y por tanto no posee la opción de *Compute process Output*. La idea planteada era la de agrupar los DS pertenecientes al mismo CI con un grupo que se llamase como él. El problema es que el grupo engloba no solamente al proceso en sí de montaje que se quiere agrupar sino a todos los procesos previos de cada uno, luego no es una solución válida.

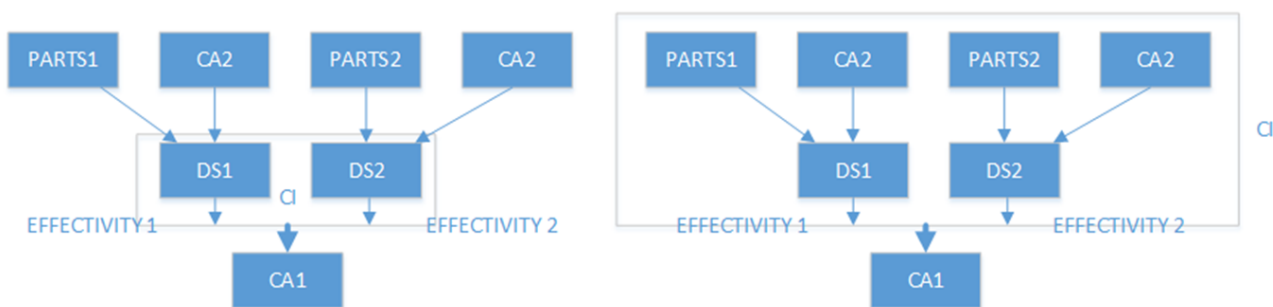


Figura 42. Estructura planteada y estructura permitida por el Process Group.

5.2.4 Creación del As Planned del XDA15.

Tras evaluar las diversas posibilidades del Process Definition de Delmia v6 y las restricciones impuestas por la metodología Airbus, se ha llegado a la siguiente toma de decisiones que han determinado el As Planned para el modelo XDA15:

- El As Planned, a pesar de ser una estructura de producto, se ha implementado en el nodo que llama Catia v6 de procesos. Otras opciones se han descartado:
 - No se ha utilizado las posibilidades y metodologías de Dassault del *Engineering Central* o *Variant Configuration Central* de Enovia v6 de creación y actualización de estructuras y líneas de producto. La razón es porque el impacto es demasiado grande en la metodología Airbus.
 - No se ha creado una estructura de producto adicional en el Entorno Catia/Delmia v6 que sea As Planned, ya sea manualmente reordenando los nodos del As Designed o a través de los mecanismos del *Compute Process Output*, en PPR distintos o bajo un mismo PPR. La causa es la incapacidad de reconciliación y actualización entre estructuras de productos en Delmia/Catia v6 y la duplicidad de elementos en la base de datos.
- Se ha eliminado el nodo CI en la estructura Process Definition. Su reconciliación con el As Designed se ha hecho indirectamente. Tampoco se ha implementado el Process Group para la agrupación de DS. Esta decisión se ha fundamentado principalmente en que no afecta al desarrollo del proyecto y facilita la posterior relación con el árbol de Sistemas. El problema de la gestión de las efectividades y la configuración de producto es eliminado.
- La asignación directa se ha hecho a nivel de DS, es decir, todo aquello que entre como parte o CA que por simplificación de modelo haya constituido una única parte han entrado mediante Provides. Esto refleja el hecho de que el proyecto se centra en la industrialización de una Final Assembly Line (FAL) donde grandes grupos de CA llegan a la FAL completamente integrados. El nombre de los nodos de proceso correspondiente a la capa de DS se ha mantenido como en el As Designed, reflejando que es la misma estructura de producto.
- Como las DS de montaje estaban modelizadas en el As Designed por un único componente de unión, no eran un Product sino Part, compartiendo en el mismo nombre para el nodo padre y el hijo. Para diferenciar el nivel DS del hijo formado por los componentes de unión más los CA correspondientes, se ha mantenido el nombre de Provide que le otorga el programa automáticamente a los componentes de unión. Esto no impacta la estructura, ya que se sigue manteniendo el link entre el Provide y el nodo de la estructura del producto, que es lo que determina la reconciliación.

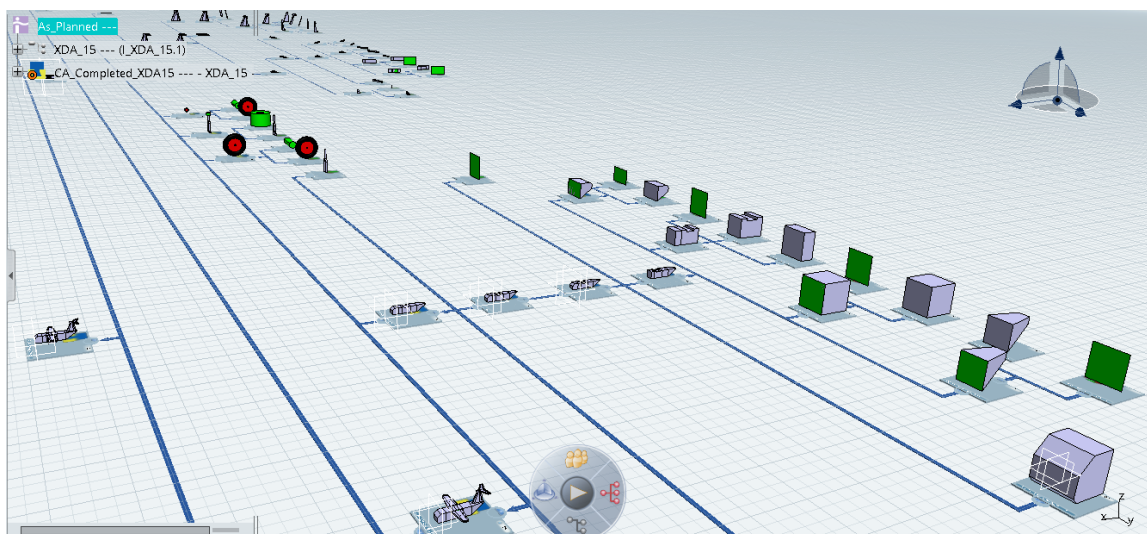


Figura 43. Creación del As Planned del XDA15.

Como se puede ver en la anterior figura, se ha intentado dar la mayor flexibilidad posible al modelo, intentando no secuenciar y por tanto condicionar el montaje puesto que no es el objetivo del As Planned. Se observan las capas planas de CA y CI/DS.

Con esta estructura de producto y procesos existe una limitación: no es posible hacer Scope Links parciales a niveles de CA. Esto es como se ha dicho previamente porque los scopes se atribuyen a un único nodo de producto. Puesto que en un nodo CA de árbol de proceso se incluyen CI cuyos padres son diversos nodos de producto de la vista As Designed, se pierde la capacidad de gestión por scopes en otros subniveles que no sean el producto terminado.

Este tipo de gestión de procesos a través de Scope Links parciales permite hacer paquetes de trabajo con responsabilidad definida, pudiéndose desmembrar el árbol de procesos de tal manera que una vez establecido el reparto industrial, cada centro desarrolle su producto parcial sin intervenir en el proceso de fabricación del resto, definiendo tanto las operaciones y layout de planta como los recursos necesarios de manera independiente, pero obteniendo la visibilidad del proceso de fabricación completo.

Este sistema favorecería entonces la integración de la cadena de suministro en el proceso productivo de la empresa matriz y su colaboración con ella.

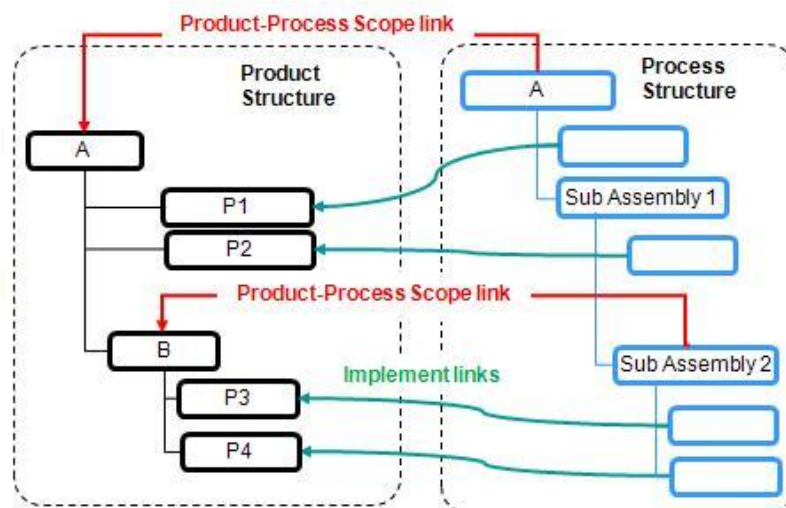


Figura 44. Scope links a niveles inferiores al de producto raíz.

El no tener esta capacidad no afecta al proyecto presente puesto que la mayoría de CA o entran como comprados al exterior a través de Provides, es decir, no se tiene en cuenta la cadena de suministro, o bien son ensamblados internamente. Aun así se ha hecho alguna prueba con el modelo de estudio que demuestra que la capacidad de la gestión por Scope Links parciales es aún limitada. Por ejemplo ocurre que si todos los hijos de un nodo de producto están asignados con scope, da igual si alguno de ellos está incompleto por debajo que el producto raíz aparece como montado. Esta incongruencia en el sistema obliga a desplegar todo el árbol de procesos y detectar dónde el color de la caja de proceso es de proceso incompleto (naranja) en vez de proceso completo (verde).

La solución propuesta a raíz de este análisis es una mejora del Scope Link por parte de Dassault que permita, a golpe de un vistazo tan solo al color de la caja del proceso raíz, averiguar si existe algún fallo en el proceso que hace que el producto raíz esté incompleto.

Por otro lado para la completa reconciliación de proceso y producto ha sido necesario eliminar los nodos del As Designed que se habían creado para posibles ampliaciones del modelo en futuros proyectos pero que se había decidido que no incluyeran producto en este. Esto era por ejemplo la sección 10, la sección 15.1 o la sección 15.2 entre otros.

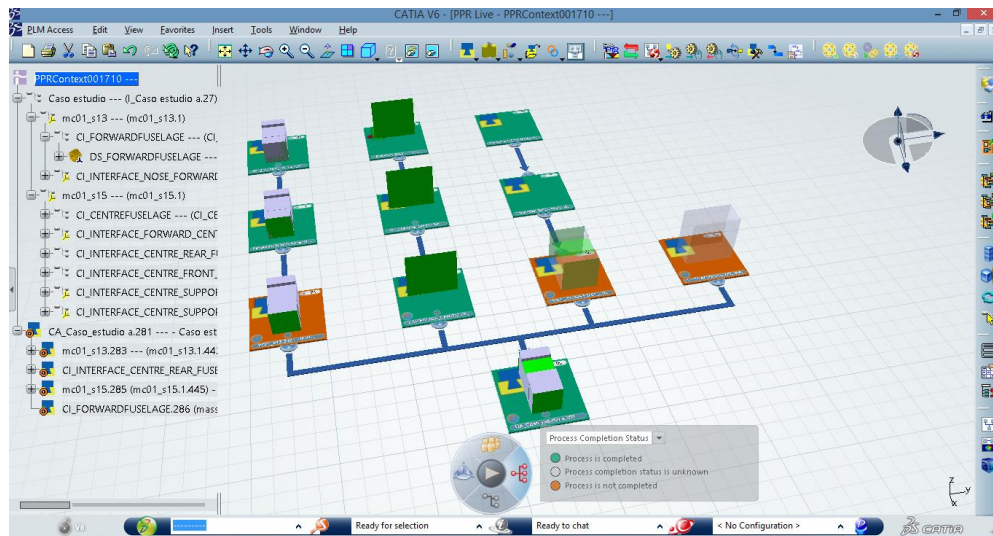


Figura 45. Fallo detectado en la gestión por Scope Link.

La eliminación de los nodos de producto vacíos se ha decidido llevar a cabo en el modelo ya importado a v6 por la facilidad y la reducción de errores ante la manipulación y eliminación de nodos de la estructura de producto que presenta el sistema de base de datos de v6 respecto al sistema de links de v5.

Por último se remarca el impacto del conflicto de naturaleza de CA y CI/LO/DS en la estructura de procesos de Delmia v6. Como se ha dicho anteriormente, en el As Planned no hay ningún proceso de montaje global que defina un CA sino que se define indirectamente a través del montaje de los subconjuntos entre sí. Esto querría decir que en el nodo CA del Process Definition no debería de haber ningún cambio entre el input y el output. Sin embargo, como no se puede hacer asignación indirecta de los CA debido a que no aparecen en la estructura de producto del PPR ha sido obligatorio definir un proceso global de montaje cuyos inputs son las DS y el output es el conjunto CA ya montado, entrando en contradicción con la información que realmente existe en el As Planned.

La solución a esta contradicción sería al igual que ocurría con los Scopes Links el darle mayor flexibilidad al Process Definition, ya sea permitiendo incluir nodos informativos que no monten nada o bien Scopes Links a cualquier combinación de nodos de producto (por ejemplo a todos los que contenga un CA, luego automáticamente se estaría asignando el mismo) y no solamente a un único nodo del árbol de producto.

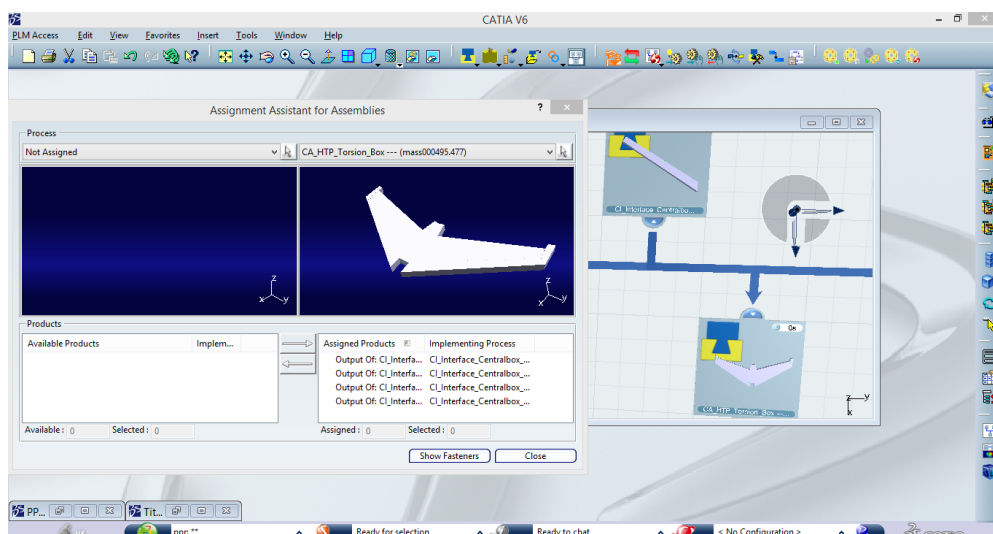


Figura 46. Defecto del Process Definition. Información de montaje residente en CA y no en cada CI.

En conclusión, el As Planned metodológicamente tiene mucho que mejorar y además su integración en Catia v6 se vuelve trabajosa e inestable precisamente en los puntos en los que flaquea la metodología, la interacción del CA con los CI/LO/DS.

5.3 As Prepared

La industrialización del XDA15 supone el caso de estudio con el que se quiere demostrar el grado de implementación de una maqueta digital industrial iDMU en el entorno v6. Es en el As Prepared donde de verdad se tiene una mayor ganancia respecto a lo implementado en los PLM de generación anterior.

En el diseño industrial del XDA15 se trata de tocar aunque sea someramente todos los puntos de desarrollo de un Build Process. Además se ha decidido dividir en dos partes. Por un lado el estudio de los procesos de montaje y tiempos de operación y por otro el diseño de los recursos. Esta división es debida a que la definición de los procesos y operaciones de montaje y de los recursos se llevan a cabo en módulos distintos del Delmia v6. El proceso se define con el módulo Manufacturing System Definition y por otro lado los recursos con el Resources Definition and Layout.

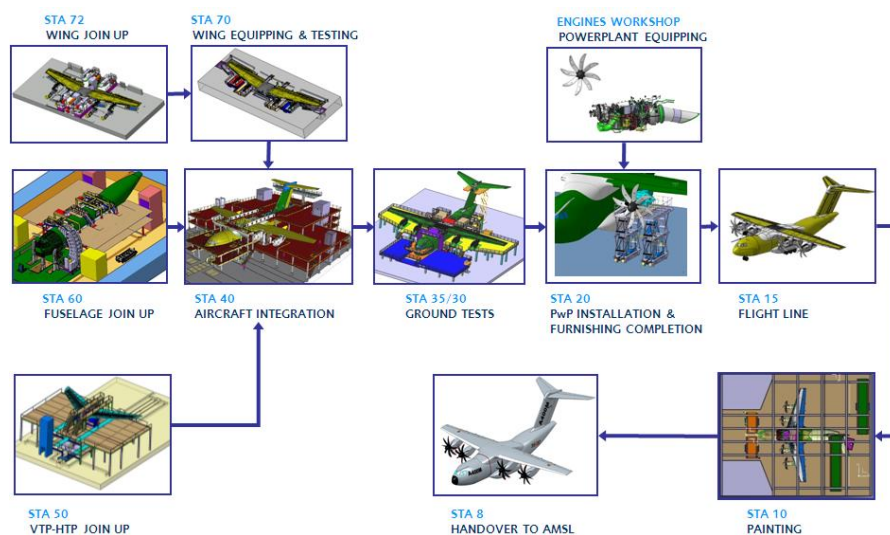


Figura 47. Ejemplo de Build Process [17].

5.3.1 El entorno Delmia v6. Manufacturing System Definition.

Dassault propone para la creación de la red de procesos de fabricación el módulo Manufacturing System Definition. En él se puede crear y editar el nodo S dentro de una estructura PPRS.

Los sistemas son aquí entidades abstractas, que sirven como agrupación de un mismo tipo de operaciones. Un sistema puede contener otros subsistemas de tal manera que las operaciones se pueden categorizar por bloques, facilitando la modularidad. Los sistemas inherentes a este módulo son el *General System*, que es el más ampliamente usado y al que se le puede insertar cualquier tipo de subsistema u operación y el *Transformation System*, que se usa para procesos en los que no existe aporte de material a la operación, solo un tratamiento que transforma el ya existente.

Sin embargo, este módulo además posee la capacidad de modelar otros sistemas que si se tiene instalado el módulo de eventos finitos (antiguamente en v5 era el conocido como QUEST, que ahora está integrado en v6) permiten analizar fenómenos de cola en una línea. Por ello existen otros sistemas como son el *Buffer*, el *Transfer*, el *Sink* o el *Source System*.

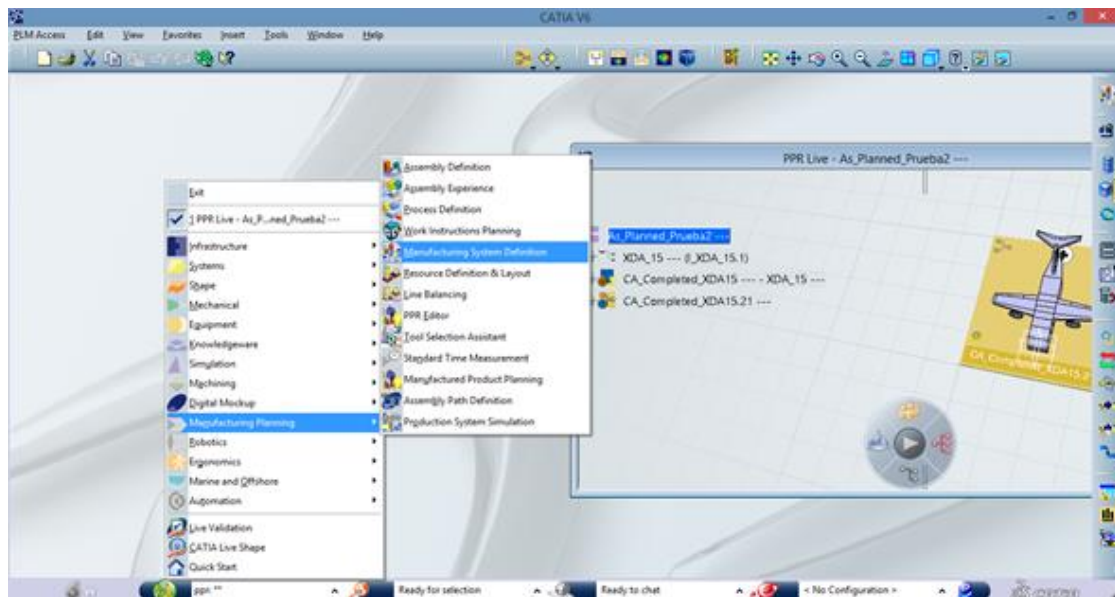


Figura 48. Entorno Delmia v6. Manufacturing System Definition.

El estudio de la optimización dinámica de una línea mediante un optimizador de eventos discretos queda fuera del alcance del proyecto. Ocurre lo mismo con fenómenos como el tratamiento térmico o mecánico de piezas, por lo que solo se considerará el General System a la hora de modelar las operaciones.

En cuanto a las operaciones que están disponibles se encuentran las *General Operation*, que permiten incluir dentro todo tipo de otras operaciones como son *Point fastening operation*, *Curve fastening operation*, *Loading operation*, *Unloading operation*, *Transfer operation* y *Remove material operation*. Puesto que en el proyecto solo se está considerando procesos de ensamblaje y no de eliminación de material y no se está modelando el uso de fasteners, solo se necesita la *General Operation* para representar el proceso de montaje y las *Loading Operation* para representar la recepción de material.



Figura 49. Tipos de Sistema y de Operación.

Un aspecto importante de este módulo es la alta flexibilidad de la red de procesos, al contrario del modelo excesivamente rígido del Process Definition. Al igual que ocurría en el anterior, lo primero que te pide el programa es que le hagas un Scope Link, esta vez entre un sistema raíz y un proceso. Sin embargo, esta relación no es biunívoca como ocurría en Scope Proceso-Producto del Process Definition. Aquí varios sistemas pueden tener como Scope Link el mismo proceso, reflejando la posibilidad de diversas formas de industrialización de un mismo producto.

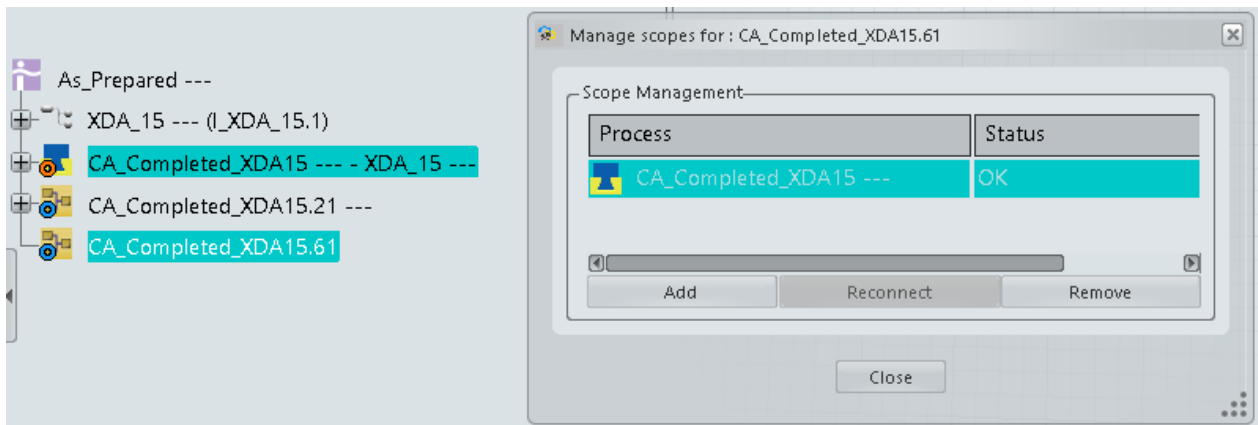


Figura 50. Ejemplo de dos sistemas con Scope Link al mismo nodo de procesos.

Otra diferencia respecto al anterior módulo es el tipo de asignaciones entre los sistemas y los procesos. En este no existe la posibilidad de asignaciones directas, indirectas o con Scope, sino que cada link entre sistema y proceso se establece de forma independiente. Esto es debido al alto grado de libertad con el que está planteada la arquitectura del módulo.

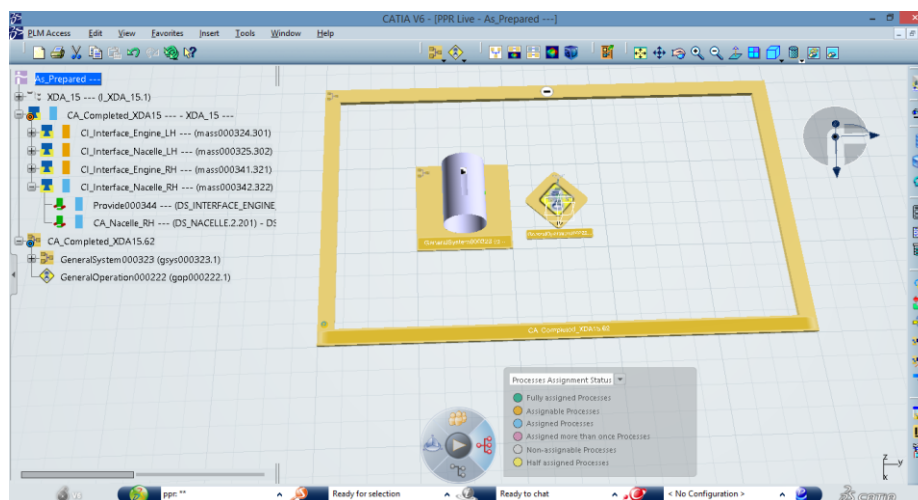


Figura 51. Código de colores y simbología del Manufacturing System Definition.

Al igual que ocurría en el Process Definition existen varios métodos para asignar procesos con sistemas. Lo primero que hay que conocer es que los sistemas no son más que formas de organizar las operaciones, pero no son responsables de la asignación de los procesos al sistema, la información de asignación reside en las operaciones.

Esto se puede ver por ejemplo en el método de asignación del *Drag & Drop* del proceso al sistema. El automáticamente crea además un *Loading Operation* de los inputs del proceso (que a su vez aparecen como *Provides* en la estructura de procesos) y un *General Operation* que modela el proceso de ensamblaje que te saca el output del proceso. Es en estas operaciones donde se tiene asignado el proceso.

Otro método de asignación es con el *Assignment Panel*. Al igual que en el caso anterior es necesaria la presencia de operaciones a las que se le asigna los procesos. Sin embargo en este caso no se crean automáticamente operaciones para el proceso. Si no se crea previamente de manera manual una operación dentro de un sistema, el programa no te deja asignar ningún proceso al sistema. Es necesario por tanto crear tanto una *General Operation* y seleccionar el proceso que quieres asignarle.

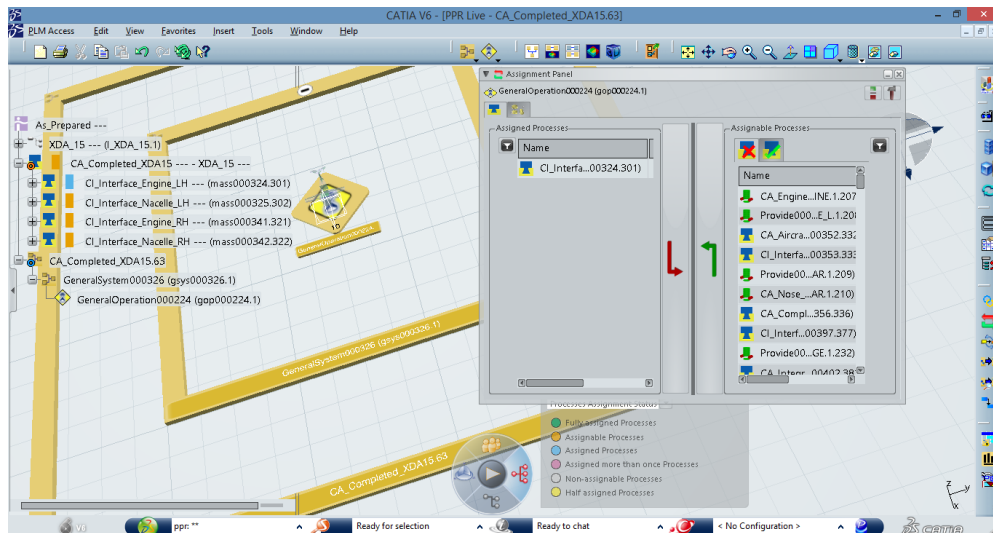


Figura 52. Manufacturing System Definition. Assignment Panel.

Por último se tiene el *System Assignment Assistant*. Esta herramienta permite ver gráficamente qué partes del producto se van a montar según las operaciones definidas en el Manufacturing System. Tiene un punto positivo y es que puedes ver directamente sobre el producto el impacto de tu industrialización, sin embargo al no tener un link directo sistema-producto y tener que pasar antes por el link de procesos, comienza a ser muy enrevesada la asignación visual.

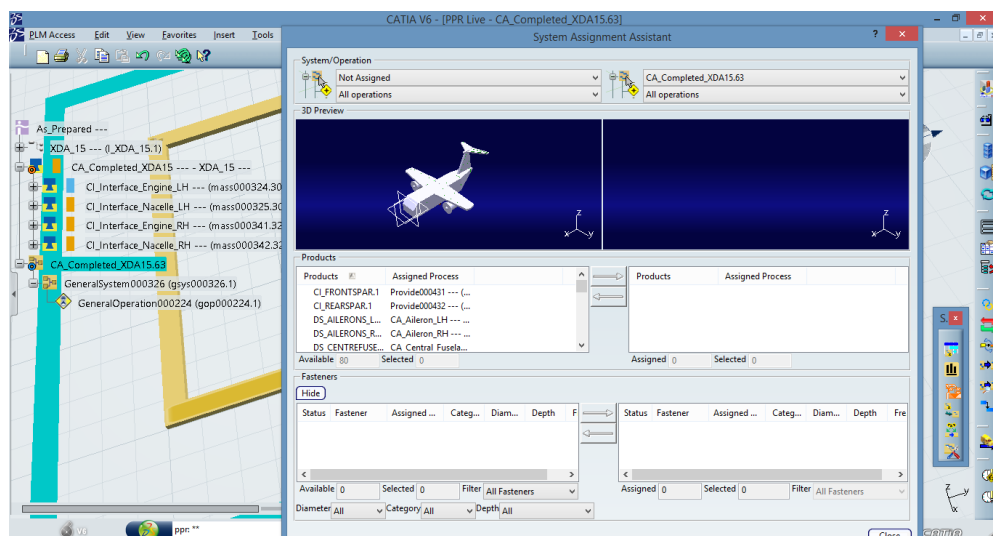


Figura 53. Manufacturing System Definition. System Assignment Assistant.

Por último se observa que el Manufacturing System Definition tiene integrado un optimizador de la distribución de las operaciones, el cual no es objeto de estudio en este proyecto.

5.3.2 Implantación de la metodología As Prepared en Delmia v6.

En los sistemas PLM de generación anterior, la metodología As Prepared se ha intentado implementar a través de una mezcla entre un ERP, encargado de suministrar la información de los procesos a producción y Delmia v5, donde reside la red de procesos. La arquitectura radicalmente distinta de ambos sistemas ha provocado que las precedencias entre los procesos se pierdan al trasvasar información de un sistema a otro.

La ganancia potencial con Delmia v6 es que todo está integrado en un mismo sistema. En este caso v6 no tiene tantos problemas a la hora de amoldar la metodología del As Prepared en el programa respecto al As Planned. El programa está pensado para ser una red de procesos altamente configurable y personalizable, solo queda estructurarlo de tal forma que los conceptos y terminología se adecuen.

La primera decisión que se ha tomado ha sido la de mantener la Golden Rule número 2: 1DS-1Ruta-1WO. Esta expresión es equivalente a decir que para cada Design Solution tengo una respuesta de fabricación mediante la Manufacturing Solution. Esto quiere decir que si se tiene que montar 3 DS para formar un CA no voy a tener un único proceso para montar las 3 sino que para cada DS tendré una documentación de taller independiente. El objetivo de esto es mantener la granularidad a nivel de DS también a la hora de fabricar, favoreciendo la trazabilidad y el análisis del avance de la obra en curso.

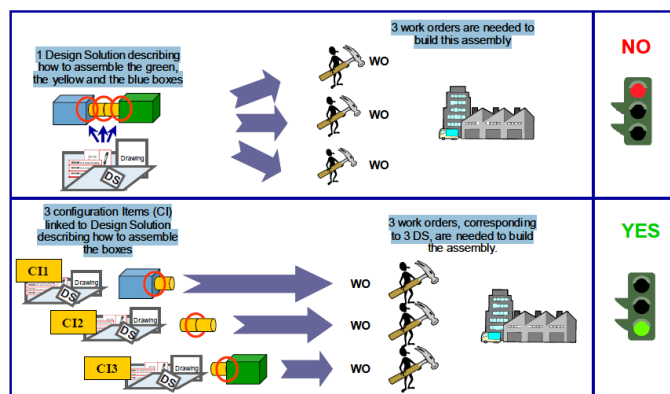


Figura 54. Ilustración de la Golden Rule 2 [15].

Es por esta razón la recomendación de la Golden Rule 2 de que la MS no dure nunca más de un turno de trabajo de tal manera que un operario pueda haber completado su trabajo antes de terminar un turno y el siguiente no tenga que continuarlo. Esto no ocurre siempre así y aunque se ha intentado dividir antiguas DS que se hacían demasiado largas en varias DS más pequeñas a menudo duran más de un turno completo.

Se ha intentado además modelar la MS como un sistema en vez de como una *General Operation* que contuviese muchas otras operaciones. La explicación radica en que facilita el tratar como un bloque a la MS a la hora de hacer la planificación del ciclo de fabricación del producto, ya que el programa permite hacer fácilmente optimizaciones a niveles de sistema. Además los sistemas tienen una capacidad de visualización ligera que ayuda a trazar visualmente el flujo del producto.

El equivalente al nodo CA en procesos ha sido modelado con un sistema de nombre *Assembly, Integration o Installation*.

Estas han sido las únicas restricciones a tener en cuenta en cuanto a normativa al modelar el proceso de industrialización, puesto que como anteriormente se ha comentado es un proceso con un amplio grado de libertad.

En cuanto a simplificaciones en el modelo, debido al gran número de DS y por tanto de MS presentes en el XDA15 se ha decidido reducir al máximo la información de montaje. En una documentación de taller real aparecen numerosas operaciones: de mecanizado, posicionamiento, verificación de dimensiones, etc. Este módulo permite sin problemas dentro de las operaciones meter suboperaciones o tareas que discretizan en muchos pasos la solución de fabricación. El módulo de Manufacturing System Definition tiene también la capacidad de almacenar en catálogos operaciones que en muchos procesos suelen estar estandarizadas. En el caso de estudio propuesto solamente se ha considerado una operación de carga para cada elemento presente en el montaje y una operación general que lo representa.

Existen otros proyectos de Airbus en los que se ha buscado otra serie de objetivos con v6 como era la reutilización de información y en los que se ha investigado el uso de operaciones estándar, en cada una de las cuales están guardados datos como los útiles y herramientas necesarios, el tiempo de ejecución, etc.

Ante este impacto se ha valorado dos opciones. O bien como pide el programa establecer toda la información industrialización del CA en el nodo sistema CA a través de la General Operation que se genera e ir en contra de la metodología o bien ir en contra del mismo, generar la información para cada DS en cada nodo MS y mitigar el efecto de la operación estableciéndole un tiempo de ejecución de un orden muy inferior al del resto de operaciones. Se ha decidido tomar esta segunda decisión debido a que mantiene la metodología Airbus prevaleciendo sobre la arquitectura de datos del programa.

Para el caso de estudio, se ha creado como se ve en la figura cuatro MS que ensamblan las cuatro DS contenidas en el CA. Al asignar cada DS automáticamente se han creado *Loading Operations* para las recepciones y *General Operation* para cada proceso de montaje. Se puede ver el efecto en la planificación de tales automatismos, tanto a bajo como a alto nivel a través de la herramienta del módulo *Manufacturing System Gantt*.

En ella se puede observar la distribución de las operaciones en el tiempo, además es aquí donde se pueden establecer las precedencias de bajo nivel, teniendo diferentes tipos de precedencia: start-start, finish-finish, finish-start, decalaje en el tiempo, etc.

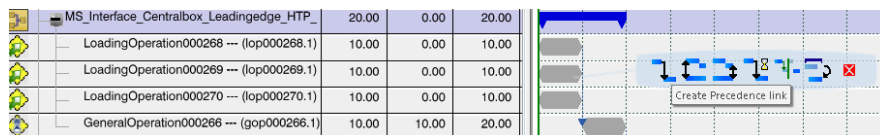


Figura 57. Tipos de precedencias entre operaciones.

El programa considera por defecto una serie de hipótesis ante la ausencia de mayores restricciones para hacer el plan:

- Todos los sistemas, si no tienen relación entre sí, comienzan en $t=0$ y por tanto en paralelo.
- Todas las operaciones tienen por defecto una duración de 10 segundos, modificables en el mismo Gantt.
- Coloca una restricción automática entre la operación de carga de material y la operación de ensamblaje, que representa la lógica de que para poder montar algo primero tiene que llegar lo que se va a montar.
- La operación de montaje general asignada al CA tiene una precedencia de que todos los submontajes precedentes deben de estar terminados para poder iniciarla.

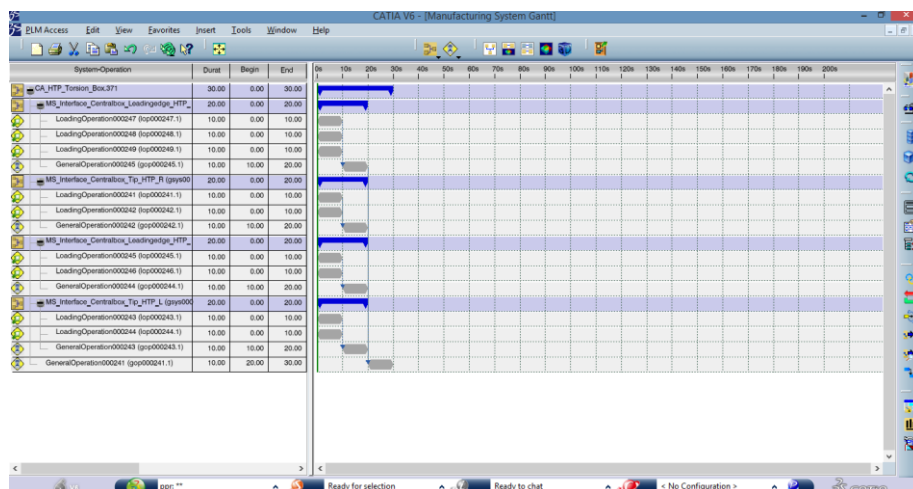


Figura 58. Manufacturing System Definition. Manufacturing System Gantt.

Por otro lado, existe otra herramienta para establecer precedencias entre sistemas, el *Product Flow*. Con él se modela cómo va avanzando un producto semiterminado, al que en cada sistema se le montan más componentes hasta terminarlo. Se establecen por tanto precedencias técnicas en un nivel más alto, a nivel de qué conjuntos se deben montar antes o después. Aplicando además la mitigación introduciendo como la duración de la operación asociada al CA de por ejemplo 0.1s, queda un plan como la siguiente figura.

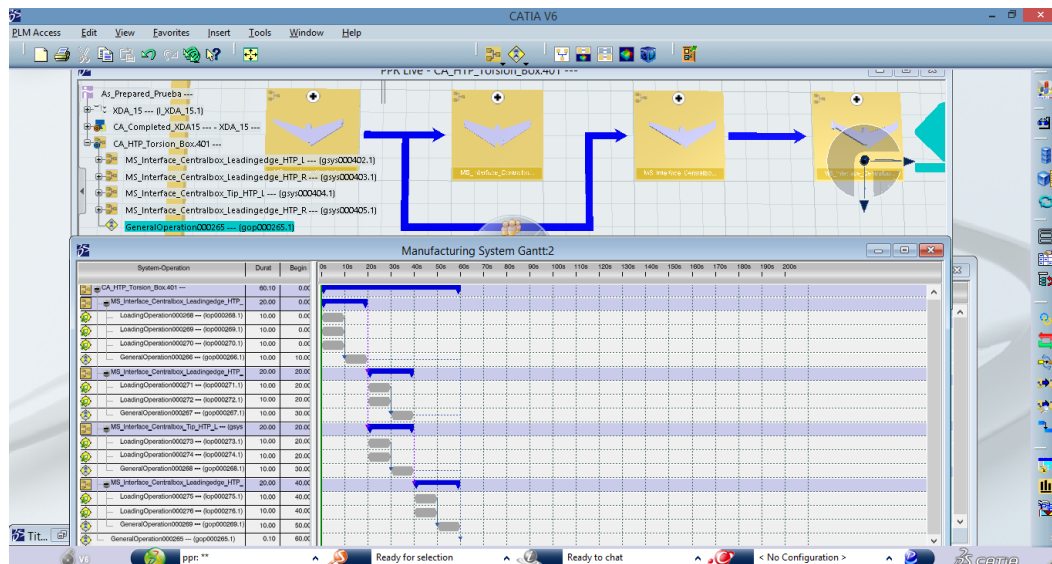


Figura 59. Efecto del Product Flow en el Manufacturing Gant

El principal problema de utilizar el *Product Flow* como herramienta para crear precedencias entre MS es que no permite el decalaje en el tiempo entre MS sino solo precedencias de final-comienzo. Si se quisiese hacer habría que recurrir a establecer precedencias entre operaciones pertenecientes a diferentes MS.

Esto sin embargo no debe ocurrir en una industrialización. Tal y como se describe en la metodología, una MS debe dar una respuesta industrial completa al requerimiento funcional de una única DS. La MS no puede dar respuesta industrial a requerimientos funcionales de otras DS que no sean la suya.

Una vez extraída una metodología de trabajo del caso de estudio anterior, se ha extrapolado a la industrialización del XDA15 al completo.

Se ha intentado reducir al máximo la complejidad del modelo completo. Para el XDA15 el alcance solo ha sido el de establecer según la metodología As Prepared una red de procesos que monte según el As Planned el avión completo. Se han establecido las siguientes hipótesis:

- Irrelevancia del grado de saturación de las estaciones. No se ha determinado el número de estaciones en función del Takt Time acordado o el tiempo de ciclo del producto, es decir no se ha hecho un estudio de eficiencia de la línea.
- El tiempo de las operaciones es el mismo para todas, el standard de 10 segundos.
- Las únicas precedencias a nivel de operación son las creadas automáticamente entre las *Loading* y las *General Operations*.
- Las operaciones asignadas a los CA se han mitigado dándole una duración de 0.1s.

Se ha decidido crear tres estaciones PreFAL de montaje de grandes aerestructuras: fuselaje, alas y estabilizadores, después dos estaciones intermedias de integración y equipado de ala y empenaje y finalmente una estación integradora de avión y una final para la instalación de los motores. Cada estación es representada por un sistema. La estrategia de seguir esta distribución ha sido por la de dar continuidad a la idea general de distribución de los montajes planteada por el As Planned, informando más detalladamente a través de las MS

el proceso de ensamblaje.

Las 3 estaciones PreFAL con sus respectivas estaciones intermedias de integración trabajan en paralelo, pero forman a su vez globalmente una estructura secuencial con respecto a las estaciones FAL.

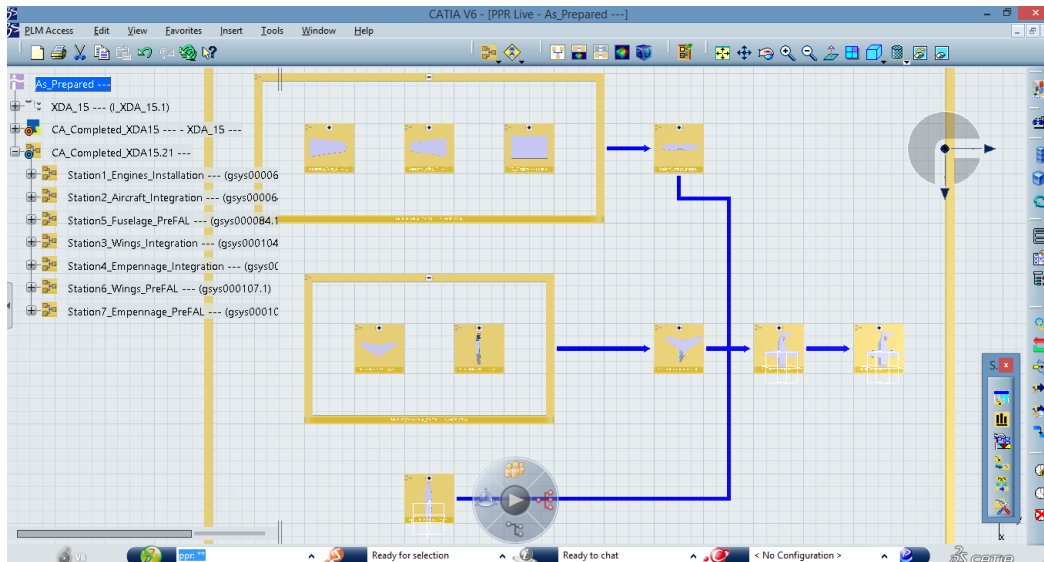


Figura 60. As Prepared XDA15. Distribución de estaciones y flujo de producto.

Pasando a nivel de estación, en cada una se ha seguido diferentes tipologías de montaje, en algunos casos los componentes son ensamblados en serie, es decir, el producto iría pasando por cada puesto de la estación donde se le añade algún componente nuevo. En otros se ha decidido que se monta en un único puesto todos los componentes en paralelo.

En el caso del ala o el HTP puesto que todos los componentes se unen alrededor de un cajón central, se ha decidido aplicar las MS en paralelo. Esto quiere decir que por ejemplo en el ala en vez de montársele primero el flap, después el slat, después el alerón, se ha dejado completamente libertad de secuenciación. El programa si no se establece ninguna relación ejecuta las operaciones en paralelo. La viabilidad tecnológica de esta simultaneidad viene demostrada posteriormente a través de la validación del conjunto del entorno industrial una vez definidos los recursos.

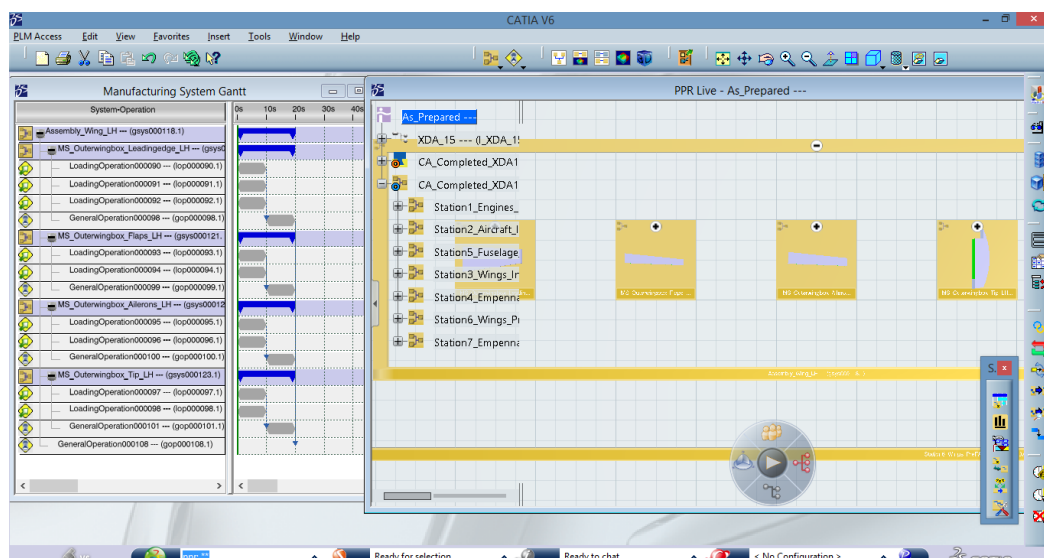


Figura 61. Secuencia de montaje de Ala.

La única condición que se debe cumplir es que la operación de recepción de material del cajón y de la parte a ensamblar sobre él debe ocurrir antes que la operación de montaje asociada. Este tipo de relaciones con operaciones dentro de MS previas son a veces inevitables, pero la metodología busca reducirlas al máximo.

En el caso del fuselaje se ha decidido que las MS se vayan montando en serie en diferentes puestos. El fuselaje central se une al delantero primero, después al conjunto se le suma el trasero y por último se monta el cono de cola.

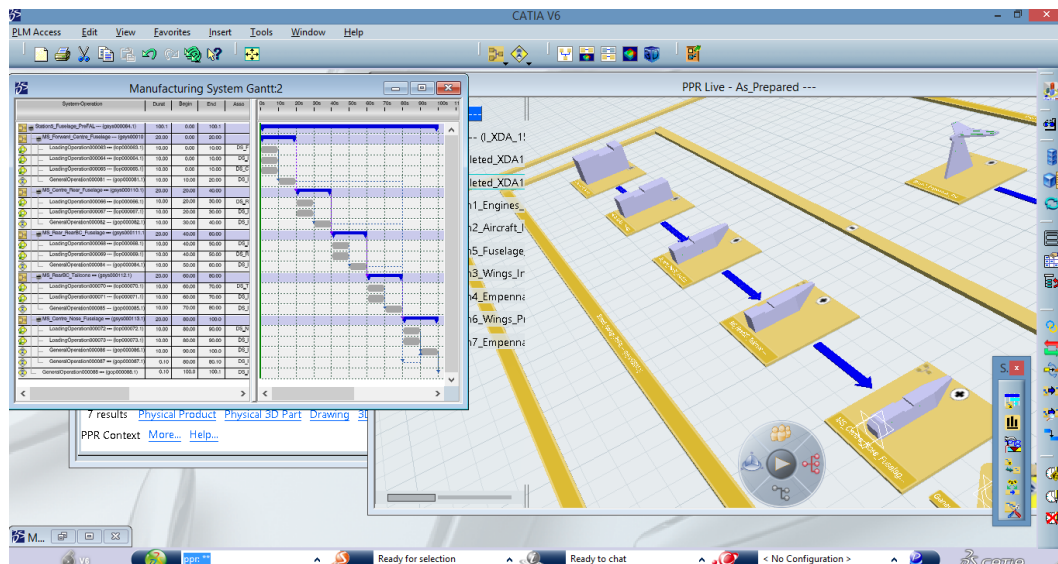


Figura 62. Secuencia de montaje de fuselaje.

Se observan las limitaciones del Product Flow para planificar cosas más complejas. Por ejemplo si se quisiera adelantar la recepción de material de la segunda MS a mientras se está ensamblando la primera para no tener que esperar las piezas en el segundo montaje, no se puede decalar con el Product Flow ambos sistemas. Para decalarlo, se tendría que eliminar el Product Flow entre ambos sistemas y habría que establecer una precedencia a nivel de operación entre la *Loading operation* del segundo montaje y la *General Operation* del primero del tipo Finish-Finish.

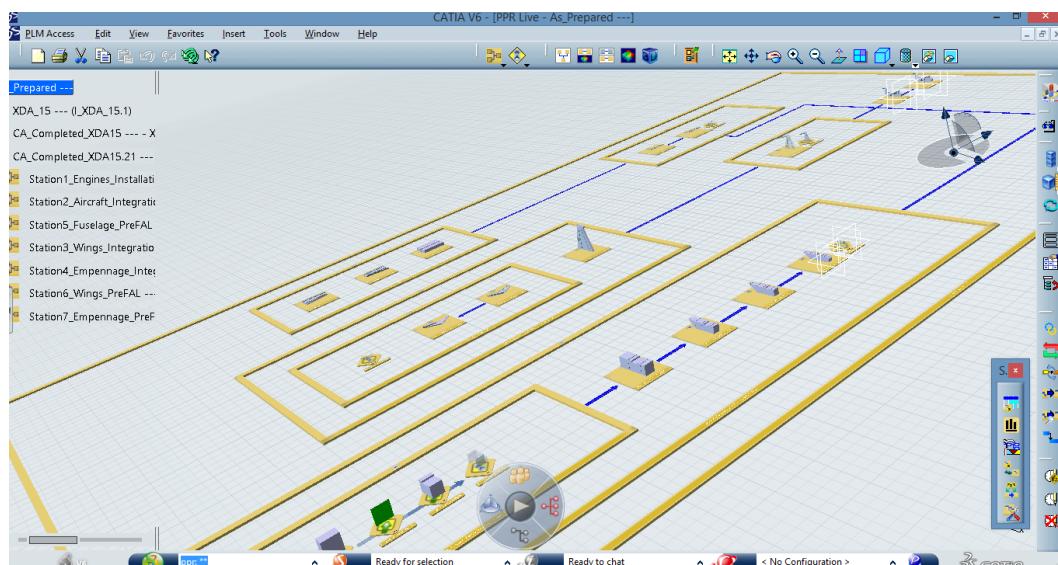


Figura 63. Proceso de industrialización del XDA15.

Haciendo lo mismo para el resto de estaciones se llega a establecer un Process Plan, preliminar a falta del estudio de los recursos para completarlo. En él se debe evaluar al recurso verificando que es capaz de abordar los procesos previstos en tiempo, coste y calidad.

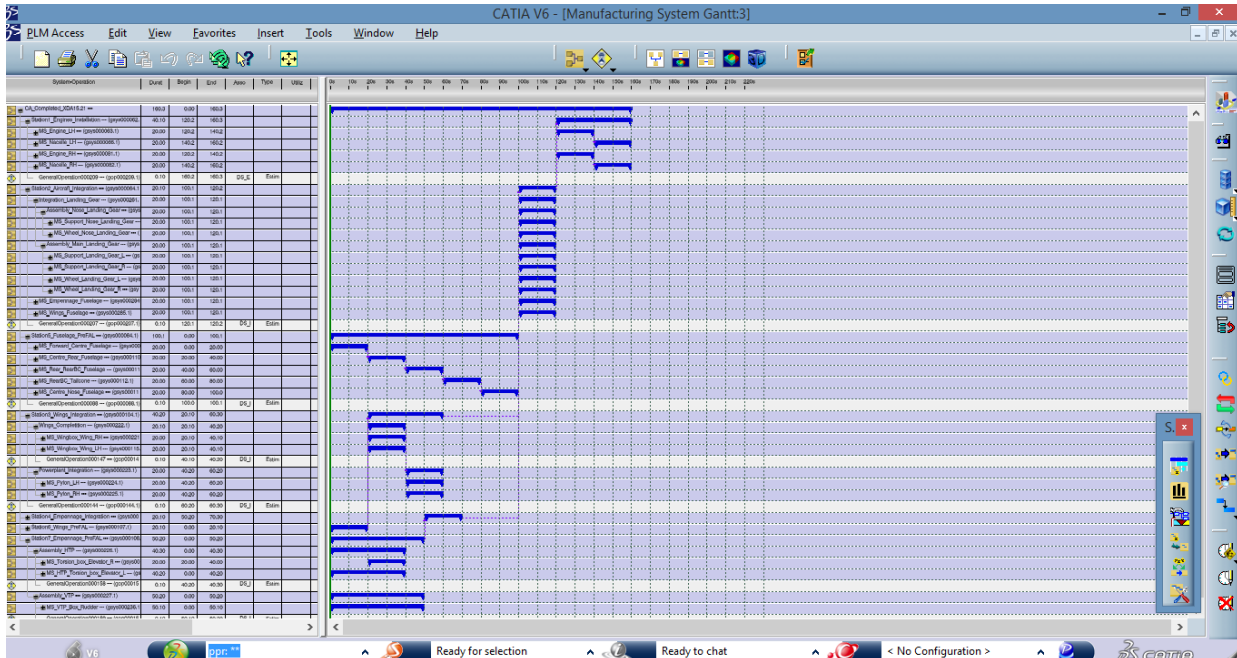


Figura 64. Manufacturing Gantt del XDA15 sin considerar recursos.

En conclusión, el diseño de los procesos en Catia v6 no permite implementar totalmente la metodología As Prepared principalmente porque abarca muchos conceptos de una manera desorganizada e incompleta, afectándole además las deficiencias encontradas en el As Planned.

5.3.4 Validación preliminar del Process Plan.

El Manufacturing System Definition permite simular el proceso de montaje solo teniendo en cuenta el producto y el proceso de fabricación. Es el conocido como *Product Build Up*. Supone la traducción del Gantt de fabricación a un código de colores aplicado sobre el dibujo en 3D del producto. De esta manera se puede saber si hay algún elemento que no se ha montado durante el proceso de fabricación, si hay un orden ilógico en el montaje etc. A esta herramienta de simulación de procesos se accede de varias formas.

Una forma es marcando el nodo raíz de sistema y dándole al botón central Play del compás. Esto compila las operaciones y las va ejecutando sobre el modelo. En esta simulación no se busca tener una simulación del entorno industrial completo, solo del avance de la fabricación en cada sistema.

El código de colores va diciendo cómo está el estado de las piezas que le tienen que llegar a cada sistema, si ya han sido fabricadas y ensambladas en algún proceso anterior, si se están ensamblando en ese momento o si no se han ensamblado en el proceso y debería de haberse hecho.

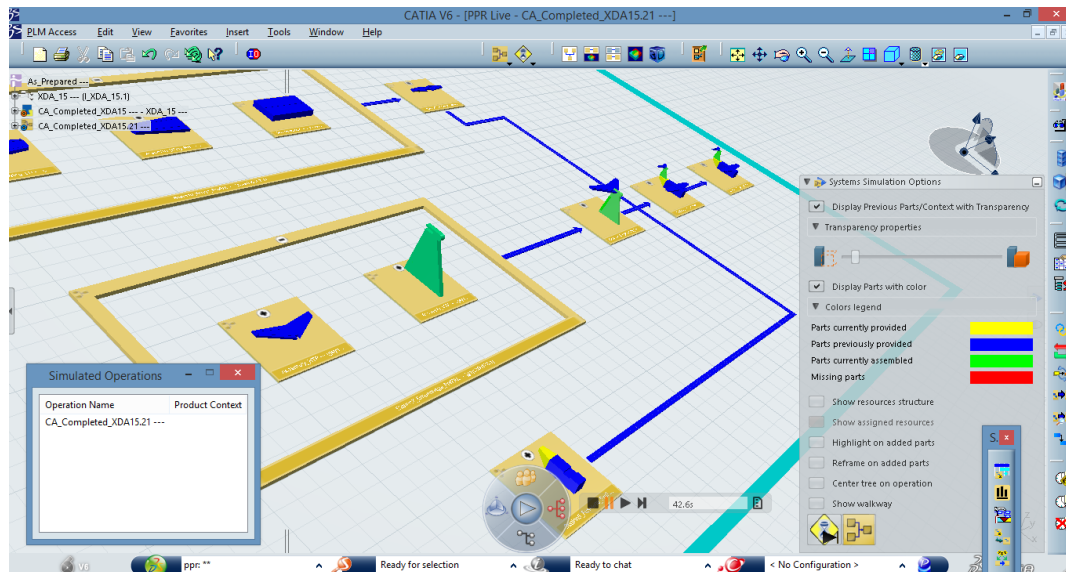


Figura 65. Manufacturing System Definition. System Simulation.

La herramienta dispone de múltiples opciones. Te puede mostrar en transparente partes que faltan en el proceso, permite mostrar una visión conjunta del recurso asociado al sistema para identificar si hay algún recurso que no ha sido utilizado, permite grabar en video la simulación obtenida, genera listas con las operaciones ejecutadas.

En teoría además permite elegir el nivel al que simular, puede quedarse a nivel de operaciones o simular sistema por sistema aquellos que se deseen simular. Sin embargo, por algún motivo no identificado durante el proyecto, da igual la opción que escojas que siempre simula el sistema raíz al completo. Además sería conveniente que en vez de mostrar en cada sistema toda la traza de las piezas que se están montando en los anteriores, que solo aparecieran piezas en el momento en el que se empezaran a ejecutar operaciones pertenecientes al mismo.

Otra forma de acceder a la simulación de los procesos es con el módulo *Assembly Path Definition*. Este módulo en realidad de por sí no contiene nada salvo el link a un entorno, el *Live Simulation*. Esto quiere decir que en sí el *Live simulation* no es ningún workbench, es un entorno de simulación de toda la información del PPR. Por tanto, en función de lo que se quiera simular, habrá diferentes entradas desde los diferentes workbenches a este entorno.

Como entorno único de simulación, es aquí donde se pueden hacer análisis de ergonomía de trabajadores, estudio de lógicas programables para los recursos robotizados, o en el caso anterior la simulación temporal del avance de los procesos de fabricación. En este caso ya no aparecen los sistemas sino que está pensado para ver el conjunto completo del PPR, es decir para ver el entorno industrial completo, reflejando como los recursos transforman al producto según los procesos de fabricación. Como en este caso aún no se tienen disponibilidad de la información ni del diseño de los recursos ni de las trayectorias que siguen los productos y los recursos dentro de la factoría, lo único que muestra es el avión con todas sus partes en su posición de diseño y cómo van cambiando de color.

Un defecto de la simulación preliminar de esta forma es que al no tener partido el producto como ocurría en los sistemas aparecen incongruencias, como que el empenaje se está montando sobre la nada. Esto ocurre evidentemente porque en ese instante en la preFAL del empenaje se está montando por un lado el VTP pero en la preFAL de fuselaje aún no está montado la parte trasera del mismo.

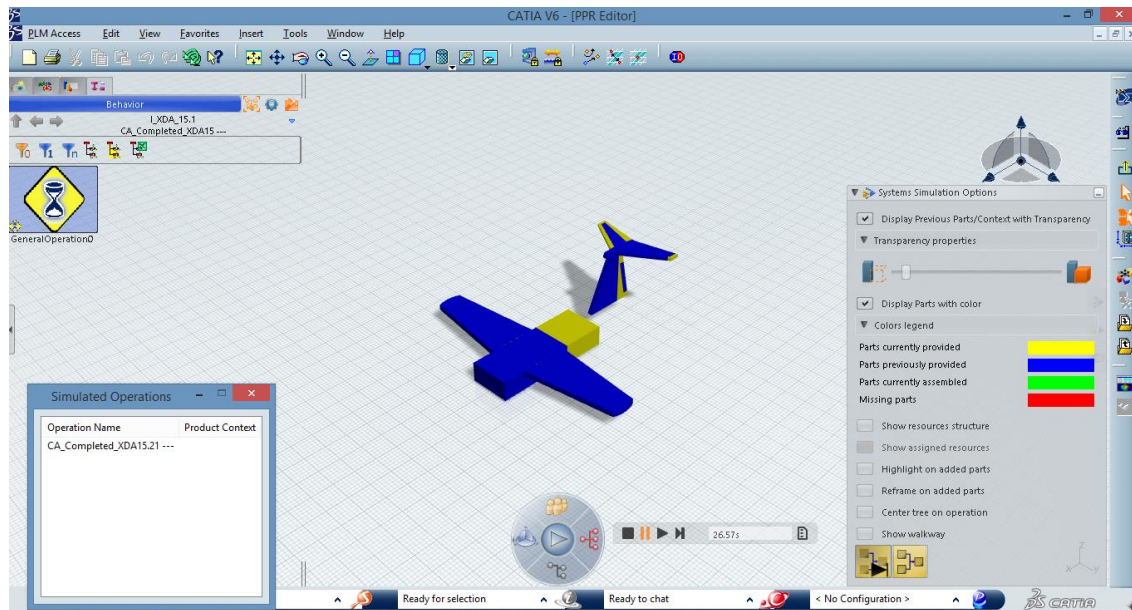


Figura 66. Assembly Path Definition. Systems Simulation.

Se retomará otra vez el estudio de este entorno de simulación como medio para validar el entorno industrial al completo del XDA15, cerrando con esto el alcance del proyecto.

5.3.5 Entorno Delmia v6. Resource Definition and Layout. Implantación de la metodología As Prepared en Delmia v6.

El primer paso es saber dónde y cómo diseñar los recursos. Si para los procesos se tenía un módulo de System Definition, parece obvio que los recursos se diseñarían en el módulo de Resource Definition and Layout. Sin embargo Dassault trabaja con la política de que el recurso es una caja negra que viene ya diseñada, por lo que en este módulo lo único que se va a hacer es definir el tipo de recurso que se está considerando, introducir el nodo de producto en el que se ha diseñado, convirtiéndolo a partir de ahora en recurso y posicionarlo en la iDMU. El diseño del recurso se hace en los módulos de diseño como si de un producto más se tratase.

Esto va en contra del diseño colaborativo. Lo lógico para la práctica colaborativa sería diseñar el recurso simultáneamente junto con el producto en una misma pantalla, pudiendo posicionarse entre ellos, medir interferencias, etc.

Si se echa un vistazo a las metodologías de diseño de recursos propuestas por Airbus, se ve que este problema era ya existente en v5. La metodología actual expuesta en el anterior capítulo describe que hay que crearse una sesión específica de diseño como *workaround* en la que meter manualmente los nodos de producto que interesan junto con la parte del entorno que se haya identificado como representativa a la hora de impactar en el diseño y un *skeleton* de geometría base sobre la que diseñar el recurso.

En el caso de Catia v6 se ha identificado dos posibles *workarounds* para poder diseñar los recursos en contexto con el producto. Una posibilidad es utilizar un proceso similar a lo que ocurría a v5, se puede crear una sesión de diseño de producto donde se cuelguen un nodo de producto y otro nodo donde se va a diseñar el recurso. De esta manera, el recurso se diseña en contexto con el producto. Posteriormente se recupera de la base de datos únicamente el nodo de recurso generado del recurso y se introduce directamente en el Resource Definition and Layout.

Otra posibilidad es que aunque en sí este módulo no permite diseño, si se inserta un nodo de producto previamente creado y guardado en la base de datos pero vacío y se convierte a un recurso en el árbol PPR, es posible entrar en su diseño sin salirse del módulo y por lo tanto es posible interactuar con todos los elementos que contenga el PPR para su diseño. Es decir, que si Dassault permitiese eliminar este *workaround* y directamente poder crear y diseñar un recurso en el módulo, claramente sería posible con él el diseño de un

entorno industrial completo. Esta oportunidad de mejora identificada debería de ser pues un requerimiento para Dassault en las próximas versiones que se lancen de Catia v6.

En el caso del XDA15 se ha seguido una mezcla de ambos, en algunas ocasiones para crear el recurso se ha creado una sesión a parte de diseño junto con el producto, por ejemplo para tomar mediciones, y en otras se han modificado recursos ya existentes en el Resource Definition and Layout al observar su interacción con el producto.

Como introducción al módulo decir que su principal función es posicionar y clasificar los recursos. Todas las herramientas presentes en él tienen como objetivo o una u otra. El programa hace una clasificación bastante diferente a la planteada en la discusión de la introducción a los recursos. El programa clasifica a los recursos en función del rol mayor o menor activo que tienen en el entorno productivo.



Figura 67. Resource Definition and Layout. Tipos de recursos.

La barra de herramienta divide a los recursos en tres grandes grupos. Respectivamente:

- Recursos *Where*. Definen dónde se producen las operaciones, ya sea los recursos de la planta, ya sea de manera abstracta (*Organizational*) o que físicamente es una instalación (*Area*). No intervienen por tanto en el proceso productivo, no transformando el producto. Por ejemplo, si se quiere organizar todos los recursos de una estación en concreto, se pondrían debajo de un nodo organizacional que tuviera el nombre de la estación. Sirve además para aportar información al Gantt del proceso de ensamblaje identificando a qué estación pertenece. Si además, se quiere representar físicamente una instalación asociada a la estación, ésta sería identificada con un recurso del tipo Área que caería dentro del nodo organizacional.
 - *Area*.
 - *Organizational*.
- Recursos *Who*. Desempeñan un papel activo en el proceso productivo, son los que ejecutan las operaciones. En este tipo se incluyen por ejemplo los recursos humanos o robots. Pueden seguir lógicas de comportamiento. Esto extiende su libertad más allá del simple desplazamiento por coordenadas, pudiendo seguir una serie de funciones lógicas programables. Esta modelización lo que trata de decir es que son elementos dinámicos, que tienen respuesta variable ante una estimulación con condiciones de contorno variables. Por ejemplo, un robot puede llevar una lógica programada detrás que le haga comportarse de formas diferentes según le llegue un producto u otro.
 - *Robot*.
 - *Worker*.
 - *Transport*.
 - *Conveyor*.
 - *NC Machine*.
 - *Industrial Machine*.
 - *Inspect*.
 - *Control Device*.
 - *Logic Controller*.
- Recursos *With*. Desempeñan un papel pasivo en la fabricación. Aunque transforman el material, es necesario que algo los manipule para que lo lleven a cabo. En este grupo se pueden incluir las herramientas y pistolas de operario, plataformas móviles que se mueven con control por el operario,

etc.

- *Tool Device.*
- *Storage.*
- *Sensor.*
- *User Defined Resource.*
- *Manufacturing Setup.*

Una vez que un producto se ha insertado como un recurso determinado, este ya es considerado como un recurso en la base de datos en todo momento. Desde el punto de vista de la maqueta es indiferente el asignar un producto a un tipo de recurso u otro. Lo que varía es por un lado el comportamiento con el que puede caracterizarse, afectando a la simulación del proceso, y por otro al tipo de subrecursos que puede contener. Por ejemplo, un recurso del tipo *Worker* no puede tener ningún hijo en la estructura de recursos y además puede llevar una lógica programable. Por otro el recurso tiene asociados una serie de parámetros de coste que permiten identificar el impacto de su actividad tanto en tiempo con parámetros como el tiempo de ciclo como en coste, pudiendo asignarle valores de costes de mantenimiento, de instalación, de consumo de energía, etc.

Se remarca que esto no guarda ninguna relación con la geometría de diseño. El programa permite meter cualquier geometría y después darle la característica de recurso que se desee. Es posible meter una grúa con la denominación de tipo *Worker* o *Area* aunque sean incoherentes con la realidad. El tipo de recurso es solo un atributo más que se le va a dar a la geometría de recurso para modelar el comportamiento que se le quiere dar en el entorno industrial.

Observando tanto el tipo de recursos que considera el programa como los ejemplos que existen en la ayuda de Dassault, se llega a la conclusión de que el programa está orientado a resolver un tipo en concreto del paradigma de la industria: la célula robotizada. La presencia de sensores, vagones, robots, controladores lógicos lo refuerza. Y prácticamente lo confirma el hecho de que los grados de libertad y comportamientos lógicos de las herramientas articuladas *Tool Device* se diseñen desde el módulo *Device Task Design*, perteneciente al set de Robótica.

En cuanto al posicionamiento del producto y el recurso, las herramientas apenas han cambiado respecto a la versión en v5. Recordando cómo trabaja Catia con los ejes de coordenadas, Catia posiciona por defecto todos ejes de coordenadas de los hijos de un nodo de una estructura como relativos respecto al sistema de referencia del padre, que en esta relación de padre e hijo es el que posee los ejes absolutos. Si este padre tuviese a su vez otro padre, dejarían de ser absolutos y pasarían a ser relativos del padre y así sucesivamente hasta llegar al nodo raíz de producto. Además Catia hace que dicho eje absoluto coincida por defecto con los ejes relativos del primer nodo que se encuentre barriando la estructura que contenga CatParts. Jugando con estos ejes se posicionan los componentes de la DMU de producto.

Para el caso de la iDMU, el nodo raíz del producto no es el primer nodo de la estructura. En efecto, es el nodo PPR el nodo padre y el que determine la posición de los ejes relativos de los nodos de producto y recursos.

Las herramientas de posicionamiento permiten o bien trabajar directamente con coordenadas a través de los diferentes sistemas de referencia o bien estableciendo una infinidad de relaciones geométricas que facilitan el posicionamiento: alineamiento de caras, contacto, paralelismos, etc.



Figura 68. Resource Definition and Layout. Herramientas de posicionamiento.

Por último el Resource Definition and Layout tiene una herramienta consistente en extraer la huella que deja en la planta cada recurso, de tal manera que de ahí se puede extraer un Layout en dos dimensiones de la misma.

5.3.6 Creación del As Prepared del XDA15. Recursos.

Aunque se ha explicado que Airbus ve como una caja negra al recurso, se hace necesario diseñarlo en el proyecto del XDA15 para poder establecer una iDMU. Como consecuencia de esta actividad de diseño adicional, se trata de demostrar la capacidad colaborativa del entorno v6 pues en este caso se está tomando el papel de un subcontratista que diseña el recurso directamente con la información del producto, generando como único entregable el entorno industrial.

Al igual que ocurría en los anteriores apartados, el proyecto XDA15 es demasiado complejo como para atajarlo en su conjunto para estudiar las capacidades del programa. Se hace necesario crear un caso de estudio más reducido a partir del cual extraer conclusiones que se extrapolen al avión completo. En este caso se ha decidido diseñar y simular la preFAL del fuselaje, por ser un buen ejemplo de implementación de una línea móvil, capaz de ir a pulsos.

Para la creación del caso de uso lo primero que se ha hecho es diseñar una instalación industrial, el lugar donde trabajan los recursos para transformar el producto.

Para el XDA15 se ha definido como instalación industrial un layout en planta del Build Process. Puesto que todo el diseño y la validación del entorno industrial son virtuales y previos a su construcción, no hay restricciones en dimensiones ni configuración de la planta. La versatilidad es infinita y si en algún momento hay restricciones de espacio, con modificar el tamaño del suelo es suficiente. Como primera aproximación de las dimensiones de la fábrica se ha modelado una superficie cuadrada de 300m de lado a la que se le ha dado un espesor de suelo de 30 cm. Además para el caso de uso se han modelado los raíles sobre los que se ha previsto que se muevan los recursos asociados al montaje.

Suponiendo además que los ejes coordenados en planta (H,V) son tales que coinciden con las coordenadas geográficas (Este,Norte), se ha decidido que el origen de coordenadas de la iDMU esté en la esquina suroeste de la fábrica. Esta convención es muy importante para poder posicionar todos los elementos de la iDMU respecto a dicho origen de coordenadas.

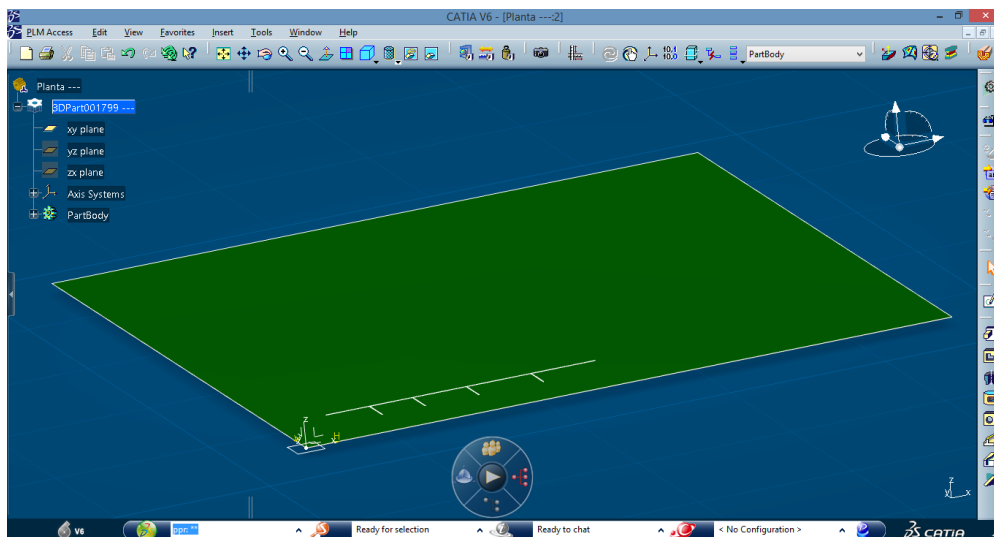


Figura 69. Layout en planta preliminar. Caso estudio XDA15.

Siguiendo la lógica de Catia para los sistemas de coordenadas, para el producto XDA15 todos los mayor component se posicionan respecto al nodo raíz de avión. En el caso del XDA15, la primera pieza dibujada fue la proa, luego el nodo de producto del XDA15 ha cogido por defecto la nariz como el origen del sistema de ejes avión.

Cuando se ha introducido el producto en el árbol PPR con el que hemos estado trabajando todo el rato, el PPR ha cogido como absoluto el mismo sistema de referencia que tenía como absoluto el nodo de producto de avión. Sin embargo ya el nodo de producto avión ha cambiado su sistema de referencia a relativo, luego se

puede desplazar todas sus piezas respecto al sistema del PPR sin problemas.

El siguiente paso ha sido el crear un nodo raíz organizacional de recursos y definir un recurso de tipo *Área* e insertar el producto Planta en él. Los ejes de diseño de la planta al tenerlos posicionados en el lugar adecuado, por defecto se sitúan coincidentes al absoluto del PPR. Si no se hubiese diseñado la planta con ejes en la esquina deseada, se habría tenido que desplazar los ejes relativos de la planta respecto al absoluto del PPR de tal manera que la esquina suroeste coincidiera con el eje absoluto del PPR. En cualquier caso, es que dicha esquina constituye el origen del sistema de ejes absoluto del PPR.

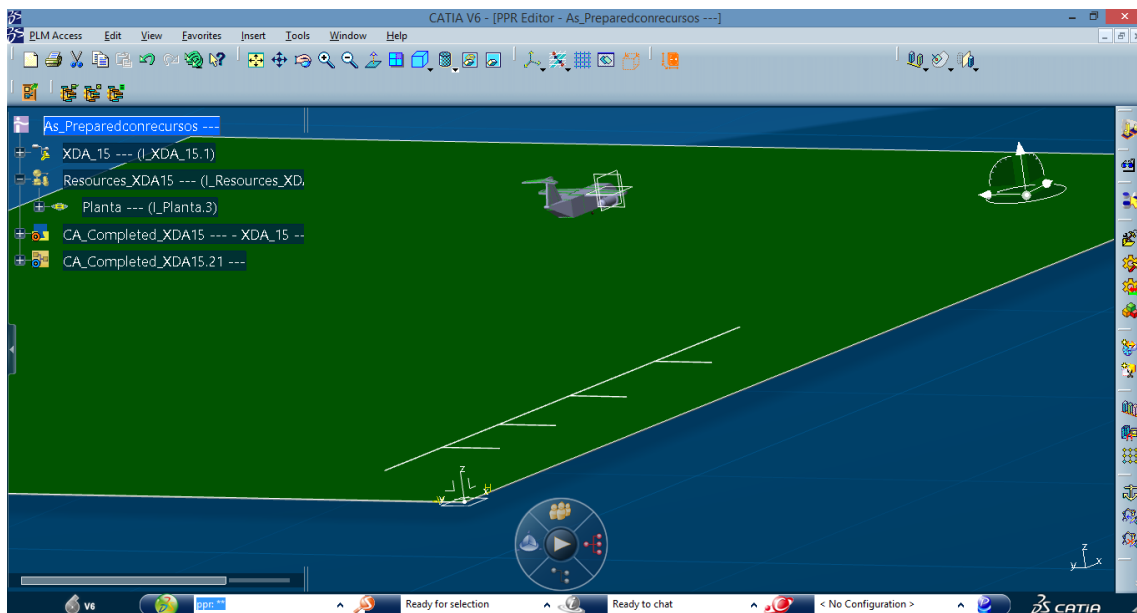


Figura 70. Resource Definition and Layout. Sistemas de ejes PPR, planta y avión.

Dentro de la clasificación propuesta de los recursos, no se han considerado ni medios industriales ni recursos humanos. En consecuencia, lo siguiente ha sido diseñar una serie de útiles con los que se llevará a cabo las operaciones previstas para el ensamblaje del fuselaje. Estos útiles se han modelado lo más simplificado posible, siendo simplemente plataformas sobre las que se asienta las partes a ensamblar, con un pie que encaja en los raíles. Cada útil es diferente de acuerdo a las dimensiones de las piezas que contienen y de las operaciones a realizar. Además se ha seguido un proceso iterativo de dimensionamiento de los raíles junto con el de los recursos con el fin de asegurar que la línea en sí se ajusta en tamaño al proceso de montaje previsto.

Se han definido dos tipos de útiles: útiles de carga y posicionamiento y útiles con los que se ensambla. Cada uno llevará asociada la respectiva *Loading Operation* y *General Operation* del proceso. Por simplificar, solo se ha considerado un recurso por operación y además no compartido por ningún otro proceso. Estos recursos han sido cargados como *Tool Device* y por tanto del tipo *What*.

En este punto se ha identificado un problema bastante importante dentro del módulo: no permite posicionar el producto dentro del entorno industrial. La razón es precisamente por tratar a los sistemas de referencia de los hijos como relativos al del nodo padre. Al desmontar el producto y ponerlo en su posición del útil se está cambiando su posición respecto del nodo padre y así sucesivamente hasta llegar al nodo raíz de producto avión. El sistema no es capaz de independizar las posiciones de diseño en los módulos de diseño de las posiciones que se quieren en una maqueta industrial mediante el PPR, luego no relaciona directamente las posiciones de las partes respecto al sistema de coordenadas absoluto del PPR sino al de su nodo padre.

No ha cambiado en este aspecto nada respecto a v5, en el que se tenía que hacer como *workaround* sesiones específicas cargando solo las partes afectadas a un cierto proceso. Además para no destrozr la maqueta de diseño al modificar las posiciones relativas entre los elementos de producto, la carga de los componentes de producto se hacían creando una copia y montando una sesión offline.

La solución más lógica que debería de proporcionar Dassault debería ser que claramente diferenciase entre dos

sistemas de coordenadas completamente diferentes, las coordenadas de diseño de avión, y las coordenadas de un entorno industrial en el que el producto está repartido por toda la instalación.

En Catia v6 si se quiere establecer posiciones iniciales relativas de producto y recurso sin cambiar los nodos de diseño y no perder la sincronización de la información contenida en la iDMU, se requiere abandonar los workbenches de creación del PPR y entrar en el entorno de simulación.



Figura 71. Imposibilidad de posicionar producto en el PPR sin cambiar posiciones en el árbol de diseño.

Por último en cuanto lo que concierne a este módulo se ha evaluado el impacto de utilizar recursos únicamente del tipo *What* en el resto de módulos. El método ha sido valorar cuál sería la diferencia si estuvieran recursos del tipo *Who* incluidos.

Se han observado principalmente dos diferencias. Una es que los recursos *Who* pueden llevar incluida una programación que luego afecte a la relación producto-recurso en el entorno de simulación. Si se incluye un recurso del tipo *Who* existe la opción de que el recurso reaccione activamente a las condiciones de contorno variables que surjan al simular y por tanto las operaciones dejan de ser deterministas en su duración prevista a través de los sistemas.

Supone una herramienta muy potente que más que de validación del proceso es prácticamente de diseño del mismo pues permite ver si por ejemplo en una línea móvil al operario no le da tiempo a hacer sus operaciones y se le crean interferencias en ella.

El uso de este tipo de herramientas activas, a medio camino entre la simulación dinámica y estática de una línea de montaje tiene un objetivo muy claro: resolver el problema de una línea automatizada mediante robots. Como anteriormente se ha descrito en el proyecto, para el estudio dinámico de una línea hay un módulo de simulación de eventos discretos dentro de Catia v6, sin embargo este trabaja con la estructura de cajas de los sistemas, en las que se meten los diferentes atributos dinámicos. No tiene por tanto una simulación en 3D de todo el entorno industrial donde se vean patentes los fenómenos. Las simulaciones que se pueden hacer con un buen modelado tanto geométrico como del algoritmo lógico de comportamiento para los tipos *Who* intentan cubrir ese vacío de información gráfica.

La otra diferencia observada es que aunque el uso de simulaciones dinámicas y programables quedan fuera del alcance del proyecto, el no meter recursos del tipo *Who* en el PPR de Catia v6 afecta también en los módulos orientados a la optimización de una línea de montaje. En efecto, estas simulaciones introducen además pueden invertir el proceso de planificación anteriormente expuesto en el Manufacturing System Definition, pues las operaciones en vez de ser consideradas como algo standard pueden cambiar su duración en función de los cambios de condición de contorno que se producen en los productos y los recursos.

Por otro lado, a parte de la optimización de operaciones que proporcionaba el Manufacturing System Definition con el Manufacturing System Gantt, existe un módulo encargado sola y exclusivamente de establecer los links entre sistema y recurso y de establecer un reparto de los recursos que se ajuste. Este es el módulo llamado Line Balancing y en él se pueden ver a parte del Gantt de operaciones el Resource Utilization Gantt.

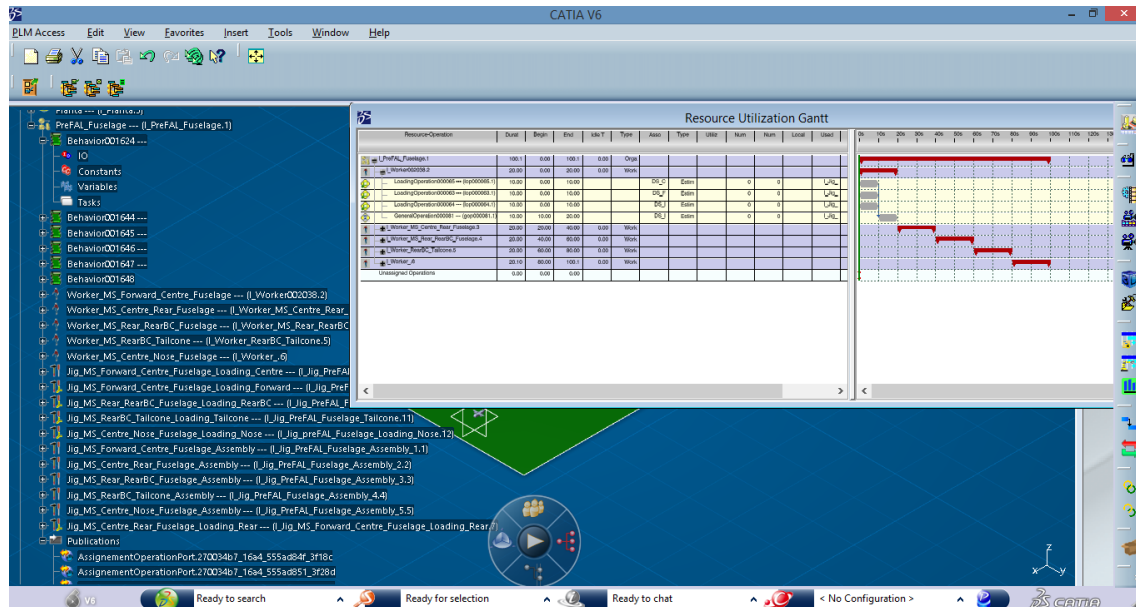


Figura 72. Módulo Line Balancing. Resource Utilization Gantt.

A pesar de que se llama *Line Balancing* y que en muchos casos el programa hace referencia al término balanceo, lo que se está persiguiendo en el estudio del XDA15 no

Al final el sistema lo único que hace es crear un balanceo de los recursos *Who* añadiéndole al Gantt información, que no calculando con, de con qué herramienta la está usando y dónde, a través de las respectivas asignaciones de los recursos *Where* y *What* asociados.

Para demostrar las anteriores conclusiones con la preFAL de fuselaje del XDA15, ha sido necesario crear una serie de recursos de tipo *Who* en el Resource Definition and Layout, en particular *Workers*. Puesto que no se van a hacer estudios ergonómicos no llevan geometría asociada. A estos se les ha asignado las operaciones correspondientes.

A parte de los anteriores efectos, se han averiguado otras limitaciones del módulo. Una de ellas es que no se pueden hacer asignaciones entre recursos y sistemas sino entre recursos y operaciones. Esto provocaba que al hacer Scope Link entre los nodos raíces de sistema y recurso como se había hecho para los anteriores módulos, aparecieran todas las operaciones de montaje del XDA15 como disponibles, sin visibilidad de la red de sistemas, simplemente una lista con decenas y decenas de operaciones. En consecuencia, se hacía necesario hacer un Scope Link del nodo organizacional de recursos PreFAL de Fuselaje al nodo de sistemas PreFAL de Fuselaje.

Otro fenómeno importante observado es la limitación de un recurso de tipo *Who* por operación. Si bien la de un tipo *What* por operación era algo que se había planteado simplemente por simplificar el modelo, esta viene condicionada por el programa. Esto se traduce en que el programa no contempla operaciones en las que haya más de un sujeto trabajando en el producto.

La metodología de optimización que se puede crear con este módulo es incompleta pues no se pueden resolver operaciones que intrínsecamente deben de hacerlo varios recursos. Por ejemplo, en el posicionamiento de un pílón en el ala se requieren 3 operarios. Si el tiempo de ejecución de la operación es X, a lo sumo lo máximo que se podría hacer con este módulo sería subdividir la operación en tres suboperaciones en paralelo de tiempo X. Al final resulta que la optimización con el módulo supone más un ejercicio de análisis y tratar de crear *workarounds* por parte del ingeniero que algo que sea intuitivo y automatice el proceso.

Por último en la anterior figura se ve ya las primeras tendencias del programa a ir dejando “basurilla” dentro de los nodos PPR. Quiere decir que si hasta el momento toda la información del diseño y los procesos permanecía contenida o bien en la estructura o bien en los atributos de metadato de cada nodo, el sistema comienza a crear nuevos nodos de información adicionales que no están contenidos en los nodos afectados.

El peligro de esta tendencia es que comienza a ser difícil el filtrar, gestionar y extraer información de la iDMU. La percepción al hacer el caso de estudio es que conforme se avanza en el uso de los módulos hasta extraer todo su potencial, parece que el sistema se vuelve más inestable e incompleto metodológicamente.

Para el caso de uso de la preFAL del Fuselaje del XDA15, finalmente se ha decidido mantener los recursos *Who* en la estructura de recursos a expensas de analizar su impacto en las simulaciones. La contribución del Resource Definition and Layout a la definición del entorno virtual industrial ha sido situar el utillaje en una posición preliminar dentro de la línea, a falta de saber si es necesario un ajuste más fino al posicionar el producto en el recurso en el entorno de simulación.

Gracias a este posicionamiento previo de los útiles en el entorno industrial se han identificado problemas como que la distancia entre raíles era insuficiente para el tamaño de los útiles. Esto que una vez creada en la realidad la instalación hubiese supuesto un impacto enorme, virtualmente ha bastado retocar el diseño de los raíles para solucionar el problema.

Por restricción de tiempo para la entrega del proyecto, se ha decido acotar la implementación completa de la de iDMU al caso de la preFAL de fuselaje del XDA15, no extrapolándose en este caso los resultados del caso de estudio a la industrialización completa del XDA15.

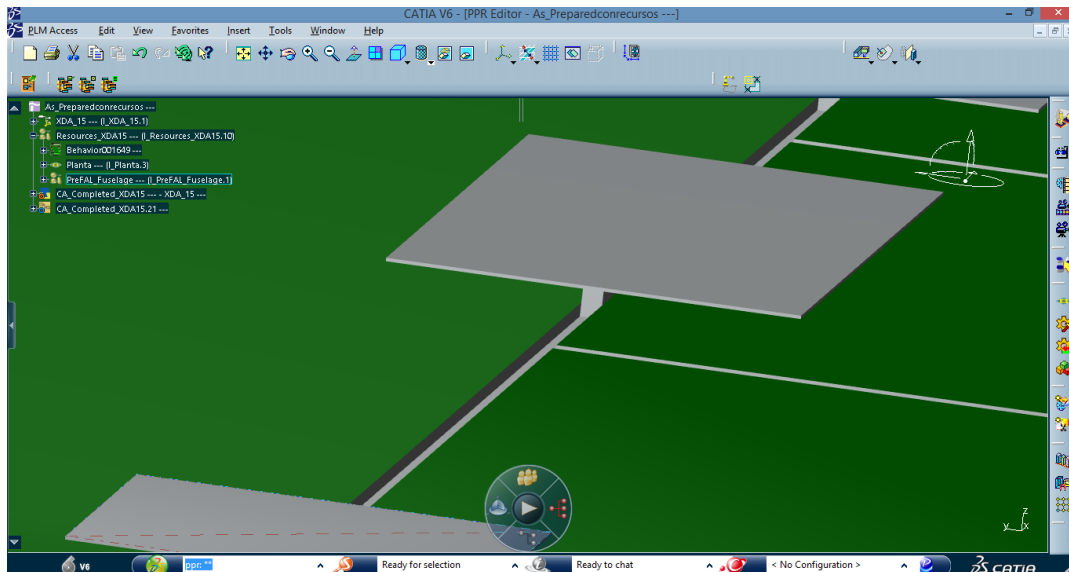


Figura 73. Detalle del posicionamiento del útil en el raíl.

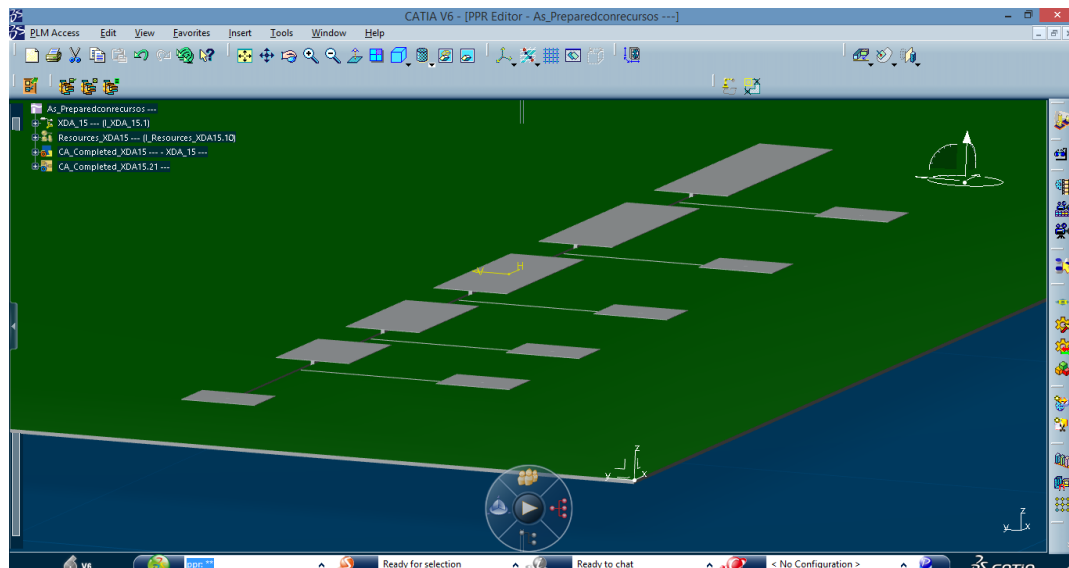


Figura 74. Útiles posicionados. PreFAL fuselaje del XDA15.

Concluyendo el análisis del caso de estudio en el módulo del Resource Definition and Layout, parece orientado más a generar exclusivamente el nodo de recursos, permitiendo hacerse una idea de cómo quedaría un modelado de las instalaciones de una fábrica pero sin entrar a valorar la viabilidad de dicha instalación. A parte este módulo permite darle atributos a estos recursos pero cuyo impacto no se ve directamente reflejado en él sino que es necesario evaluarlo a través de otros.

5.4 La simulación como validador del caso de estudio del XDA15.

La simulación se puede entender como la evaluación de un modelo bajo una serie de criterios y condiciones previas, con el fin de entender su funcionamiento. Estos criterios pueden ser tomados de la realidad o no, pero cuantos más condicionantes reales se introduzcan en la simulación, mayor conocimiento sobre el comportamiento real del modelo se tendrá.

A consecuencia de la decisión de reducción del alcance del proyecto tomada en el apartado anterior, la

simulación tendrá como alcance validar la industrialización de la preFAL de fuselaje del XDA15.

En el XDA15 la mayor parte del caso de estudio ha sido definición e implementación de un modelo de maqueta digital industrial. Sin embargo, exceptuando el breve paso por el *Product Build Up*, que consistía en simular el orden de las operaciones para observar si había algo que no se estuviera montando en el orden establecido en el modelo, el resto del caso ha estado orientado a la creación e inserción de datos en la iDMU no a su validación.

5.4.1 La metodología de simulación en Catia v6.

Catia v6 dispone de un entorno centralizado de simulación para la industrialización de un producto, *Live Simulation Environment*, desde el que se accede desde diferentes módulos para estudiar cualquier combinación de productos, recursos y procesos. Por ejemplo no es necesario tener definidos unos procesos para poder analizar la interacción producto-recurso o se pueden hacer estudios de trayectorias de montaje únicamente con el producto.

Debido a esta libertad a la hora de simular, el entorno es habilitante de prácticas de diseño como el Design For Assembly puesto que en él se puede hacer estudio de trayectorias y evaluar diferentes maneras de montar los componentes, permitiendo además a los diseñadores de procesos y de recursos comenzar la actividad de diseño en etapas muy tempranas del ciclo de vida.

En Catia v6 existe además dos formas claramente diversas de definir las condiciones de contorno para simular el entorno industrial, es decir, la relación entre productos, procesos y recursos. Una programable, con diagramas de flujos y bucles. En este caso hay relaciones dinámicas, interdependientes entre el producto, el proceso y el recurso, dependiendo de la reacciones de unos en función del comportamiento programado del resto. Este sería el caso por ejemplo de un recurso que se mueve para recoger producto pero si deja de venir producto el recurso se para.

Si en el Resource Layout and Definition se establecía el tipo de recurso (*What, Who, Where*) es en los módulos de Robótica (Device Building, Device Task Design...) y Ergonomía (Human Builder, Human Task Definition) donde se modelan los comportamientos. La característica más diferenciadora del trato del humano en V6 es que es modelado igual que un robot: una cierta cinemática asociada a un comportamiento programado. Los recursos que sean de carácter *What* pueden llevar una lógica programada también, pero esta lógica no llama a nadie, solo se activa ante la llamada de un recurso *Who* al recurso *What*. Por ejemplo, una grúa puede tener un comportamiento programado asociado pero solo se va activar si el recurso activo, sea máquina o humano, tiene un comportamiento programado que llame al uso de la grúa ante una cierta situación.

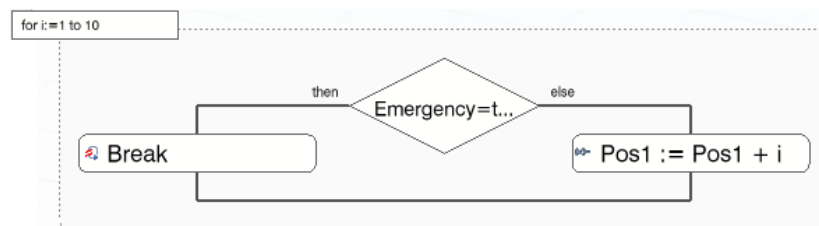


Figura 75. Ejemplo de comportamiento programable [18].

Otra es completamente determinista, en la que cada producto, proceso y recurso no responden a las condiciones del entorno. Únicamente se establecen una serie de puntos en el espacio, en coordenadas absolutas, por los que se quiere que pase el producto o recurso afectado. Las trayectorias se calculan como la interpolación de esta serie de puntos, pudiéndose definir interpolaciones de tipo lineal, o splines. Al producto, recurso o conjunto de ambos se le asocia un sistema de coordenadas relativo que va a ser el que pase por la trayectoria. Por último para darle movimiento es necesario o bien asociarle a la trayectoria o bien un parámetro de tiempo o bien de velocidad. Todo esto queda agrupado y definido en una entidad denominada Track.

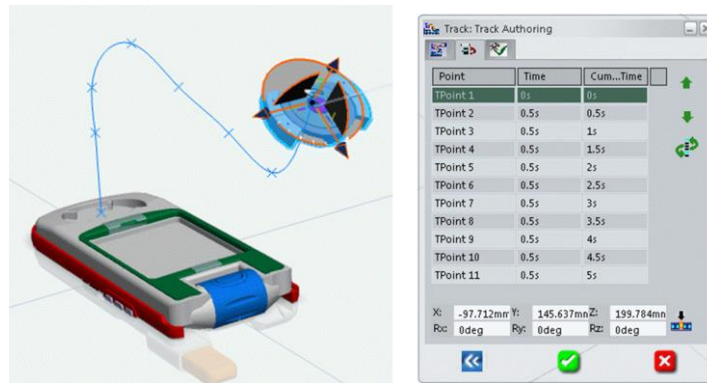


Figura 76. Ejemplo de simulación determinista mediante Tracks [18].

Los Tracks no se ven afectados por el contenido de las trayectorias de Tracks anteriores o posteriores. Siguiendo con el ejemplo del recurso que recoge producto, en este caso el recurso se seguiría moviendo aunque el producto fuera por otro lado, o si viniera el producto con más rapidez el recurso no se adaptaría al nuevo flujo. Las trayectorias se definen directamente en el entorno simulador entrando por el módulo Assembly Path Definition.

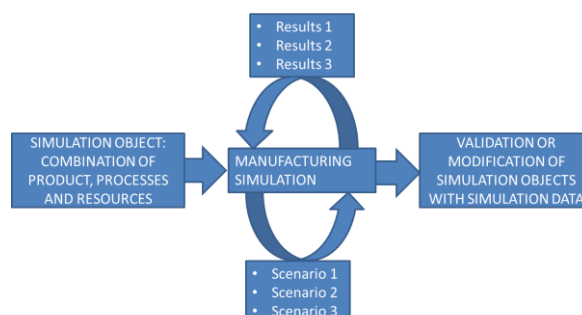
5.4.2 Live Simulation Environment. La simulación en el XDA15.

Se recuerda que el programa tenía tendencia a crear un rastro de nodos adicionales por toda la estructura, a veces metiendo información de procesos en los nodos de diseño del producto, afectando a la limpieza y homogeneidad de las estructuras. Uno de los tipos de nodos que aparecían eran los llamados *Behaviours*. Toda la programación de comportamientos dinámicos de los recursos cae bajo estos nodos.

Por esta razón y porque el estudio de los módulos de Robótica y Ergonomía no están dentro del alcance del proyecto, se ha decidido realizar solamente simulaciones deterministas con el Assembly Path Definition. Esto conlleva que la definición de los recursos como *What*, *Who* o *Where* carece de utilidad para ella. Por tanto, de toda la metodología y terminología expuesta, el estudio se centra únicamente en las trayectorias o Tracks.

Para las etapas tempranas del ciclo de vida, en las que no se tiene clara aún las estructuras de producto, procesos y recursos, el entorno de simulación tiene la opción de crear una estructura llamada *Manufacturing Simulation*, en la que se simulan diferentes *Manufacturing Scenarios* de prueba del modelo a simular, que puede ser una combinación de producto, procesos y recursos. Aunque para simular es necesario introducir datos de trayectorias de producto, de recurso o de secuencias de operaciones, estos no se guardan en el PPR a simular sino en el *Manufacturing Scenario*. Se pueden ademar extraer resultados de la simulación como el número de colisiones o las distancias entre objetos, exportando los datos en forma de gráficas o incluso tablas Excel, resaltar con colores y texto y otras opciones gráficas.

Teniendo en cuenta que el diseño es un proceso altamente iterativo, el *Manufacturing Scenario* aísla la fase de pruebas de la de introducción de datos en el PPR. El flujo de trabajo deseado para utilizar estas capacidades sería:



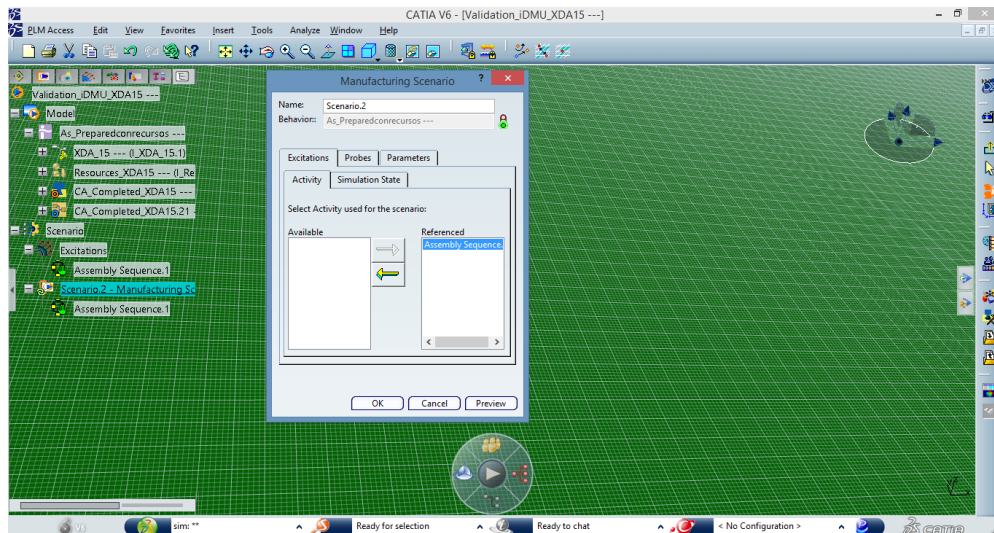


Figura 77. Live Simulation Environment. Manufacturing Scenario.

Sin embargo, se han detectado ciertos problemas que dificultan el flujo:

- El Manufacturing Simulation crea toda una metodología alrededor de los Tracks con términos diferentes y conceptos redundantes e incompletos respecto al Manufacturing System Definition. Considera a los Tracks como unos procesos los cuales pueden tener precedencias temporales como si fueran Operations. Crea una nueva entidad llamada Assembly Sequence equivalente al System. Todo esto metodológicamente aislado del resto de estructuras de producto, proceso y recursos de Catia v6.

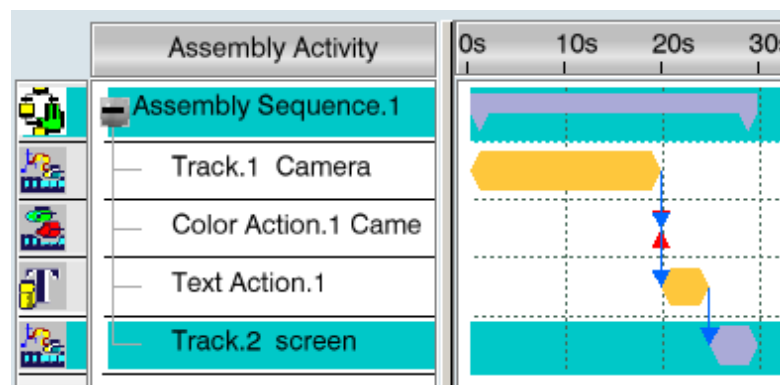


Figura 78. Manufacturing Simulation. Sequence Gantt.

- Aunque metodológicamente estén aislados, tampoco tienen capacidad de actualizar automáticamente un PPR con los Tracks generados en la simulación. Sin embargo a la inversa si es posible hacerlo, esto es meter como modelo a simular un PPR con procesos y Tracks ya existentes y crear un Sequence Gantt con el que evaluar y validarlos.

En conclusión el Manufacturing Simulation podría crear Tracks nuevos o validar Tracks ya existentes, pero en ningún caso se podrían insertar en la misma herramienta información nueva sobre los Tracks en el PPR, los cuales caen siempre debajo de una Operación de la red de procesos definida en el Manufacturing System Definition. Estos tendrían que ser buscados en la base de datos e insertados manualmente en el PPR correspondiente.

En vista de lo anterior se ha decidido no utilizar las opciones del Manufacturing Simulation y definir directamente los Tracks en el PPR del XDA15, algo que también permite el Live Simulation Environment. Además se ha partido de que la planificación de las operaciones hecha en el As Prepared es una planificación

ya validada, por lo que la red de trayectorias definidas debajo de una operación deben al final sumar el tiempo de 10s estándar por operación.

En el caso de que la operación no estuviese validada, el driver es la simulación, luego la operación se ve influida por la longitud de las trayectorias que tiene como hijas, pudiendo ser mayor o menor que la prevista. Esta decisión tomada por el programa es coherente puesto que es en la definición de las trayectorias donde realmente está la información de las operaciones, detectando incidencias como que el movimiento de los recursos y el producto sea demasiado rápido y tecnológicamente inviable para cumplir con la planificación prevista. Sin embargo tiene un defecto y es que machaca la planificación anterior, no teniendo un registro de los cambios.

Lo primero que hay que destacar de esta decisión es que por el simple hecho de ya estar adjunto el Track a una operación determinada, el Track se ve condicionado por ella. Solo aparecen cargados aquellos productos asignados a la misma y solo es posible mover los recursos asociados. Esto provoca que no se puedan diseñar trayectorias coordinadas con otras de otros productos y recursos. Obliga constantemente a mirar las coordenadas de posición de otros productos y cuadrar de una manera subjetiva los movimientos aislados de los componentes. Solo se es capaz de ver el conjunto completo de movimientos a través de la aplicación de reproducción de la simulación, por lo que es necesario reproducir la simulación para evaluar el impacto de cada Track que se modifica.

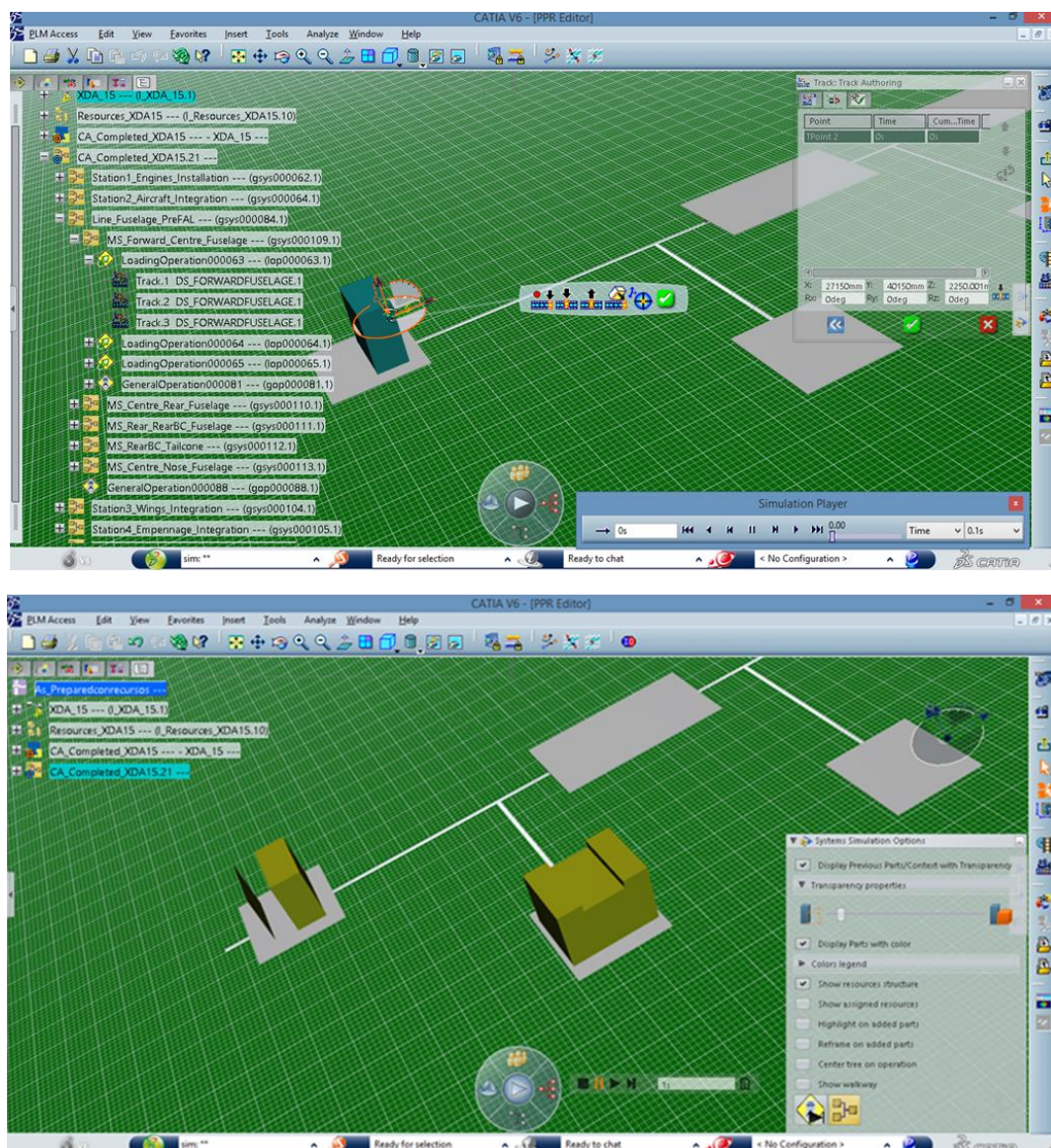


Figura 79. Información gráfica mostrada al crear el Track y al simular el proceso.

Un punto positivo es que tanto en la simulación como en el diseño del Track sí se puede ver la interacción del producto con su recurso, pudiéndose detectar interferencias, recursos de tamaño inapropiado. Como muestra la figura anterior, la plataforma de transporte del fuselaje central está muy ajustada al tamaño pero no es necesario rediseñarla.

No ocurre lo mismo con la estación de montaje de la cabina, en la que tras la simulación se ha rediseñado la línea por considerar más apropiado que la cabina entre por delante de la plataforma de ensamblaje y no por detrás.

Otra incidencia detectada en la simulación es que sin quererlo se han usado recursos compartidos, pues los planos de montaje comparten plataforma de carga con los componentes. Se planteaba el dilema de cómo el programa reconciliaba el hecho de tener Tracks de recurso asociados en operaciones diferentes, pero que se realizan simultáneamente. Al realizar la prueba, lo primero que se ha detectado es que al no estar relacionados los Tracks entre sí, el programa deja asignarle movimiento al recurso en cada uno sin avisar de que el recurso ya está asignado en otra operación y que además tiene asignado un movimiento que puede entrar en conflicto con el anterior. Esto quiere decir que no existe la posibilidad de establecer unas precedencias entre los recurso compartidos.

El resultado es que el recurso se mueve según el Track que aparece más tarde en la estructura del árbol, demostrándose que la simulación es únicamente la compilación y ejecución secuencial de los Tracks. La simultaneidad de las operaciones es en realidad una apariencia debida a la diferente localización espacial de los objetos que se mueven.



Figura 80. Remodelación de la línea después de la simulación.

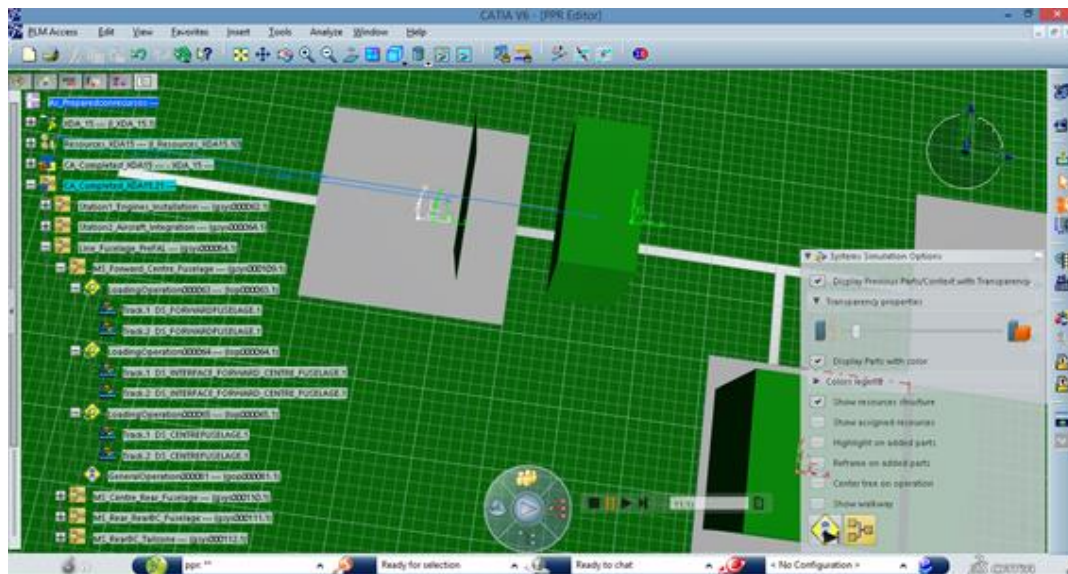


Figura 81. Prueba donde se ve que el recurso se mueve según el último Track ejecutado.

Otra consecuencia derivada de la ejecución secuencial e independiente de los Tracks es que surgen interferencias al simular. Una solución posible sería que se respetara una red de precedencias entre Tracks, sin embargo se ha comprobado que esto solo es posible hacerlo con Tracks insertados dentro de una misma operación. No tiene mucho sentido, en teoría si el Track es driver de la longitud de la operación también debería de ser capaz de crear precedencias entre operaciones a raíz de las precedencias entre los Tracks.

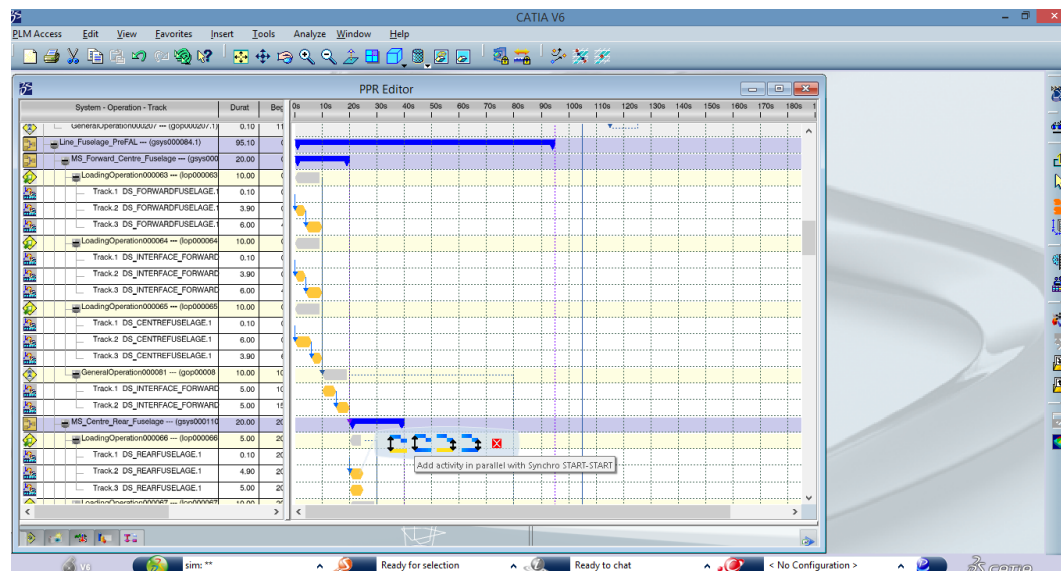


Figura 82. Manufacturing System Gantt una vez insertados los Tracks.

Existen dos posibles *work around* para solucionar esto. O bien hacer un decalaje manual a nivel de operaciones en el Manufacturing System Definition o bien “arreglar” la duración de los Tracks a base de prueba y error para que no existan las interferencias. En el XDA15 se ha tomado esta última opción.

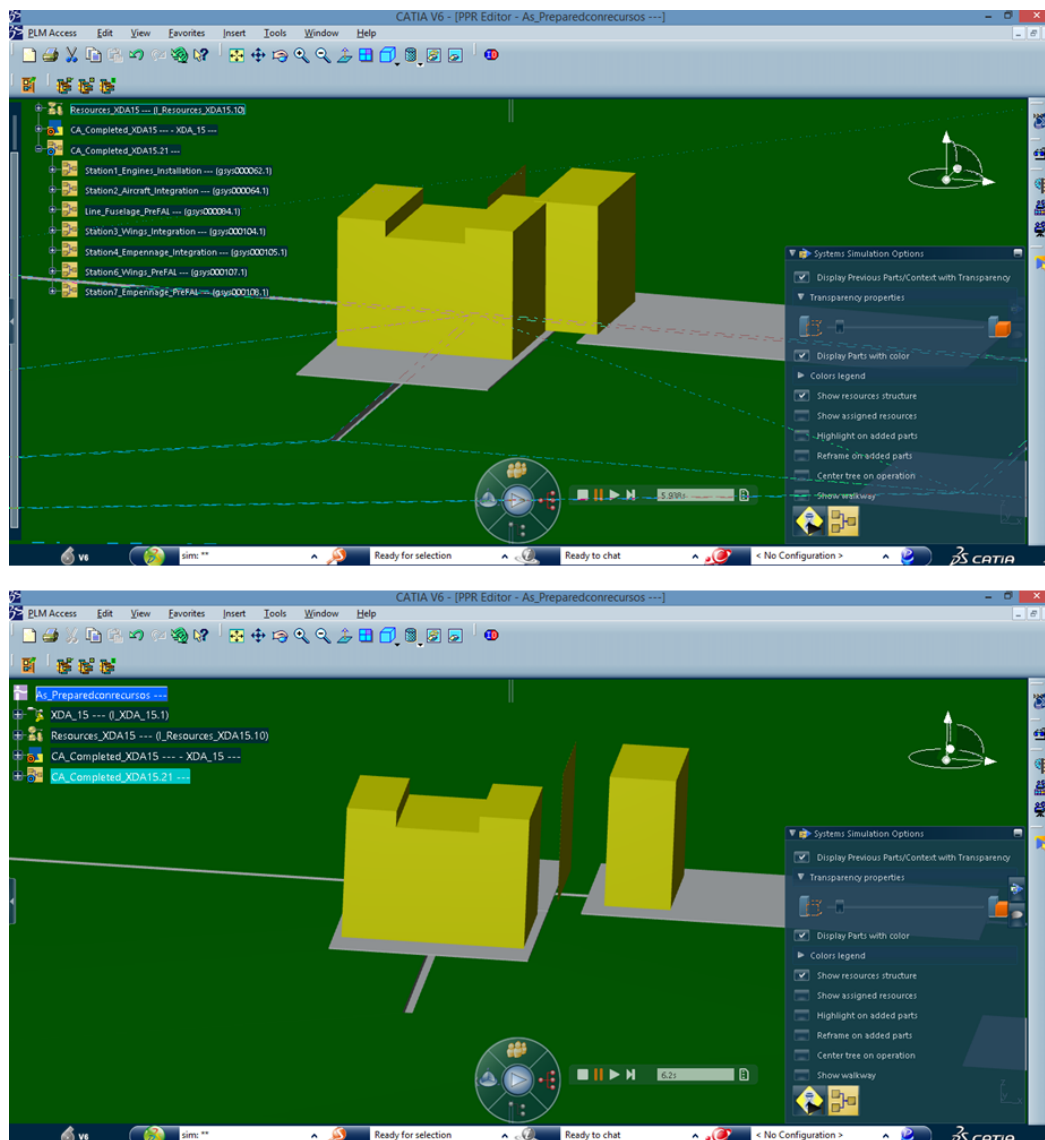


Figura 83. Interferencia detectada y solucionada durante el montaje del XDA15.

Otra observación encontrada durante el caso de estudio es que para generar los Tracks el programa toma siempre y por defecto como posición inicial las coordenadas del producto en su posición final de diseño del avión completo en el entorno PPR. Esto ocurre cada vez que se genera un Track en una operación que no contiene ninguno o no se ha ejecutado con anterioridad durante la sesión de trabajo. Si te sales del entorno y vuelves a entrar también se borran todas las posiciones simuladas en el entorno. Esto obliga a que para tomar como posición inicial cada componente posicionado en sus plataformas de carga es necesario un *work around* consistente en crear una trayectoria entre estas dos posiciones y eliminar el punto inicial de diseño.

Pero el programa no te deja crear un Track con tiempo nulo, necesita explícitamente un valor temporal para tener sentido. Por lo tanto para mitigar el efecto de este Track residual que no aporta nada a la simulación, se ha decidido darle un valor temporal de 0.1s y para ser coherente con el tiempo total de 10s adaptar los Tracks siguientes de tal manera que la secuencia tenga ese resultado.

Por último se ha observado el impacto del tipo de operación en la simulación. Mientras que la Loading Operation, dentro de sus límites era flexible a la hora de mover sus productos asignados de una manera independiente, la General Operation, que se recuerda que representa el proceso de ensamblaje entre los componentes, es extremadamente rígida.

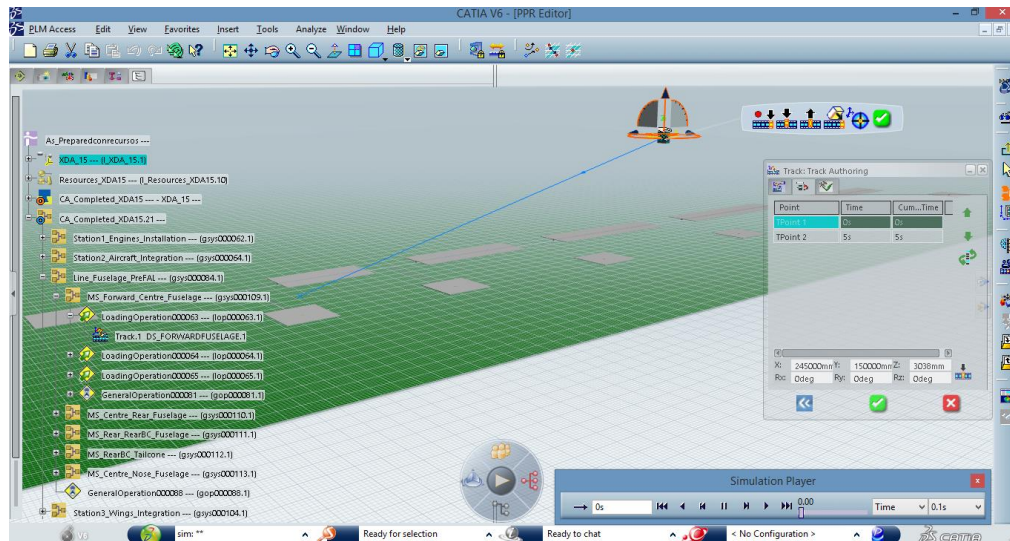


Figura 84. Track por defecto partiendo de donde se tiene el producto avión dentro del PPR.

El que simula esperaba que en la operación de ensamblaje se pudiese representar cómo los distintos componentes, puestos en una disposición más o menos adecuada por las operaciones de carga anteriores, se fuesen acercando hasta su posición de diseño en el conjunto en el que se van a montar. La simulación y por tanto lo que interpreta v6 es bien distinto.

Al simular la operación de montaje v6 representa el conjunto ya montado y como un bloque, sin posibilidad de mover los componentes. Permite mover el bloque como un sólido rígido únicamente. Esto quiere decir que en vez de trabajar con unos componentes de entrada y generar en el proceso un bloque de salida, directamente trabaja con el bloque de salida. La única manera de identificar lo que ya está montado en pasos previos de lo que se está montando es el código de colores.

Por otro lado puesto que en las operaciones de carga de material solo es posible mover los nuevos componentes y no los conjuntos sobre los que se van a montar, es necesario incluir el transporte del conjunto terminado como parte de la operación de ensamblaje, dejando de tener sentido tanto la operación de montaje, que no debería de incluir el transporte, como el código de colores en el tiempo que dura el transporte.

Toda esta variedad de incidencias y limitaciones por el uso de los Tracks en teoría serían evitadas por los Behaviours, elementos programables y dinámicos, a falta de pruebas por confirmar.

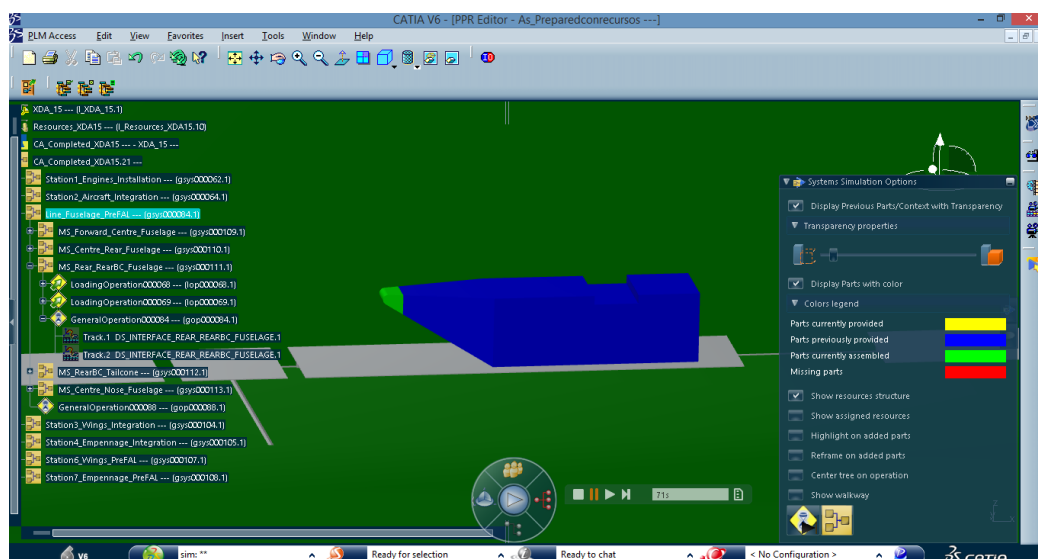


Figura 85. Simulación del proceso de ensamblaje.

En definitiva, las simulaciones deterministas en Catia v6 son demasiado simplistas y rígidas. Muchos work around para poder llevar a cabo un análisis detallado del producto, proceso y recursos que modele la realidad de un montaje aeronáutico.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este capítulo se recogen las conclusiones y posibles futuras líneas de investigación obtenidas a partir de la implementación de la metodología desarrollada en el proyecto y su posterior implementación en el caso de estudio.

6.1 Conclusiones

El valor añadido de este proyecto es principalmente que pone encima de la mesa una revisión metodológica de las etapas del ciclo de vida que principalmente afectan a la ingeniería de fabricación de un producto aeronáutico, sacando a la luz posibles debilidades de los métodos. Aunque no todas se han podido eliminar en el proyecto, al menos sirve de base para próximas investigaciones.

Además se ha creado un caso de estudio metodológicamente lo más completo posible, para evaluar posibles procedimientos de trabajo que permitan implementar los métodos en un sistema PLM de nueva generación como es Catia v6. En el caso de estudio se ha descartado el análisis de las configuraciones, ya sean de producto, procesos o recursos, lo que deja un campo bastante amplio aún por investigar.

- **As Designed. Estructura de PRODUCTO organizado desde el diseño funcional.**
 - Metodología bastante madura y robusta, basada en estándares internacionales, proponiendo una estructura jerárquica por funciones de los componentes. Solo la definición de los planos de montaje y su relación con los productos que montan es un poco más difusa, habiéndose definido algunas de ellas por convención. Siguiendo la metodología se ha creado un avión llamado XDA15 sobre el que desarrollarla. Este avión finalmente ha estado compuesto por 83 DS entre componentes funcionales y elementos de unión.
 - La implementación de la estructura en Catia v5 no revierte problemas. Sin embargo, la arquitectura de Catia v5, basada en relaciones entre ficheros, es muy inestable. Por inestable se entiende que al ser una estructura del tipo padre e hijo, si el fichero que es padre se pierde o está dañado, todos los hijos y lo que cuelgue debajo de ellos dejan de tener relación en la estructura, rompiéndose toda la rama del árbol. En consecuencia por el fallo de un único fichero se pierde un volumen enorme de información. Por tanto es necesario tener robustos mecanismos de control y depuración. El diseño en contexto con restricciones entre ficheros está reducido al máximo a causa de que en grandes componentes las relaciones entre los elementos son tan complejas que es imposible saber cómo afecta un cambio de diseño de los componentes en el resto. Se ha hecho una prueba con el XDA15 que lo demuestra.
 - Se ha comprobado la interoperabilidad entre los sistemas Catia v5 y Catia v6, con arquitecturas radicalmente opuestas. Se ha probado a pasar a Catia v6 el As Designed en v5 del XDA15, siendo necesario pasar antes una herramienta de depuración de la estructura para que v6 introduzca el modelo en la base de datos sin problemas.
- **As Planned. Estructura de PRODUCTO organizado desde el diseño industrial.**
 - Metodología menos robusta. Las Golden Rules no abarcan la casuística de las relaciones entre los elementos de la estructura. En particular, se han identificado deficiencias en la definición de la interacción entre el CA y los CI/LO/DS. La interacción entre ambos es compleja, debido al carácter radicalmente diferente del CA, que no tiene información de montaje y es un nodo que delimita responsabilidad, de los CI/LO/DS, que es la **misma información de montaje** del As Designed por estar diseñados los componentes en concurrencia con Ingeniería de Fabricación. Se ha creado para el XDA15 un As Specified del que se extraen los CA y un As Planned con los CI/LO/DS provenientes del As Designed.

- Tras una serie de subcasos de estudio con el XDA15, no ha sido posible una implementación metodológica completa del As Planned en v6:
 - Implementación de As Planned en Enovia v6. No realizable porque Enovia impone una metodología completamente distinta de la evaluada para el As Planned.
 - Implementación de As Planned como otra estructura de producto grabada en la base datos. No realizable porque v6 no tiene capacidad para reconciliar dos estructuras de producto.
 - Implementación de As Planned como estructura de procesos de v6 dentro de un PPR. A pesar de que la estructura **As Planned es de producto y no de procesos**, lo que entiende Catia v6 como estructura de procesos es lo más parecido al As Planned, esto es reflejar el reparto industrial del producto. Finalmente ha sido la utilizada para el XDA15.
 - Como aspecto positivo permite a partir de ella crear maquetas de producto por CA además de poderse asignar los componentes visualmente y no por tablas y manualmente como se hace en la actualidad. Aunque en la versión 2013x, utilizada en el proyecto, estas maquetas no estaban sincronizadas con los cambios de producto, en versiones posteriores sí.
 - La implementación falla donde la metodología As Planned está menos estudiada. Esta estructura llamada de “procesos” obliga a que en cada nodo de la misma se esté montando algo adicional. Aquellos nodos CA, en los que se no monta nada en la realidad, se ven obligados a tener asignado un montaje, sin poder reflejar que el CA surge como consecuencia de los montajes definidos por cada CI/LO/DS.
- **As Prepared. Estructura de PROCESOS y RECURSOS que son los que junto al producto los que determinan la industrialización.**
 - **Los Procesos.**
 - Lo más remarcable es que los procesos se deben modelar como una **red de procesos**, no una estructura de padres e hijos. Así se pueden crear precedencias temporales entre ellos. Además debe de haber una granularidad similar a la del diseño funcional, teniéndose entonces una respuesta de fabricación o Manufacturing Solution para cada Design Solution. Surgen entonces dos niveles de precedencias en la red, uno son las precedencias entre las diferentes operaciones que conforman una MS y otro las precedencias entre MS. Lo que jamás puede ocurrir es que haya precedencias de operación que afecten a otras MS, porque entonces se está dando respuesta industrial a más de un requerimiento funcional.
 - La implementación en v6 de la red de procesos en el caso de estudio del XDA15 se ha realizado en el módulo Manufacturing System Definition, detectándose varias incidencias. Por un lado, el módulo en general abarca muchos conceptos pero con un desarrollo muy limitado de capacidad, tales como optimización de las operaciones, varios tipos de precedencias según se quieran establecer entre operaciones o sistemas, etc. En muchos casos la metodología propuesta no es posible implementarla con las herramientas que posee del módulo, lo que obliga a muchos workarounds en el mejor de los casos y a no poder implementarla en otros. Por otro, debido a que el programa obliga a implementar todos los nodos CA del As Planned, se generan automáticamente operaciones de montaje asociadas a ellos que no deberían de estar en la industrialización, debiendo mitigarlas.
 - **Los Recursos.**
 - Metodológicamente los recursos son los menos estudiados. Aunque se han llegado a crear estructuras jerárquicas por sus funciones, carecen de sentido pues lo más adecuado es considerarlos como formando parte de una **piscina de recursos**, sin

orden entre ellos. Como mucho deben aparecer unas precedencias para aquellos recursos compartidos entre varias operaciones. Además los recursos deben llegar diseñados ya, teniéndolos como cajas negras para el que industrializa.

- La implementación de los recursos asociados al XDA15 se ha realizado desde el módulo Resource Definition and Layout. La principal conclusión tras el caso de estudio es que el módulo está más orientado a introducir recursos ya diseñados en el entorno industrial y posicionarlos entre sí que a diseñarlos en contexto con el producto, cosa que no es posible. A parte el módulo permite definir el tipo de recurso según una gama de recursos preestablecida por v6, afectando esto a otros módulos como el de optimización de línea o el de las simulaciones, pero teniendo que entrar en ellos para ver el efecto.

- **Simulaciones. Validadoras de la iDMU.**

- Existen dos tipos claramente de metodología de simulación. Una dinámica que se adapta a condiciones de contorno cambiantes, modelando a los recursos tanto humanos como herramientas de igual manera, como si fuera un robot que tiene un comportamiento adaptativo pero programado, uniéndose este además al tipo de recurso definido Por otro una determinista, en el cual los productos y recursos se mueven independientemente entre sí, solamente se definen trayectorias para cada uno.
- En la simulación del XDA15 se ha optado por la simulación determinista, ya que el modelado de los comportamientos programables se hacían en módulos de ergonomía y robótica, los cuales quedaban fuera del alcance del proyecto. El resultado de implementar las simulaciones deterministas mediante las trayectorias o Tracks es que eran demasiado simplistas, faltas de coordinación entre los elementos y demasiado rígidas pues no permiten trabajar sobre la iDMU completa, sino que solo en el modo de reproducción es cuando se vuelca toda la información disponible, provocando un continuo bucle de prueba-error entre el modo de edición de las trayectorias, que muestra una información muy limitada, y el modo reproducción.

En general, la conclusión del proyecto es que se ha demostrado que es posible industrializar un producto aeronáutico con v6, aunque la implementación de la metodología haya sido incompleta. Las ganancias respecto a los desarrollos de v5 son incuestionables.

Una observación general es la falta de flexibilidad de los módulos de v6 para adaptar metodologías diferentes a las propuestas por Dassault, que se convierten en casi impuestas en algunos casos. Además, el programa segmenta demasiado la información a mostrar, no teniéndose actualmente una capacidad real de trabajar sobre un entregable único de una manera simultánea e integral, principal objetivo perseguido con la creación de una iDMU. Por último el programa presenta unos flujos de trabajo entre los módulos a menudo liosos y redundantes, que no facilitan la trazabilidad del proceso de diseño y desarrollo de la iDMU.

Por tanto es el momento potenciar e impulsar la investigación, desarrollo y testeo de todas las capacidades que ofrece Catia v6 para la industrialización de un producto y en particular del producto aeronáutico. Catia v6 está aún inmaduro en muchos aspectos y es ahora cuando se debe introducir nuevas modificaciones en la arquitectura interna del mismo que permitan trabajar con la metodología desarrollada en el proyecto. Si se espera a que el producto esté maduro y la metodología venga impuesta desde el programa, habrá que adaptarse a la metodología de él, y se estará trabajando de acuerdo a cómo quiere un sistema informático que se trabaje y no a cómo el ingeniero desea trabajar.

6.2 Líneas futuras.

Este proyecto ha servido para abrir muchas posibles líneas de investigación. La información generada durante el mismo ha crecido espectacularmente. Se partió de la idea de 1 solo avión, que luego lo constituyeron 83 partes y que finalmente el PPR que contenía la industrialización del mismo (y solo parcialmente

industrializado) ya tenía un tamaño de más de 1700 nodos diferentes. Conforme se abría este abanico de información, tanto en variedad como en cantidad, más incógnitas surgían a cada paso, algunas de las cuales se han resuelto y otras se han dejado abiertas las siguientes posibles líneas de investigación y proyectos futuros:

- Estudio de la configuración y gestión de la efectividad de productos, procesos y recursos, tanto a nivel metodológico como de implementación en Catia v6.
- Estudio metodológico en profundidad de los planos de montaje y su relación con el resto de estructura de producto funcional.
- Estudio de mejoras en la metodología As Planned.
- Estudio en profundidad de los métodos de simulación con recursos programables.
- Proyectos de mejora de la arquitectura de v6 compartidos con Dassault Systèmes, con objeto que las nuevas versiones de Catia v6 sean más adaptables a otros tipos de metodología, con unos flujos de trabajo estructurados que permitan la gestión integrada de toda la información generada y que además presente un único entorno de trabajo en el que en la iDMU se generen simultáneamente producto, procesos y recursos, todo en contexto, para que la práctica de la ingeniería colaborativa sea posible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Mas, J.L. Menéndez, M. Oliva, A. Gomez and J. Rios, "Collaborative Engineering paradigm applied to the aerospace industrialization," in *Proceedings of 10th Product Lifecycle Management Conference*, Nantes, 2013.
- [2] N.J. Brookes and C.J. Backhouse, "Understanding Concurrent Engineering Implementation, A Case Study Approach", in *International Journal of Production Research*, pp.3035-3054, 1998.
- [3] Thankachan T. Pullan , M. Bhasi and G. Madhu, "Application of concurrent engineering in manufacturing industry", in *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23:5, pp.425-440, 2010.
- [4] S.C-Y. Lu, W. Elmaraghy, G. Schuh and R. Wilhelm, "A scientific foundation of collaborative engineering", in *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 56:2, pp. 605-634, 2007.
- [5] N. Okino, H. Tamura and S. Fujiii, "Concurrent versus collaborative engineering", in *Advances in Production Management System: perspectives and future challenges*, pp.82-83,1998.
- [6] CIMdata, "Product lifecycle management: Empowering the future of business", Tech. Rep., 2002.
- [7] J.Y. Mule, "Concept and evolution of PLM" in *International Journal of Applied Information Systems*, 4:3, pp.25-28, 2012.
- [8] S.G. Lee, Y.-S. Ma, G.L. Thimm and J. Verstraeten, "Product lifecycle management in aviation maintenance, repair and overhaul", in *Computers in Industry*, 59:2/3, pp.296-303, 2008.
- [9] R. Haas and M. Sinha, "Concurrent engineering at Airbus - a case study", in *International journal of manufacturing technology and management*, 6:3/4, pp.241-253, 2004.
- [10] R. Garbade and W.R. Dolezal, "DMU at Airbus – Evolution of the Digital Mock-up (DMU) at Airbus to the Centre of Aircraft Development", in *The Future of Product Development. Proceedings of the 17th CIRP Design Conference*, pp.3-12, 2007.
- [11] F. Mas, J.L. Menéndez, M. Oliva, A. Gómez and J. Ríos, "Collaborative Engineering Paradigm Applied to the Aerospace Industry", in *Product Lifecycle Management for Society, IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 409, pp.675-684, 2013.
- [12] F. Mas, J.L. Menéndez, M. Oliva, J.Ríos, A. Gómez, V. Olmos, "iDMU as the Collaborative Engineering engine: Research experiences in Airbus", in *International Conference on Engineering, Technology and Innovation*, Bergamo, 2014.
- [13] Airbus, *Product Structure Booklet*, documento interno, 2004.
- [14] Airbus, *M00ME030777 - Rules and guidelines for the Upper Level product structure management in PDMfDP for the A400M programme*, documento interno, 2004.
- [15] Airbus, *AM2211 – As Designed and As Planned Concepts and Rules*, documento interno, 2004.

- [16] Air Transport Association of America, ATA Specification 100 - Specification for Manufacturers' Technical Data, 1999
- [17] Figuras procedentes de diversos documentos internos de Airbus.
- [18] Figuras procedentes de la Documentación de Ayuda de Catia v6.