

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Definición y simulación con 3DExperience de la
maqueta digital industrial para el ensamblaje de un
ala de avión

Autor: Daniel Medrano Trujillo

Tutor: Domingo Morales Palma

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

Sevilla, 2021



Proyecto Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Definición y simulación con 3DExperience de la maqueta digital industrial para el ensamblaje de un ala de avión

Autor:

Daniel Medrano Trujillo

Tutor:

Domingo Morales Palma

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Máster: Definición y simulación con 3DExperience de la maqueta digital industrial para el ensamblaje de un ala de avión

Autor: Daniel Medrano Trujillo

Tutor: Domingo Morales Palma

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo Fin de Máster arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mis profesores

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi tutor Domingo Morales Palma la oportunidad que me brindó en su día permitiéndome desarrollar este trabajo, así como, la forma en la que hemos podido llevarlo a cabo. El paradigma que nos ofreció la pandemia del Covid-19, así como el haber conciliado este Trabajo Fin de Máster con mi actual vida laboral, ha requerido una dosis extra de flexibilidad y paciencia que he agradecido durante el discurso de este.

Quisiera agradecer todo el apoyo brindado durante estos años a mi familia y amigos, en especial a mis padres por haber estado todo este tiempo brindándome más apoyo del que nunca fui capaz de pedir, a la vez que fomentaban mi motivación para seguir adelante.

Por último, quiero agradecer su apoyo, paciencia y consejo a mi pareja. Muchas gracias por estos últimos meses intensos.

Daniel Medrano Trujillo

Sevilla, 2021

Resumen

La definición de maquetas digitales se ha convertido en una práctica habitual en la industria aeronáutica para el diseño y simulación del ensamblaje de productos aeronáuticos. Consiste en definir, mediante herramientas como la plataforma colaborativa 3DExperience, los diferentes procesos de fabricación de un producto de una forma colaborativa entre diferentes secciones de una misma empresa o entre la empresa y un grupo de proveedores o subcontratistas.

En este Trabajo de Fin de Máster se define una maqueta digital industrial completa del proceso de ensamblaje de un cajón alar, así como la simulación, evaluación y validación de los resultados. La maqueta se ha desarrollado con la plataforma colaborativa 3DExperience, utilizando las aplicaciones correspondientes al rol de *Process Planner*. El modelo de partida es un cajón alar de una aeronave comercial de tamaño mediano y las gradas de montaje que incluyen los recursos necesarios para su fabricación, las cuales definen una serie de restricciones en el proceso que determina cuál es la secuencia de ensamblaje factible, así como las operaciones necesarias para su fabricación. El trabajo incluye una breve introducción a la herramienta 3DExperience, la descripción detallada del proceso de ensamblaje, su posterior simulación y la evaluación de los resultados planteando posibles escenarios de producción.

Abstract

The definition of digital models has become a usual practice in the aeronautical industry for the design and simulation of assembly processes of aeronautical products. By means of collaborative platforms and tools such as 3DExperience, the definition of the manufacturing process of a product can be performed in collaboration with the different functions within the company or between the company and suppliers or services providers.

In this Master's Thesis it has been defined a complete digital model for the assembly process of a wing box, as well as the simulation, evaluation and validation of the obtained results. The model has been developed with the collaborative platform 3DExperience by using all the relevant applications allocated to the Process Planner role. The initial model is a wing box of a medium size commercial aircraft and the assembly stations with the necessary resources for its manufacturing, which will define the list of restrictions and the conditions of the process that will determine the feasible assembly sequence and the required operations. This Master's Thesis includes a brief introduction to the 3DExperience platform, the detailed description of the process, its subsequence simulation and an evaluation of the results with an approach to possible production scenarios.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivos y alcance del trabajo</i>	1
1.2 <i>Estado del Arte</i>	2
1.3 <i>Punto de partida e hipótesis iniciales</i>	2
1.4 <i>Estructura del Documento</i>	4
2 Introducción a 3DExperience	7
2.1 <i>Descripción de la plataforma 3DExperience</i>	7
2.2 <i>Funcionalidades utilizadas</i>	9
2.2.1 <i>Manufactured Item Definition</i>	9
2.2.2 <i>Process Planning</i>	10
2.2.3 <i>Equipment Allocation</i>	10
2.2.4 <i>Assembly Evaluation</i>	10
2.2.5 <i>Otras aplicaciones</i>	10
3 Lista de componentes y secuencia de ensamblaje del cajón alar (MBOM)	11
3.1 <i>Introducción a la aplicación Manufactured Item Definition</i>	11
3.2 <i>MBOM del cajón alar</i>	14
3.2.1 <i>Costillas y las celosías</i>	17
3.2.2 <i>Revestimiento inferior</i>	18
3.2.3 <i>Revestimiento inferior con costillas y celosía</i>	19
3.2.4 <i>Herraje superior de las costillas</i>	20
3.2.5 <i>Revestimiento superior</i>	21
3.2.6 <i>Revestimiento superior con revestimiento inferior y costillas</i>	22
3.2.7 <i>Larguero Frontal</i>	24
3.2.8 <i>Larguero Trasero</i>	25
3.2.9 <i>Fairing</i>	26
3.2.10 <i>Montante del alerón del Wingtip</i>	27
3.2.11 <i>Covers</i>	28
3.2.12 <i>Resultado del MBOM y validación</i>	30
4 Operaciones y recursos del cajón alar	33
4.1 <i>Introducción a la aplicación Process Planning</i>	33
4.1.1 <i>Herramienta Time Analysis</i>	36
4.2 <i>Introducción a la aplicación Equipment Allocation</i>	38
4.3 <i>Operaciones y recursos del cajón alar</i>	41
4.3.1 <i>Lista de operaciones</i>	42

4.3.2	Lista de recursos disponibles	42
4.3.3	Hipótesis del proceso de ensamblaje	51
4.3.4	Operaciones de la Fase I	55
4.3.5	Operaciones de la Fase II y III	90
5	Simulación del proceso de ensamblaje	103
5.1	<i>Introducción a la aplicación Assembly Evaluation</i>	103
5.2	<i>Simulación del ensamblaje del cajón alar</i>	104
5.2.1	Trayectorias del posicionamiento de las costillas y celosías	104
5.2.2	Trayectorias del posicionamiento de los revestimientos	105
5.2.3	Trayectorias de las estructuras móviles	106
5.2.4	Trayectorias del cajón alar de la Fase I a la Fase II	106
5.2.5	Trayectorias de los largueros	107
5.2.6	Trayectorias del sistema de taladrado por CN	107
5.2.7	Trayectorias del montaje del fairing	108
6	Evaluación del proceso y los resultados	109
6.1	<i>Análisis de los tiempos de los sistemas</i>	109
6.2	<i>Análisis de la carga de trabajo de los recursos</i>	113
6.3	<i>Planteamiento de posibles escenarios de producción</i>	114
6.3.1	Escenario de alta demanda: máximo rate de producción	114
6.3.2	Escenario de baja demanda: reducción de capacidad productiva	116
7	Conclusiones	117
7.1	<i>Consecución de objetivos</i>	117
7.2	<i>Conclusiones sobre el proyecto y la herramienta</i>	118
7.3	<i>Propuestas de mejora y continuaciones futuras</i>	118
	Referencias	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3–1. Tipos de elementos del Manufactured Item Definition	12
Tabla 3–2. MBOM – Costillas y celosías	17
Tabla 3–3. MBOM – Revestimiento inferior	18
Tabla 3–4. MBOM – Revestimiento inferior con costillas y celosía	19
Tabla 3–5. MBOM – Herraje superior de las costillas	21
Tabla 3–6. MBOM – Revestimiento superior	21
Tabla 3–7. MBOM – Revestimiento superior, inferior y costillas	23
Tabla 3–8. MBOM – Larguero Frontal	24
Tabla 3–9. MBOM – Revestimiento superior, inferior y costillas	25
Tabla 3–10. MBOM – Fairing	26
Tabla 3–11. MBOM – Montante del Alerón	27
Tabla 3–12. MBOM – Covers	29
Tabla 4–1. Tipos de operaciones en la aplicación Process Planning	34
Tabla 4–2. Tipos de restricción o link entre operaciones	36
Tabla 4–3. Tipos de recursos disponibles en <i>Equipment Allocation</i> [10]	39
Tabla 4–4. Lista de operaciones del cajón alar	42
Tabla 4–5. Recursos disponibles para el ensamblaje cajón alar izquierdo	43
Tabla 4–6. Velocidades del puente grúa	54
Tabla 4–7. Velocidad de las estructuras móviles y la plataforma elevadora	55
Tabla 4–8. Tiempos de taladrado y remachado	55
Tabla 4–9. Recursos para el posicionado de las costillas	56
Tabla 4–10. Recursos para el posicionado del revestimiento superior	58
Tabla 4–11. Tiempos calculados para la traslación de cada panel del revestimiento superior	59
Tabla 4–12. Tiempos totales de operación para cada panel del revestimiento superior	59
Tabla 4–13. Recursos para el posicionado del revestimiento inferior	60
Tabla 4–14. Tiempos calculados para la traslación de cada panel del revestimiento inferior	61
Tabla 4–15. Tiempos totales de operación para cada panel del revestimiento superior	61
Tabla 4–16. Cantidad de taladros y remaches del revestimiento inferior y tiempos	62
Tabla 4–17. Tiempos de transporte y posicionamiento de los brackets y remaches	62
Tabla 4–18. Recursos para el acercamiento del revestimiento superior	64
Tabla 4–19. Recursos para el posicionamiento de las celosías	66
Tabla 4–20. Tiempos de montaje de las barras Outer de las celosías	68
Tabla 4–21. Recursos para el taladrado del revestimiento superior a costillas y barras Outer	69
Tabla 4–22. Cantidad de taladros y tiempos del revestimiento superior con costillas y celosías	69

Tabla 4–23. Recursos para el cambio de las barras Outer por Inner	70
Tabla 4–24. Tiempos de montaje de las barras Inner de las celosías y desmontaje de las Outer	71
Tabla 4–25. Recursos para el taladrado del revestimiento superior a las barras Inner	72
Tabla 4–26. Tiempos de taladrado de las barras Inner	72
Tabla 4–27. Recursos para el alejamiento del revestimiento superior y acercamiento del inferior	73
Tabla 4–28. Recursos para el taladrado del revestimiento inferior	75
Tabla 4–29. Número de taladros del revestimiento inferior a costillas y celosías	75
Tabla 4–30. Tiempo de intercambio de las barras de celosía y el útil	75
Tabla 4–31. Recursos para el taladrado del revestimiento inferior	79
Tabla 4–32. Recursos para el taladrado del ángulo de las costillas	81
Tabla 4–33. Número de taladros de los ángulos de las costillas	81
Tabla 4–34. Recursos para el taladrado del ángulo de las costillas	83
Tabla 4–35. Número de taladros del revestimiento inferior a las costillas y celosías	83
Tabla 4–36. Recursos para el posicionado del larguero frontal	85
Tabla 4–37. Tiempos de posicionamiento del larguero frontal	86
Tabla 4–38. Número de taladros del larguero frontal a las costillas	86
Tabla 4–39. Recursos para el taladrado de las covers	87
Tabla 4–40. Número de covers y taladros de los revestimientos	88
Tabla 4–41. Recursos para las operaciones de finalización de la Fase I	89
Tabla 4–42. Recursos para el posicionamiento del cajón alar en la Estación Horizontal	91
Tabla 4–43. Tiempos de posicionamiento del cajón alar para la Fase II	92
Tabla 4–44. Recursos para el posicionado del larguero anterior	93
Tabla 4–45. Tiempos de posicionamiento del larguero anterior	93
Tabla 4–46. Número de taladros del larguero anterior a las costillas	93
Tabla 4–47. Recursos para el taladrado y remachado de los largueros a los revestimientos	95
Tabla 4–48. Número de taladros y remaches de los largueros y los revestimientos	95
Tabla 4–49. Recursos para el posicionado, taladrado y remachado del fairing	96
Tabla 4–50. Secuencia de ensamblaje del fairing	97
Tabla 4–51. Recursos para el montante del alerón de punta de ala	99
Tabla 4–52. Recursos para el taladrado y remachado de las covers de los largueros	100
Tabla 4–53. Número de covers de los largueros	100
Tabla 6–1. Duración y tiempo total del proceso	112
Tabla 6–2. Duración del proceso para el escenario de máximo rate	116
Tabla 6–3. Duración del proceso para el escenario de baja demanda	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Material de partida del estudio	3
Figura 1-2. Elementos de unión considerados	4
Figura 2-1. Cabecera de 3DExperience	9
Figura 2-2. Aplicaciones de 3DExperience utilizadas	9
Figura 3-1. Definición MBOM	11
Figura 3-2. Definición de Scope del MBOM	13
Figura 3-3. Interfaz de la aplicación Manufactured Item Definition	13
Figura 3-4. BOM – Cajón Alar	14
Figura 3-5. BOM – Cajón Alar con detalle para cada componente	14
Figura 3-6. MBOM – Cajón Alar	16
Figura 3-7. MBOM – Costillas y celosías	18
Figura 3-8. Costillas y celosías	18
Figura 3-9. MBOM – Revestimiento inferior	19
Figura 3-10. Revestimiento inferior	19
Figura 3-11. MBOM – Revestimiento inferior con costillas y celosía	20
Figura 3-12. Revestimiento inferior con costillas y celosía	20
Figura 3-13. Herraje superior de las costillas	21
Figura 3-14. MBOM – Revestimiento superior	22
Figura 3-15. Revestimiento superior	22
Figura 3-16. MBOM – Revestimiento superior, inferior y costillas	23
Figura 3-17. Revestimiento superior, inferior y costillas	23
Figura 3-18. MBOM – Larguero Frontal	24
Figura 3-19. Larguero Frontal	25
Figura 3-20. MBOM – Revestimiento superior, inferior y costillas	25
Figura 3-21. Revestimiento superior, inferior y costillas	26
Figura 3-22. MBOM – Fairing	26
Figura 3-23. Fairing	27
Figura 3-24. MBOM – Montante del Alerón del Wingtip	28
Figura 3-25. Ángulo del Wingtip	28
Figura 3-26. Montante del Alerón del Wingtip	28
Figura 3-27. MBOM – Covers	29
Figura 3-28. Covers	30
Figura 3-29. Tack Rivets	30
Figura 3-30. Validación del MBOM con BI Essential	31

Figura 3-31. Árbol completo del MBOM	32
Figura 4-1. Definición del Process Planning [9]	33
Figura 4-2. Definición del Scope del Manufacturing System	35
Figura 4-3. Interfaz de la aplicación Process Planning	35
Figura 4-4. Detalle del Diagrama de Gantt de un proceso	36
Figura 4-5. Time Analysis y maxiMOST datacard	37
Figura 4-6. Parámetros del General Move de maxiMOST	37
Figura 4-7. Definición del Resource-System Scope y asignación de los recursos [10]	40
Figura 4-8. Asignación de recursos a operaciones mediante el Assignment Manager	40
Figura 4-9. Interfaz de la aplicación Equipment Allocation [9]	41
Figura 4-10. Ilustración de un catálogo de recursos	41
Figura 4-11. Detalle de la estación vertical	44
Figura 4-12. Detalle de la estructura lateral izquierda para el revestimiento inferior	45
Figura 4-13. Detalle de la estructura lateral derecha para el revestimiento superior y marco universal	45
Figura 4-14. Fotografías del marco universal [3]	46
Figura 4-15. Detalle de los posicionadores para costillas y celosías	47
Figura 4-16. Detalle de la estación horizontal	47
Figura 4-17. Foto del sistema automático de taladrado	48
Figura 4-18. Detalle del posicionador del fairing	48
Figura 4-19. Detalle del puente grúa	49
Figura 4-20. Ejemplo de la taladradora	49
Figura 4-21. Ejemplo de la remachadora	50
Figura 4-22. Detalle de operarios en la estación horizontal	50
Figura 4-23. Detalle de posicionador de larguero anterior	51
Figura 4-24. Distribución de las estaciones de montaje	52
Figura 4-25. Velocidades y movimientos del puente grúa	54
Figura 4-26. Posicionamiento de las costillas	56
Figura 4-27. Sistema de las operaciones para el posicionamiento de las costillas	56
Figura 4-28. Estimación del tiempo del posicionamiento de una costilla	57
Figura 4-29. Diagrama de Gantt del posicionamiento de las costillas	57
Figura 4-30. Posicionamiento del revestimiento superior	58
Figura 4-31. Estimación del tiempo de ajuste de un panel al puente grúa o a la estructura	59
Figura 4-32. Sistema de las operaciones para el posicionamiento del revestimiento superior	60
Figura 4-33. Detalle de los remaches entre paneles del revestimiento inferior	61
Figura 4-34. Sistema de las operaciones para el posicionamiento del revestimiento inferior	62
Figura 4-35. Diagrama de Gantt del posicionamiento del revestimiento inferior	63
Figura 4-36. Acercamiento del revestimiento superior	64
Figura 4-37. Estimación del tiempo de acercamiento de los paneles	65
Figura 4-38. Diagrama de Gantt del acercamiento del revestimiento superior	65

Figura 4-39. Posicionamiento de las barras de la celosía	66
Figura 4-40. Útil para almacenaje de las barras de las celosías	67
Figura 4-41. Tiempo de posicionamiento de una barra de la celosía	67
Figura 4-42. Diagrama de Gantt del posicionamiento de las barras Outer	68
Figura 4-43. Diagrama de Gantt del taladrado del revestimiento superior a las costillas y barras Outer	70
Figura 4-44. Tiempo de desmontaje de una barra de la celosía	70
Figura 4-45. Tiempo de cambio de posición del útil de soporte de las celosías	71
Figura 4-46. Diagrama de Gantt del cambio de las barras Outer por Inner	71
Figura 4-47. Diagrama de Gantt del taladrado del revestimiento superior a las barras Outer	73
Figura 4-48. Situación después del acercamiento del revestimiento inferior	74
Figura 4-49. Diagrama de Gantt del después del acercamiento del revestimiento inferior	74
Figura 4-50. Imagen de la retirada del útil de las celosías	76
Figura 4-51. Diagrama de Gantt del taladrado del revestimiento inferior a las costillas y barras Inner	76
Figura 4-52. Diagrama de Gantt del cambio de las barras para taladrado del revestimiento inferior	77
Figura 4-53. Diagrama de Gantt del taladrado de las celosías Outer al revestimiento inferior	78
Figura 4-54. Diagrama de Gantt del desmontaje del útil de soporte de las celosías	78
Figura 4-55. Diagrama de Gantt del remachado del revestimiento inferior a las costillas	80
Figura 4-56. Detalle del ángulo de las costillas	81
Figura 4-57. Diagrama de Gantt del remachado del revestimiento inferior a las costillas	82
Figura 4-58. Posicionamiento de ambos revestimientos junto al marco central	82
Figura 4-59. Diagrama de Gantt del remachado del revestimiento superior a las costillas	84
Figura 4-60. Posicionamiento del larguero frontal	85
Figura 4-61. Diagrama de Gantt del posicionamiento del larguero frontal	86
Figura 4-62. Taladros de las covers de los revestimientos (izquierda: inferior, derecha: superior)	87
Figura 4-63. Diagrama de Gantt del taladrado de las covers de los revestimientos	88
Figura 4-64. Tiempos de las operaciones de finalización de la Fase I	89
Figura 4-65. Lista de sistemas y tiempos de la Fase I	90
Figura 4-66. Posicionamiento del cajón alar para la Fase II	91
Figura 4-67. Foto del posicionamiento del cajón alar en la Estación Horizontal [3]	92
Figura 4-68. Operaciones para el posicionamiento del cajón alar en la Estación Horizontal	92
Figura 4-69. Diagrama de Gantt del posicionado del larguero anterior y remachado a las costillas	94
Figura 4-70. Taladrado automático de los largueros a los revestimientos	94
Figura 4-71. Diagrama de Gantt del taladrado y remachado de los largueros a los revestimientos	95
Figura 4-72. Posicionamiento, taladrado y remachado del fairing	96
Figura 4-73. Diagrama de Gantt para montaje del fairing	98
Figura 4-74. Posicionamiento, taladrado y remachado del fairing	98
Figura 4-75. Diagrama de Gantt para el montante del alerón en el Wingtip	99
Figura 4-76. Covers y handholes de los revestimientos	100
Figura 4-77. Diagrama de Gantt del taladrado de las covers de los revestimientos	101

Figura 4-78. Sistemas de la Fase II y Fase III	101
Figura 5-1. Trayectorias en <i>Assembly Evaluation</i>	103
Figura 5-2. <i>Experience Player</i>	104
Figura 5-3. Trayectorias de las costillas y barras de celosía	105
Figura 5-4. Trayectorias de los paneles de los revestimientos	105
Figura 5-5. Trayectoria de las estructuras móviles	106
Figura 5-6. Trayectoria del cajón alar desde la Fase I hasta la Fase II	106
Figura 5-7. Trayectoria de los largueros	107
Figura 5-8. Trayectoria del sistema de taladrado por CN	108
Figura 5-9. Trayectoria del montaje del fairing	108
Figura 6-1. <i>Workload Balancing</i> del proceso completo	110
Figura 6-2. <i>Workload Balancing</i> de la Fase I	111
Figura 6-3. <i>Workload Balancing</i> de la Fase II	111
Figura 6-4. <i>Workload Balancing</i> de la Fase III	111
Figura 6-5. Diagrama de Gantt del proceso completo	112
Figura 6-6. <i>Workload Balancing</i> de los recursos de la Estación Vertical (Fase I)	113
Figura 6-7. <i>Workload Balancing</i> de los recursos de la Estación Horizontal (Fase II y III)	114
Figura 6-8. Reducción de tiempos en la Fase I en caso de máximo rate	115

1 INTRODUCCIÓN

*Strive for perfection in everything you do. Take the best that exists and make it better.
When it does not exist, design it.*

Sir Henry Royce

En un ámbito de estudio como es la ingeniería de fabricación y la ingeniería de procesos, donde a menudo se requiere de softwares de diseño y fabricación asistidos por ordenador para la realización de simulación y modelos cada vez más potentes y que se adapten a los nuevos retos que las diferentes industrias enfrentan de forma constante, se incluye este trabajo de estudio sobre la simulación de la maqueta digital industrial para el ensamblaje de un ala de avión.

Para llevar este trabajo a cabo se utilizará la plataforma 3DExperience, la cual representa una evolución de este tipo de herramientas debido a que implementa mejoras sustanciales con respecto a otras anteriores, facilitando aspectos que actualmente o en un futuro próximo demandarán las diferentes industrias, tales como la ingeniería concurrente, el desarrollo de proyectos de forma transparente y colaborativa, la mejora en la gestión y uso de los datos o el auge previsto de la economía de servicios.

En el presente trabajo se desarrollará el modelado y simulación del proceso de ensamblaje del cajón alar de una aeronave comercial, partiendo de un producto final ya diseñado y una serie de recursos disponibles, correspondiéndose este caso de uso con las actividades habituales de un Planificador de Procesos en cualquier industria.

En este primer capítulo se incluye una descripción de los objetivos y el alcance del trabajo, así como los antecedentes, su punto de partida y la estructura de este documento.

1.1 Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo del trabajo es definir y simular un proceso industrial partiendo de su maqueta digital, la cual es un ala de avión. Se ha utilizado para ello la herramienta 3DExperience y sus aplicaciones dedicadas al diseño de procesos de fabricación.

Se partirá de la maqueta del cajón alar, así como de la maqueta de una lista no exhaustiva de recursos para su fabricación, por lo que se procederá a diseñar la secuencia de ensamblaje de los diferentes componentes en base a los recursos y la tipología del diseño de este producto.

La forma de llegar a la solución final que se detalla en este documento ha sido a través de distintas iteraciones sobre el proceso completo y con la ayuda de las diferentes aplicaciones que ofrece 3DExperience. Se partió para ello de un proceso en el que se consideraban únicamente los grandes conjuntos del cajón (costillas, revestimientos y largueros) para ser capaz de desarrollar rápidamente un primer modelo sencillo. Posteriormente se fueron incluyendo los diferentes detalles del ala y las restricciones que imponen su estructura de fabricación, así como los recursos disponibles, hasta llegar a la solución que aquí se describe.

Por tanto, el alcance de este estudio incluye los siguientes componentes:

- Estructura de fabricación del producto (*Manufacturing Bill of Material, MBOM*) con la secuencia de ensamblaje válida en función de los recursos disponibles.
- Operaciones para la fabricación del cajón alar, así como la secuencia en la que se realizan, formando así el plan del proceso.
- Recursos necesarios para cada operación, así como su disposición en planta.

- Validación de la secuencia de ensamblaje, operaciones y recursos a través del análisis de las trayectorias asociadas al proceso y la disposición en planta.

Posteriormente, se llevará a cabo un análisis de los tiempos de operación totales, así como, un estudio de ocupación de los diferentes recursos. Esto permitirá evaluar la solución obtenida y definir cuáles son las variables más relevantes del proceso, a la vez que se detectan posibles ajustes en estas para conseguir plantear varios escenarios en el proceso de fabricación y su posible solución óptima asociada. Dichos escenarios serán: supuesto de alta demanda (se requiere reducir los tiempos de producción totales) y el supuesto de baja demanda (se requiere reducir la capacidad productiva)

Será necesario definir una serie de hipótesis que permitan llevar a cabo el diseño del proceso. Estas estarán en su mayoría enfocadas en definir el tiempo que tomará cada operación del proceso. La lista de estas hipótesis se podrá encontrar detallada en la sección dedicada 4.3.3.

En algunos casos se realizará un modelado simple de algunos recursos que no se tienen de partida o que serán necesarios para sustentar las hipótesis o llevar a cabo las operaciones según se han definido, como se detalla en 1.3, pero no se incluye en el alcance del trabajo el modelado de más partes del ala de las recibidas, así como el diseño completo de utillajes, debido a la alta complejidad y extensión que estos requieren.

1.2 Estado del Arte

Como antecedentes y Estado del Arte del presente trabajo se considera una serie de proyectos académicos realizados por alumnos del Departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación, los cuales están enfocados a la realización de estudios similares al que aquí se trata.

A destacar, se tiene el documento “Definición con 3DExperience de la secuencia de montaje del cajón del ala de una aeronave” [1], donde la autora realiza una primera definición de la secuencia de ensamblaje de la misma maqueta del ala que en este proyecto se trata, listando a muy alto nivel cuales serían las operaciones necesarias para su fabricación. Para llegar a lista preliminar de operaciones, se realiza en primer lugar una documentación y descripción detallada de todos los recursos de los que se dispone y son necesarios en el proceso, de modo que se permita comprender la lógica de uso de los más relevantes, y poder definir así las directrices generales de una secuencia de ensamblaje que sería factible de realizar.

El estudio [1] supone un interesante punto de partida para el que se describe en el presente documento, debido al alto nivel de detalle que se incluye sobre el utillaje, así como, un primer supuesto de secuencia de ensamblaje factible. Además, la autora incluye un supuesto anterior el cual resulta no factible, lo que también es relevante para considerar las razones que lo hacen no realizable.

Sin embargo, es necesario realizar un diseño y simulación completos, como el que se detalla en el presente documento, para definir y validar cual es la secuencia de ensamblaje totalmente válida. Esto es debido a que, durante la definición de las operaciones, asignación de recursos y comprobación de las trayectorias, aparecerán situaciones que pueden suponer que la secuencia de ensamblaje propuesta no sea factible y que son fácilmente susceptibles de no considerarse si no se detalla el proceso completo. Es por esto por lo que la solución que se ha incluido en el presente trabajo es fruto de la iteración, diseño *End-to-End* del proceso y su posterior validación, como se ha descrito en la sección 1.1.

Complementariamente a la referencia antes mencionada, ha sido también relevante el estudio “Definición y simulación con 3DExperience de la maqueta digital industrial para el ensamblaje del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R” [2], en la cual se realiza una definición, simulación y validación de un proceso de ensamblaje de un motor turbohélice. Los resultados y conclusiones que se incluyen en esta referencia, así como el proceso seguido para llegar a estos, supone una referencia válida para el trabajo de este documento, así como un soporte extra para comprender el uso de 3DExperience.

1.3 Punto de partida e hipótesis iniciales

Las variables de entrada o punto de partida del trabajo será el producto a fabricar y los recursos necesarios para ello, los cuales serán los listados a continuación y representados en la Figura 1-1.

- Cajón alar izquierdo de una aeronave comercial de tamaño mediano
- Grada de fabricación o Estación de montaje Vertical
- Grada de fabricación o Estación de montaje Horizontal

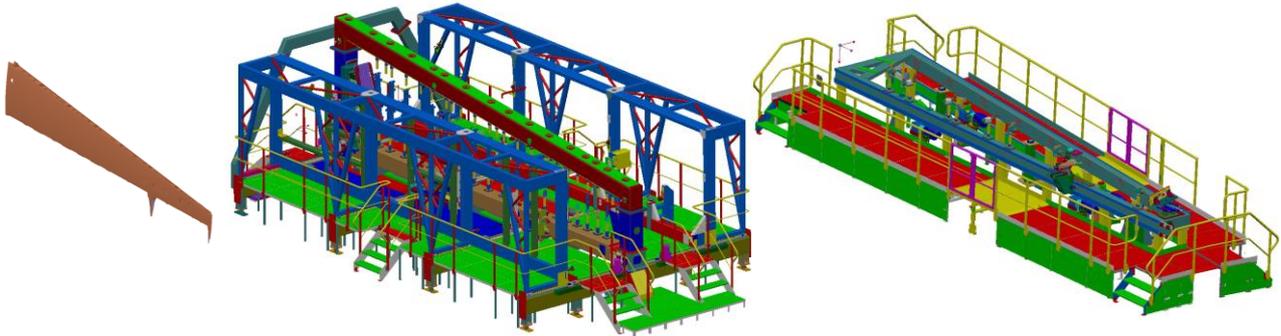


Figura 1-1. Material de partida del estudio

Estos modelos no son completamente exhaustivos, sino que no disponen de ciertos detalles o componentes.

En el caso de la maqueta del cajón alar no se incluye una serie de partes interiores del ala, las cuales forman varias celosías que van unidas a los revestimientos. Afortunadamente, esto solo tiene un impacto negativo en la representación 3D del ala, por lo que en el alcance de este trabajo se va a considerar que se dispone de estas celosías al completo y se va a modelar el proceso de ensamblaje considerándolas, como se puede ver en 3.2.1. La documentación soporte [3] ayuda a comprender cual es la configuración que estos elementos requieren.

En cuanto a la Estación Vertical, su maqueta no incluye el útil necesario para el transporte del cajón resultante de esta grada hacia las gradas posteriores. Esto es, un marco universal que sirve para el montaje de uno de los revestimientos y la posterior sujeción del cajón alar completo. Puesto que no se dispone de la representación 3D de este útil y resulta clave para describir y modelar el proceso de ensamblaje, se realizará una representación gráfica simplificada siguiendo las fotos disponibles en [3] como referencia, esta está descrita en 4.3.2.4.

Por último, el modelo de la estación Horizontal no dispone de unos de los elementos clave como es un sistema de taladrado automático. Se estima conveniente realizar un modelo gráfico simplificado que ayude a detallar las operaciones y completar el análisis de las trayectorias en esta estación. De nuevo, se usa como referencia las ilustraciones incluidas en [3] y el resultado se puede ver en 4.3.2.7.

Estos son los elementos de partida del presente trabajo, adicionalmente se requiere considerar una serie de hipótesis iniciales que definirán la forma en la que se ha desarrollado el modelado, simulación y validación del proceso. Dichas hipótesis y consideraciones iniciales son:

- Para definir las diferentes operaciones del proceso de fabricación, se consideran las operaciones de transporte, posicionamiento, montaje, taladrado y remachado. Otras adicionales como, por ejemplo, operaciones de verificación y de control de calidad, aplicación de elementos sellantes o químicos, así como operaciones de mantenimiento de la maquinaria industrial empleada, no se consideran en este modelo.
- Se considerará que las operaciones de unión y previas a la unión, esto es, taladrado y remachado, son todas de la misma tipología, por lo que no se tendrá en cuenta que el cajón alar pueda tener varios tipos de elementos de unión para cada una de sus secciones. Se considerará que todos son de un modelo estándar aeronáutico del tipo hi-lok, el cual es de uso extendido en esta industria [4], formado por un bulón y collar, como se puede ver en la Figura 1-2, donde se incluye una foto de la representación 3D que se ha recibido con el modelo del cajón alar, una imagen real del mismo y un modelo descriptivo con sus dos componentes. Con esto, el taladrado y remachado se podrá definir en función de unas características promedio que serán constantes durante todo el proceso.



Figura 1-2. Elementos de unión considerados

- La duración temporal de cada una de las operaciones será estimada en base a una serie de hipótesis concretadas en el apartado 4.3.3 y siguiendo una serie de modelos que en dicho apartado se detallan.
- Los recursos disponibles serán los detallados anteriormente como punto de partida y se considerará que estos tienen la utilidad y capacidad que se detalla en la documentación de referencia [3]. Para recursos secundarios como pueden ser herramientas de mano o elementos de transporte, se supondrá que se dispone de un equipamiento estándar en la industria aeronáutica, sin necesidad de disponer de la maqueta 3D de estos elementos. Una descripción detallada de los recursos se puede encontrar en 4.3.2.
- Para el modelado de las operaciones y estimación de los tiempos de estas, se considera que no se tiene desviación de ningún tipo, que pueda causar retrasos y paradas del proceso productivo, como se podría tener en las operaciones industriales en una situación real.

1.4 Estructura del Documento

El documento se ha estructurado de forma que el lector siga el orden definido por cada uno de los capítulos y sea capaz de entender todas las particularidades del trabajo y del modelo realizado.

Es por esto por lo que se recomienda comenzar con el presente Capítulo 1 para que se conozca de antemano el objetivo, alcance y el Estado del Arte, así como el punto de partida y las hipótesis iniciales.

Posteriormente, en el Capítulo 2 se hace una breve reseña de la herramienta 3DExperience debido a que es la piedra angular del trabajo y la que permite llevar a cabo el modelo y simulación del proceso. También se incluye una breve descripción de esta que se amplía en capítulos posteriores, conforme se han utilizado las aplicaciones de esta herramienta.

En el Capítulo 3 se incluye la descripción de la estructura de fabricación con todos los subcomponentes en los que se ha dividido el cajón alar, dispuestos en su orden lógico según su secuencia de ensamblaje. Este capítulo será la base para posteriormente definir las operaciones necesarias para el ensamblaje y la asignación de los recursos a dichas operaciones.

En el Capítulo 4 se ha querido incluir todo lo relativo al plan del proceso de ensamblaje y los recursos utilizados. Se comenzará con la lista de operaciones a realizar y la lista de recursos disponibles, a continuación, se describen las hipótesis específicas para dichas operaciones. Por último, se detalla cada uno de los sistemas en los que se ha dividido el proceso de fabricación, incluyendo sus principales características como son: recursos asignados, tiempos de cada operación y tiempo total del sistema.

En el Capítulo 5 se podrá encontrar la validación del proceso definido en el capítulo 4 utilizando para ello un análisis de trayectorias de las operaciones. Esto será relevante para asegurar que la secuencia de fabricación y el uso de los recursos es el correcto y es realizable.

Por último, en el Capítulo 6 se han incluido una serie de análisis de los resultados de los capítulos anteriores, detallando cuales son las principales características del proceso completo y sus variables. Adicionalmente se han planteado modificaciones en dicho modelo o en las variables de entrada que pueden dar lugar a soluciones óptimas para escenarios que en este capítulo se comentan.

El documento termina con el Capítulo 7 donde se encuentran las conclusiones generales del proyecto y propuestas para trabajos futuros.

2 INTRODUCCIÓN A 3DEXPERIENCE

*Projects we have completed demonstrate what we know.
Future projects decide what we will learn.*

Dr. Mohsin Tiwana

En este capítulo se hará una introducción a la herramienta utilizada para realizar el modelado y simulación del presente trabajo. Dicha herramienta es 3DEXperience, una plataforma que engloba soluciones para llevar a cabo el diseño y fabricación asistidos por ordenador, simulación multi-física y de procesos, así como una serie de funcionalidades que permiten trabajar de forma colaborativa e interconectada.

Esta herramienta ha sido desarrollada por Dassault Systèmes y representa la evolución e integración de las soluciones que dicha empresa ya ofrecía al mercado para cubrir las diferentes necesidades de las industrias.

Dassault Systèmes entró en el mercado del software de simulación CAD (*Computer Aided Design*) / CAM (*Computer Aided Manufacture*) en 1981, cuando fue creada como una spin-off de la empresa aeronáutica Dassault Aviation, siendo su primer producto de diseño asistido por ordenador la herramienta CATIA. Posteriormente, esta empresa francesa se ha ido forjando como un referente para las grandes industrias, como la automovilística, la aeronáutica o la naval, consiguiendo contratos y asociaciones con grandes referentes como IBM, BMW, Mercedes, Honda, Boeing o Airbus. [5]

Dassault Systèmes ha ido evolucionando CATIA a lo largo de su historia a través de nuevas versiones (desde la V1 hasta la V5) para que esta siga siendo un referente a medida que avanzaba la tecnología de diseño asistido. Adicionalmente, ha desarrollado o adquirido otras soluciones y herramientas de mayoritariamente relacionadas con el diseño y simulación, como pueden ser DELMIA para planificar procesos industriales, GEOVIA para modelar fenómenos físicos del planeta o ENOVIA para la gestión del ciclo de vida del producto, hasta llegar al lanzamiento de la plataforma 3DEXperience en 2011, la cual es considerada por una expansión de la estrategia de la compañía debido a que unifica muchas de las otras soluciones que ya disponía la empresa.

Esta herramienta sigue desarrollándose en el marco de la mejora continua, ofreciendo mejores capacidades y funcionalidades con cada actualización, hasta llegar hoy en día a la versión R2021, la cual es la utilizada en este trabajo.

En las siguientes secciones se detallan las principales funcionalidades y características de esta plataforma, así como la aplicación y las posibilidades que ha ofrecido para desarrollar el modelo que en este estudio se utiliza.

2.1 Descripción de la plataforma 3DEXperience

“3DEXperience platform, a game changer for business and innovation” [6] es así como han definido la herramienta sus creadores. 3DEXperience es una apuesta en firme por la empresa Dassault Systèmes por generar un entorno colaborativo y basado en la nube, que dé lugar a las empresas y asociaciones a impulsar la innovación y potenciar sus negocios a través de gestionar sus proyectos de CAD, CAM, PLM (*Product Lifecycle Management*) en una única plataforma.

La economía de servicios es un modelo de negocio donde toda la actividad económica es susceptible de ser tratada como un servicio. Los expertos coinciden en que la demanda de los servicios digitales aumentará significativamente en un futuro próximo y será necesario un cambio disruptivo en los procesos que crean valor para esto, desde la definición, planificación y desarrollo del producto o servicio, hasta que se realice la producción, operación o mantenimiento.

Es en este entorno es donde 3DEXperience es capaz de ofrecer su máximo potencial. Esta plataforma ofrece una solución completa para llevar a cabo los procesos de diseño, ingeniería de fabricación, producción o

planificación estando, además, de forma totalmente conectada en la nube, lo que ofrece muchas ventajas en términos de gestión de información y colaboración con respecto a otras herramientas.

Dassault Systèmes ha integrado en 3DEXperience sus principales softwares de diseño y simulación, consiguiendo potenciar las grandes capacidades que ofrecen para las aplicaciones de proyectos de diseño, simulación y fabricación.

A continuación se listan las principales herramientas que han sido integradas en 3DEXperience [7]:

- DELMIA: utilizada para planificación y simulación de un proceso productivo y para su control y optimización.
- CATIA: es utilizada para diseño de producto asistido por ordenador (CAD), construcción multidisciplinar y sistemas de ingeniería.
- SIMULIA: ofrece un amplio porfolio de productos de simulación avanzada de multi-física, integración u optimización de un producto.
- ENOVIA: ideado para la gestión del ciclo de vida de un producto (PLM), incluyendo la planificación, control y monitorización de procesos ingenieriles.
- EXALEAD: herramienta ideada para analizar grandes cantidades de datos y realizar aplicaciones de Analítica de Negocio.

Las principales funcionalidades de estos softwares han sido divididas en forma de aplicaciones o “apps” y se han integrado dentro de 3DEXperience, por lo que un usuario puede acceder a ellas a través la plataforma e ir desarrollando su modelo utilizando una u otra de forma consecutiva, según sus necesidades.

Las funcionalidades particulares de 3DEXperience van más allá de facilitar el disponer de un porfolio de herramientas y aplicaciones completo y centralizado. Otras de las muchas ventajas principales son:

- Gestión de información en la nube:

Todas las funcionalidades de 3DEXperience interaccionarán directamente con la información disponible en la nube, ya sea pública o privada, la cual está optimizada al máximo para ofrecer la información de forma clara, transparente, configurable y accesible.

Esto supone una gran ventaja a las empresas o entidades en lo que a gestión de información se refiere, evitando problemas inherentes en la gestión de datos como pueden ser: el control de versiones, la modificación de derechos y permisos, y la pérdida de información. Además, esta nube es robusta en lo que a seguridad se refiere, previniendo a los usuarios de ser víctimas de ciberataques que pongan en peligro su integridad o la de su organización.

- Herramientas de colaboración:

Un aspecto que mejora con creces en 3DEXperience con respecto al porfolio de herramientas anteriores, es la posibilidad de trabajar de forma totalmente colaborativa. La plataforma incluye además una alta cantidad de funciones para permitir y fomentar la cooperación entre clientes, desarrolladores, fabricantes, partners y proveedores.

Esto permite la involucración en el proyecto de todos sus actores para que puedan interactuar y trabajar juntos en todas las fases del ciclo de vida del producto o proyecto. Como resultado, se consigue que todas las funciones puedan aportar ideas y tener total transparencia del proceso, así como tener en cuenta el feedback directo del cliente, lo que asegura una ejecución óptima del proyecto y que el resultado final sea exitoso.

Adicionalmente a estas ventajas, 3DEXperience ha desarrollado la posibilidad de funcionar como un mercado de servicios digitales (*marketplace*). Este está basado en las herramientas de colaboración e información interconectada a través de la nube antes descritas, donde clientes pueden estar directamente conectados con fabricantes, diseñadores, o proveedores de servicios de ingeniería o de fabricación, y realizar la gestión integral a través de la plataforma: desde las cotizaciones a los pagos por la realización de dichos servicios. [8] Esta funcionalidad es una fuerte apuesta para fomentar la economía de servicios, la cual, como se introducía al inicio del capítulo, se estima que tendrá un fuerte auge en el futuro cercano y requerirá un cambio disruptivo como el que 3DEXperience ofrece.

En la Figura 2-1 se ha incluido el aspecto de la cabecera de la plataforma, donde lo más característico es el *compass* con el “play” en el medio que incita a iniciar la experiencia 3DEXperience, convirtiéndose en la imagen de la plataforma. En la corona alrededor de este, se puede encontrar los pilares fundamentales de la herramienta, como son: Colaboración y Social Media (arriba), Información Inteligente (derecha), Contenido y Simulación (abajo) y Diseño en 3D (izquierda). Debajo de esto, se encuentran 3 burbujas con Yo, Compañía y el Mundo, que divide las funcionalidades distintas con las que el usuario puede interaccionar, trabajar y colaborar.

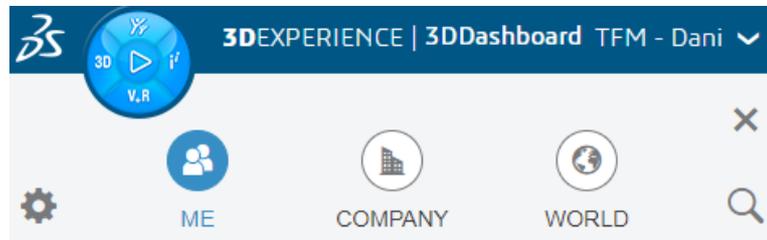


Figura 2-1. Cabecera de 3DEXperience

En resumen, la plataforma 3DEXPERIENCE es un entorno colaborativo que permite a las empresas y a las personas innovar de formas completamente nuevas y crear productos y servicios utilizando experiencias virtuales. Proporciona una vista en tiempo real de la actividad empresarial y el ecosistema, conectando personas, ideas y datos. [6]

A continuación, se introducirá brevemente las aplicaciones y funcionalidades de 3DEXperience que se ha tenido la oportunidad de aplicar al desarrollo de este trabajo.

2.2 Funcionalidades utilizadas

No todas las funcionalidades antes comentadas en la sección 2.1 han se aplicado en el alcance de este trabajo. Tal y como se ha definido en el Capítulo 1, este trabajo se centra en la definición del proceso de ensamblaje de un producto (el cajón alar izquierdo), tomando como punto de partida la lista de partes de este (*BOM*) y unos recursos determinados para su ensamblaje y fabricación, por lo que las aplicaciones principales utilizadas son aquellas que están relacionadas con el diseño, definición y simulación de la planificación y el proceso productivo.

A continuación, se hará una breve introducción de las aplicaciones utilizadas que será complementado en las 3.1, 4.1, 4.2 y 5.1. Estas aplicaciones se muestran en la Figura 2-2.



Figura 2-2. Aplicaciones de 3DEXperience utilizadas

2.2.1 Manufactured Item Definition

Esta aplicación es la diseñada para realizar la definición de la lista de materiales de fabricación o MBOM (*Manufacturing Bill of Material*).

En el MBOM se incluyen todas las piezas, partes y conjuntos que forman el producto, dispuestas en la estructura jerárquica idónea para generarlo. Para realizar esto, se requiere definir una serie de relaciones entre las partes, lo que estará basado en vínculos que la aplicación permite crear para cada uno de los componentes del BOM.

2.2.2 Process Planning

En esta aplicación se puede diseñar la planificación y el proceso productivo para generar el producto anteriormente definido en el *Manufactured Item Definition*. Para conseguir esto, *Process Planning* permite generar una serie de sistemas de operaciones que englobarán las necesarias para realizar la fabricación o ensamblaje. Dichas operaciones estarán también vinculadas entre sí, con una serie de restricciones temporales que permitirá definir el orden y la secuencia en la que se realiza cada una de ellas.

Adicionalmente, *Process Planning* incluye funcionalidades para estimar los tiempos de las operaciones, basándose en diferentes modelos que se pueden ajustar a la mayoría de las situaciones que se puedan presentar en la industria.

2.2.3 Equipment Allocation

En esta aplicación es donde, partiendo de la planificación del proceso y del MBOM definido en las dos aplicaciones anteriores, se realiza la asignación de los recursos necesarios para llevar a cabo las operaciones.

La aplicación *Equipment Allocation* tiene también la capacidad de situar espacialmente el recurso en cuestión, permitiendo hacer simulaciones del entorno de fabricación que se tendría en las etapas de producción.

2.2.4 Assembly Evaluation

Assembly Evaluation permite definir las trayectorias y movimientos que recorren las partes y los recursos durante el proceso de ensamblaje. Con esto se consigue definir una simulación de las operaciones de fabricación y hacer distintos análisis para descartar posibles interferencias y validar que la secuencia y procesos definidos en las aplicaciones anteriores son realizables. El detalle completo de esta aplicación se ha incluido en la sección 5.1.

2.2.5 Otras aplicaciones

Las aplicaciones definidas en las secciones desde la 2.2.1, hasta la 2.2.4 son las principales utilizadas para definir el proceso productivo de este trabajo. Adicionalmente se han utilizado otras aplicaciones secundarias que se describirán brevemente a continuación:

- *Planning Structure*: Es una aplicación intermedia entre *Process Planning* y *Equipment Allocation*, ya que combina las herramientas de *Process Planning* para generar la planificación del proceso y las de *Equipment Allocation* para asignar los productos.
- *Assembly Design*: es la aplicación para diseño de conjuntos de partes originaria de CATIA. También se ha utilizado las funciones para modelar algunos recursos en 3D y llevar a cabo su simulación, como se verá en la sección 4.3.2.
- *3D Space*: es la aplicación para gestionar la información en la nube y trabajar de forma colaborativa. El punto de partida del trabajo es el producto a fabricar y los recursos que se han recibido a través de esa aplicación.
- *Collaborative Lifecycle*: esta aplicación permite gestionar las diferentes versiones de un mismo objeto, siendo posible generar duplicados y versiones de un modelo para así probar varias simulaciones partiendo de un punto común y ajustando ciertas variables en cada uno.

Cabe recalcar que la mayoría de las aplicaciones descritas en la sección 2.2 cuentan con sus propias funciones de análisis y simulación, lo que permite optimizar cada una de las partes del modelo que en ellas se desarrollan.

3 LISTA DE COMPONENTES Y SECUENCIA DE ENSAMBLAJE DEL CAJÓN ALAR (MBOM)

Manufacturing is more than just putting parts together. It's coming up with ideas, testing principles and perfecting the engineering as well as final assembly.

James Dyson

En este capítulo se detallará la estructura de fabricación del cajón alar, indicándose cada componente del mismo y su orden de en el proceso de ensamblaje (MBOM, *Manufacturing Bill of Material*). Para ello se hará uso de la aplicación *Manufactured Item Definition* de 3DEXperience.

Se comenzará con una breve introducción sobre la aplicación usada y posteriormente se detallará la solución factible y óptima a la que se ha llegado, teniendo en cuenta las diferentes restricciones del modelo del ensamblaje, las cuales vienen impuesta por el utillaje auxiliar y las gradas de montaje mayoritariamente.

3.1 Introducción a la aplicación *Manufactured Item Definition*

Esta aplicación es en la que en 3DEXperience se define la lista de componentes y la secuencia de ensamblaje dentro de un proceso de montaje (MBOM), siendo la base para definir las operaciones y la asignación de los recursos.

En ella se incluyen todas las piezas necesarias para fabricar producto de forma que se tenga una estructura jerárquica concreta que defina su secuencia y la relación entre las partes que lo forman. Un ejemplo de ello se puede ver en la Figura 3-1, donde partiendo de las partes más básicas, se construye jerárquicamente los conjuntos que dan lugar al producto final.

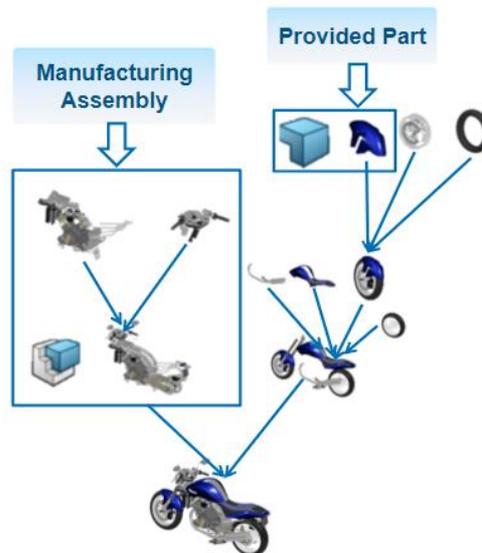


Figura 3-1. Definición MBOM

Antes de entrar en el detalle de la aplicación, se definen en la Tabla 3-1 los diferentes tipos de elementos básicos que se pueden utilizar:

Tabla 3–1. Tipos de elementos del Manufactured Item Definition

Elemento	Descripción y uso
Provided Part 	Es así como se definirán las partes o piezas simples de las en las que se puede dividir el modelo y sus diferentes conjuntos, por lo que estas serán las más básicas o del nivel más inferior en el modelado del MBOM.
Manufacturing Kit 	Este elemento se usa para definir y agrupar de forma lógica un conjunto de piezas que serán ensambladas juntas durante un paso específico del proceso de fabricación, hasta entonces permanecerán sin estar ensambladas, pero formando un kit de fabricación. Los <i>Manufacturing Kits</i> suelen estar compuestos de <i>Provided Parts</i> .
Manufacturing Assembly 	Con este tipo de objeto se definen los conjuntos o productos de un ensamblaje de piezas u otros subconjuntos. De forma general, se parte de <i>Provided Parts</i> y/o <i>Manufacturing Kits</i> para generar los <i>Manufacturing Assemblies</i> , pero a su vez también se puede generar un <i>Manufacturing Assembly</i> a partir de otros <i>Manufacturing Assemblies</i> generados en pasos anteriores del proceso.
Fasten 	Son el tipo de objeto usado para definir los elementos de unión entre piezas o subconjuntos. Aquí se pueden incluir desde soldaduras hasta tornillos, remaches y bulones.
Transform 	En este elemento se puede asignar los pasos de la fabricación en los que se requiere aplicar algún tipo de transformación a una parte o subconjunto, como por ejemplo pintura, tratamientos superficiales, doblado o mecanizado
Manufactured Part 	Se refiere a la especificación de una parte donde la parte original del diseño es diferente a la que usa en la fabricación (por ejemplo, un panel es diseñado y fabricado originalmente sin taladros, pero para su montaje se requiere realizar el taladrado durante un proceso anterior al remachado)
Continuous Provided Material 	Es el equivalente a las <i>Provided Parts</i> pero para aquellos elementos que no son una pieza singular, sino un elemento continuo, como un líquido o gas, por lo que aquí se pueden definir los elementos en términos de volumen, masa, longitud o área. También existe el Continuous Manufactured Material para elementos como cables, pinturas o sellantes.

Con los objetos definidos en la Tabla 3–1 se podrá asociar las diferentes partes y elementos que son necesarios para fabricar el conjunto en cuestión. Dependiendo del detalle y de la complejidad de cada proceso o modelo, se usarán más o menos tipos de objetos. Aquellos que se han utilizado en el modelo de este trabajo, se podrán encontrar en la siguiente sección.

La forma de vincular cada parte o elemento del producto a fabricar a los objetos detallados en la Tabla 3–1, es mediante vínculos o *Scope*, que es como se definen en la aplicación *Manufactured Item Definition*. Este *Scope* definirá la relación de cada componente del producto con cada elemento del MBOM a través los denominados *Implement Links*.

A la hora de definir estos *Implement Links* se pueden seguir varias estrategias: o bien vincular el producto final con el *Manufacturing Assembly* final del MBOM, o bien vincular cada subcomponente del elemento final con un *Manufacturing Assembly* asociado, como se puede ver en el *Scope Link 2* de la Figura 3-2. Esto permite ajustar el detalle del MBOM en los casos necesarios, y también da lugar a que se puedan aplicar lógicas de multi-localización o multi-modelo en conjunto con las operaciones y los recursos, pudiéndose así modelar casos donde parte de la fabricación esté subcontratada o externalizada, se tengan diferentes diseños del MBOM, un mismo producto esté fabricado en más de una localización o que en una localización se genere más de un producto.

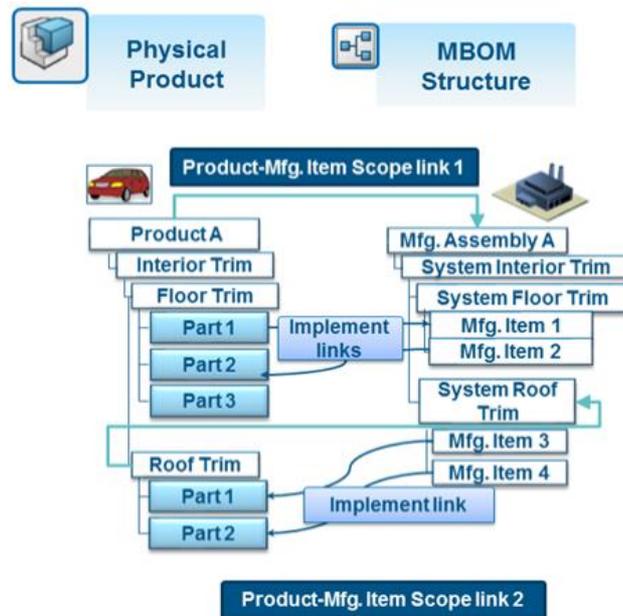


Figura 3-2. Definición de Scope del MBOM

Llegados a este punto, tan solo falta comentar cómo es la interfaz del Manufactured Item Definition y cómo el usuario interactúa con ella.

Esta se basa en una estructura creada por celdas o baldosas para cada una de las partes o subconjuntos, las cuales están ordenadas de forma jerárquica según su secuencia de montaje y unidas por flechas que indican la dirección del proceso de fabricación. Un ejemplo se puede ver en la Figura 3-3, donde para cada baldosa se muestra sobre ella una representación de la pieza o subconjunto asociada.

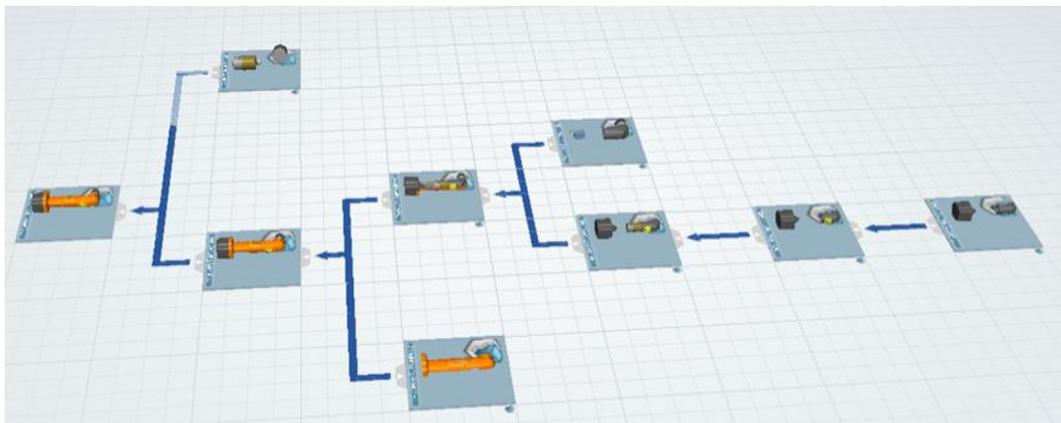


Figura 3-3. Interfaz de la aplicación Manufactured Item Definition

El usuario puede optar por varias opciones para definir esta jerarquía de baldosas, o bien creando cada una de ellas y luego hacer *drag&drop* con cada parte del BOM en cuestión y su baldosa, o bien usando otras herramientas disponibles en la aplicación como son el *Assignment Manager* o el *Spreadsheet Editor*, donde se pueden trabajar con los elementos tanto del BOM como del MBOM en forma de tabla.

Todos los conceptos resumidos en esta sección se han adquirido a través de la realización del tutorial *Creating the Manufacturing Bill of Materials Structure* del learning module de *Process Planner* [9], donde aparte de los conceptos teóricos y fundamentales, se incluyen multitud de casos prácticos que se han realizado para poner a prueba los conocimientos adquiridos mediante la práctica y afianzar la lógica de trabajo de esta aplicación de 3DEXperience.

3.2 MBOM del cajón alar

En esta sección se va a detallar la solución escogida y el racional de la misma para el MBOM del cajón alar izquierdo.

En primer lugar, se hará una recapitulación de las diferentes partes que componen el ala, lo que se entiende como *Bill of Materials*, BOM. Esta lista de materiales será el punto de partida del caso de estudio de este documento. Aparte de la lista de partes, se tiene una serie de utillajes y gradas de montaje del ala, las cuales ayudarán a definir el proceso de ensamblaje, el orden de cada pieza o subconjunto en el proceso, así como las diferentes operaciones a realizar. Estas gradas y utillaje se detallan en el siguiente capítulo.

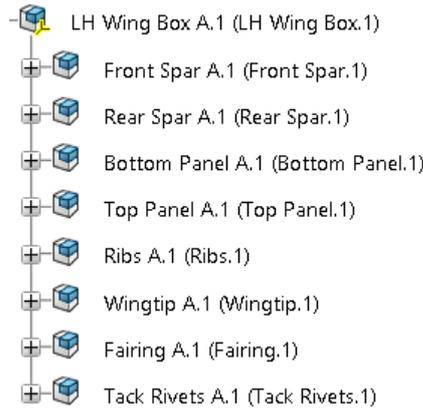


Figura 3-4. BOM – Cajón Alar

El BOM original del cajón alar izquierdo se puede ver en la Figura 3-4 donde se incluyen los principales componentes de este, mientras que en la Figura 3-5 se expanden dichos componentes para mostrar las diferentes subpartes de estos.

Con esta información se puede ver que el cajón alar está formado principalmente por los largueros (*Front y Rear Spar*) y dos revestimientos (*Bottom Panel y Top Panel*), los cuales están compuestos por varios paneles cada uno. Aparte de esto se tiene, como rigidizadores estructurales internos, las seis costillas (*Ribs*), once celosías (*Truss*) y una costilla de punta de ala (*Wingtip*). También existe el *fairing*, que irá situado sobre el larguero anterior. Por último, existen los *Tack Rivets*, que son elementos auxiliares usados durante el ensamblado, pero no aportan rigidez a la estructura.

Un detalle de cada pieza o componente se puede visualizar en las secciones posteriores de este capítulo, así como el detalle completo de estas, ya que algunos de los componentes de la Figura 3-5 pueden tener un nivel inferior de detalle, subdividiéndose en varias partes. Ejemplo: las celosías se descomponen en cada una de barras y remaches.

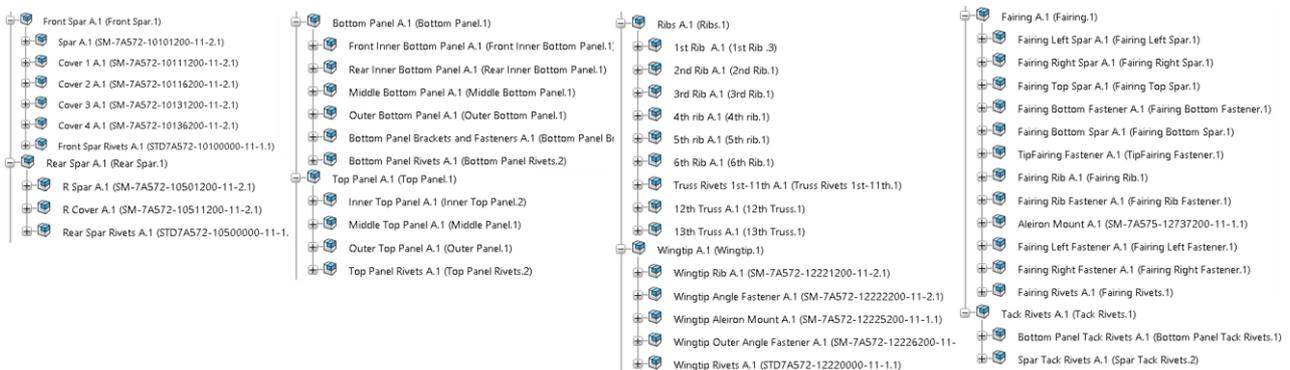


Figura 3-5. BOM – Cajón Alar con detalle para cada componente

Una vez comprendido cómo se estructura el BOM y los diferentes elementos que lo componen, se comienza a diseñar el MBOM.

La forma de proceder ha sido a través de iteraciones de varias opciones hasta dar con la solución óptima y factible del proceso de ensamblaje.

Es importante remarcar que para determinar dicha solución ha sido crucial partir de las operaciones a realizar y los recursos disponibles, siendo estos últimos mayoritariamente el utillaje y las gradas de fabricación. Puesto que en el siguiente capítulo se detallan dichas operaciones y recursos del proceso, también se dará la justificación detallada de porque el MBOM se ha definido de esta forma y no otra. En este documento se describirá únicamente los elementos del MBOM de la solución óptima y los pasos seguidos para su construcción.

El primer paso es definir el *Scope* para empezar a construir los *Implement Links* entre las partes del BOM y las diferentes baldosas que comprenderán el MBOM. Para llevar esto a cabo, se carga el modelo del cajón alar, *LH Wing box*, el cual se detalla en la Figura 3-4, en la aplicación *Manufactured Item Definition*. Esta por defecto generará un primer *Manufacturing Assembly* en blanco para que algún elemento sea vinculado.

Para esta definición del *Scope* principal se opta por realizarlo entre el nivel más alto de la jerarquía de partes del BOM (en el elemento raíz, el *LH Wing box*) y este primer *Manufacturing Assembly* creado por defecto. Con esto se consigue que todos los subcomponentes del BOM puedan asociarse al nivel de este *Manufacturing Assembly* o a sus niveles posteriores, pudiéndose crear así la jerarquía correcta y compuesta por otros *Manufacturing Assemblies* y elementos, además que se asegura una correcta vinculación a este primer *Manufacturing Assembly*, renombrado como *LH Wing Box*.

El paso siguiente es definir los diferentes componentes del MBOM a partir de ir incluyendo baldosas del tipo que proceda e ir vinculando los cada parte del BOM. La relación jerárquica de estas baldosas define la interacción entre las diferentes piezas, así como el orden en el que son integradas para formar el cajón alar. Las baldosas utilizadas en el MBOM de este modelo serán:

- *Provided Parts*: como unidad básica y singular para cada pieza del BOM
- *Manufacturing Kits*: en algunos casos se opta por asociar diferentes *Provided Parts* por ser integradas juntas o en operaciones comunes. Ejemplo: algunos herrajes se agruparán con los remaches asociados. Esto dará más orden visual y lógica al modelo, como se verá a continuación.
- *Manufacturing Assembly*: será la unidad que formará los diferentes subconjuntos y estarán vinculados de forma jerárquica entre ellos hasta llegar al *Manufacturing Assembly* raíz (el *LH Wing Box*).

También se intentó poner en práctica el uso del elemento de tipo *Fasten*, pero no fue posible debido a que, para ello, los diferentes *Fasteners* (elementos de unión) deben de estar predefinidos en el BOM original como tal para así poder asociarlos a al objeto del tipo *Fasten*. En el presente caso, los elementos de unión son los remaches y tornillos, que está definidos como un componente estándar del BOM, por lo que se tienen que incluir como una *Provided Part* en el MBOM.

El resto de los tipos de elementos del *Manufactured Item Definition* no serán usados en este modelo.

Con lo expuesto anteriormente, se lleva a cabo la construcción del MBOM a través de las herramientas de asignación de la aplicación descritas en la sección anterior. El resultado obtenido, en términos de subconjuntos y el orden jerárquico, se puede contemplar en la Figura 3-6, mostrándose principalmente los *Manufacturing Assemblies* en la vista del *Manufactured Item Definition* con una etiqueta que incluye una descripción de cada uno de ellos.

En alguno de los casos aparece la nomenclatura *Phase 1*, *Phase 2* o *Phase 3*. Esto es debido a que las diferentes operaciones se van a separar en estas 3 fases y en cada una de ellas los recursos utilizados serán diferentes. Se profundizará más en esto en el Capítulo 4.

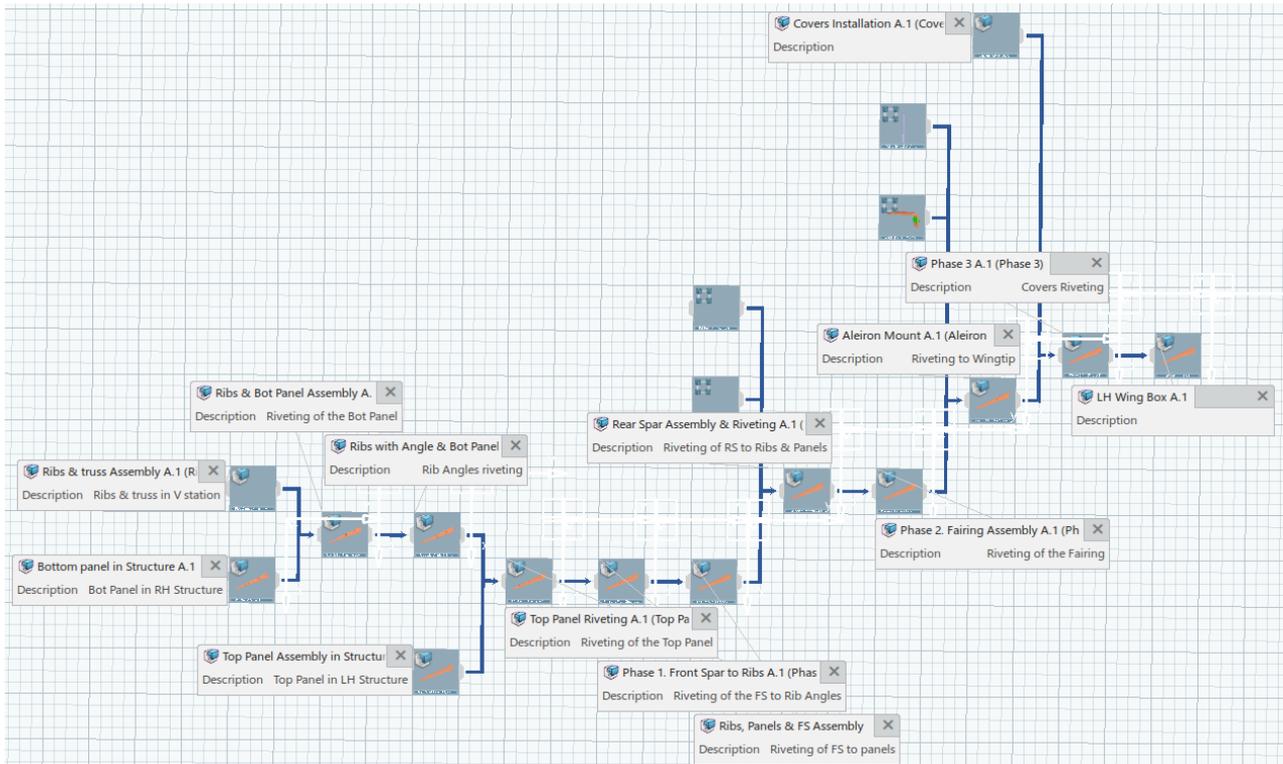


Figura 3-6. MBOM – Cajón Alar

Lista de subcomponentes del MBOM mostrada en la Figura 3-6, así como su orden de integración es la siguiente:

- Costillas y las celosías
- Revestimiento inferior
- Revestimiento inferior con costillas y celosía
- Herraje superior de las costillas
- Revestimiento superior
- Revestimiento superior con revestimiento inferior y costillas
- Larguero Frontal
- Larguero Trasero
- Fairing
- Montante del alerón del Wingtip
- Covers
- LH Wing Box

La razón por la que se construyen así los diferentes Manufacturing Assemblies reside en que están totalmente enfocados a las diferentes operaciones que se llevan a cabo y el producto resultante después de las cada una de ellas. Esto último es lo que se ha usado para definir los títulos de los diferentes sub-MBOM (ejemplo: el *Manufacturing Assembly* “Larguero Trasero” es el producto del ensamblaje del larguero trasero con las partes ensambladas anteriormente).

El detalle de cada subconjunto incluyendo una explicación y la lista de partes de cada uno de ellos es desarrollado en las secciones que aparecen a continuación.

3.2.1 Costillas y las celosías

Los primeros elementos en ser instalados son las costillas, las cuales darán forma al núcleo del cajón alar y serán el soporte de los revestimientos y largueros. Se dispone de dos tipos de costillas:

- Estándar o también conocida como costilla de chapa: la cual está mecanizada sobre un único tocho de material metálico, generalmente una aleación de aluminio y se compone de alma y nervios donde se remacharán los revestimientos y los largueros.
- Celosía: compuesta por una serie de barras ensambladas a los revestimientos en forma de zigzag a lo largo del alto del cajón alar mediante dos remaches en cada uno de sus extremos.

El MBOW producto de estos componentes se encuentra ilustrado en la Figura 3-8 y se ha denominado como *Ribs & Truss Assembly* el cual está compuesto por:

Tabla 3–2. MBOM – Costillas y celosías

Provided Parts	Manufacturing Assemblies
1r Rib	Rib 2
3r Rib	Truss 1-11th
4r Rib	12th Truss
5r Rib	13th Truss
6r Rib	
Wingtip Rib	

La razón por la que en este punto inicial tenemos varios *Manufacturing Assemblies* es debido a:

- Rib 2: esta costilla posee una pieza angular en su lateral inferior, por lo que a diferencia del resto de costillas es un *Manufacturing Assembly*. A la hora de modelar el proceso, no se va a considerar una operación para a la unión de esta costilla con su esta pieza, por lo que a efectos prácticos este *Manufacturing Assembly* trabajará como una *Provided Part* compuesta por las siguientes partes:
 - 2r Rib
 - 2r Bot Angle Fastener
 - Bot Angle Fastener Rivets
- Truss 1-11th: aquí se engloban las costillas de celosía del número 1 al 11, las cuales no se encuentran disponibles en la maqueta origen, pero aun así se han considerado en el modelado del proceso, sin realizarse la representación 3D, por resultar irrelevante para la definición del proceso (una ilustración de las mismas se puede encontrar en la Figura 3-8). Cada una de estas celosías está compuesta por una serie de barras que son consideradas *Provided Parts* siendo el número total de barras de cada celosía:
 - 1st Truss, 2nd Truss y 3rd Truss: 8 barras
 - 4th Truss, 5th Truss: 7 barras (3 Outers, 4 Inners)
 - 6th Truss, 7th Truss: 6 barras
 - 8th Truss, 9th Truss, 10th Truss, 11th Truss: 4 barras
- 12th Truss y 13th Truss: son las dos últimas costillas de celosía y se encuentran intercaladas entre las costillas 5, 6 y la de punta de ala (Wingtip Rib). En este caso, sí se dispone de la maqueta que permite visualizar las diferentes barras que compondrán las *Provided Parts* de este conjunto. El número de barras total de ambos *Manufacturing Assembly* son:
 - 12th Truss: 5 barras (2 Outers, 3 Inners)
 - 13th Truss: 4 barras

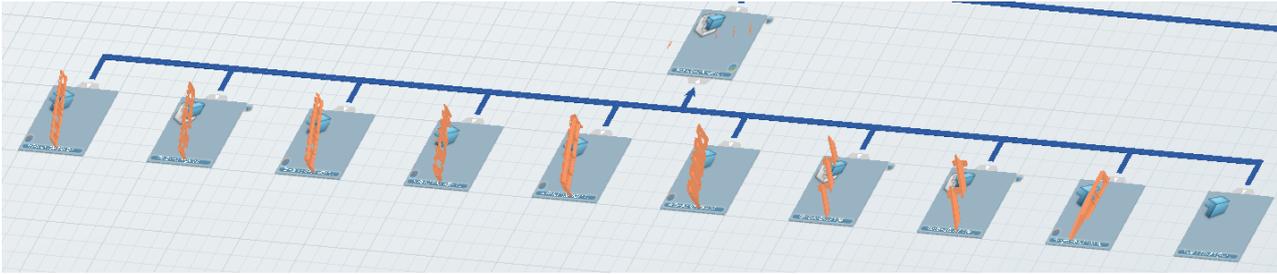


Figura 3-7. MBOM – Costillas y celosías

El resultado del acople de estas costillas y celosías puede verse en la Figura 3-8, respetándose la numeración original de la maqueta por lo que la primera de las costillas y de las celosías son las más próximas al encastre del ala. Nota: como se ha comentado en la sección 1.3, el modelo del cajón alar no incluye ciertos elementos como las celosías 1st a la 11th, por lo que lo representado en la Figura 3-8 son una simulación visual de las mismas. Esto tan solo es relevante para la representación 3D del ala, pero no para el proceso de ensamblaje, por lo que se van a considerar en el alcance de este trabajo, como se puede ver en las secciones del apartado 4.3.

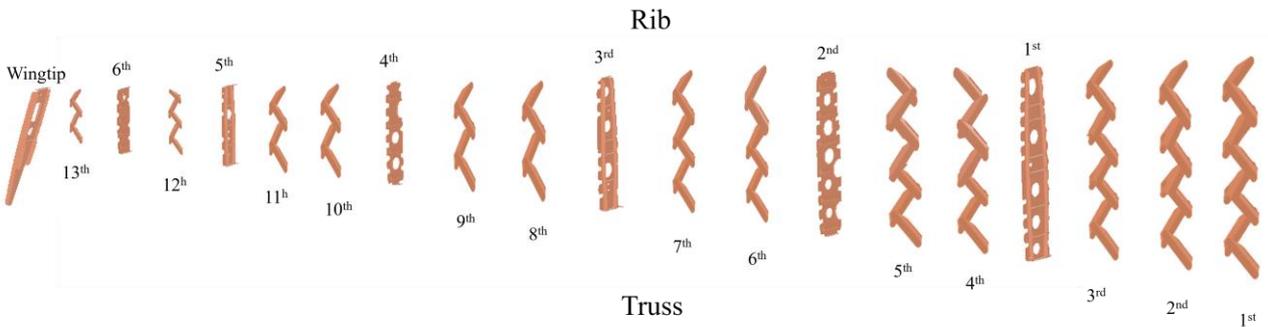


Figura 3-8. Costillas y celosías

3.2.2 Revestimiento inferior

Los paneles del revestimiento inferior son los siguientes componentes en ser integrados a las costillas. Estos elementos se componen de 4 paneles y una serie de herrajes o brackets que se usan para la unión común entre alguno de ellos.

La lista de partes de este subconjunto es la siguiente, donde todos son del tipo *Provided Parts* y generarán el *Manufacturing Assembly* denominado como Bottom panel.

Tabla 3–3. MBOM – Revestimiento inferior

Provided Parts	Provided Parts
Rear Inner Bottom Panel	Bottom Bracket
Middle Bottom Panel	Bottom Bracket 2
Front Inner Bottom Panel	Bottom Bracket 3
Outer Bottom Panel	Bottom Bracket 4
Rear Inner Bottom Panel	Bottom Bracket 5
Bottom Panel Rivets	Bottom Bracket 6
	Bottom Bracket 7
	Angle fastener

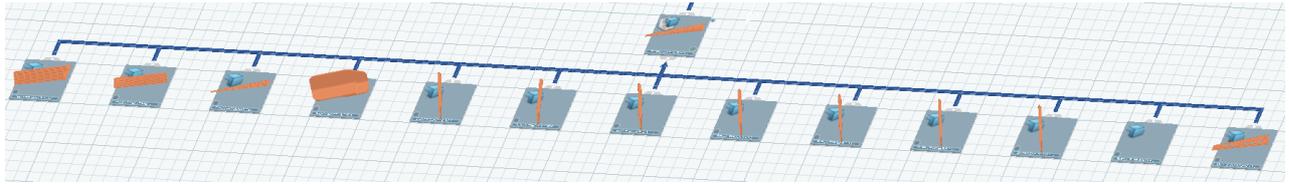


Figura 3-9. MBOM – Revestimiento inferior

En la Figura 3-10 se puede visualizar el revestimiento inferior, compuesto por los diferentes paneles donde el “Inner Bottom Panel” es el que está situado próximo al encastre del ala.

Además, se ha remarcado los brackets y el ángulo que sirven como refuerzo a la unión de estos 3 paneles del revestimiento inferior, así como su línea de remaches. Este tipo de construcción es una particularidad del revestimiento inferior que no se va a dar en el revestimiento anterior, lo que hace que los procesos de ensamblaje sean ligeramente diferentes, como se verán en el Capítulo 4.

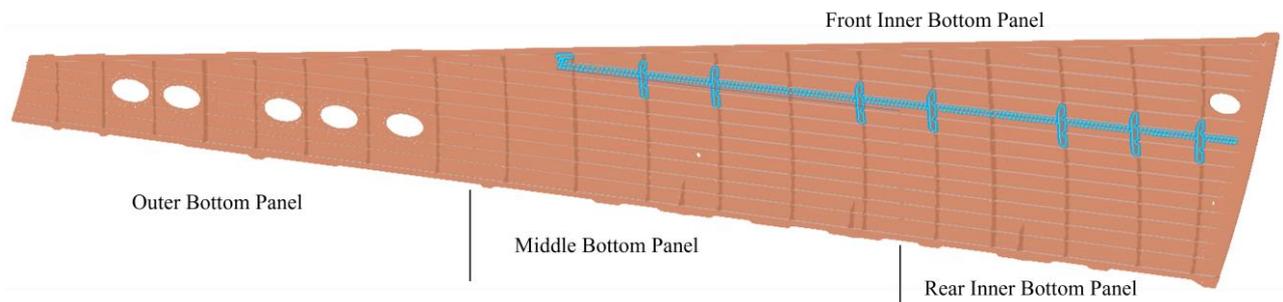


Figura 3-10. Revestimiento inferior

3.2.3 Revestimiento inferior con costillas y celosía

En este paso de la fabricación del cajón alar se realiza la primera integración entre los dos primeros *Manufacturing Assemblies* generados, que son: el revestimiento inferior y las costillas y la celosía. El producto de esta primera gran integración es el *Manufacturing Assembly Ribs & Bot Panel Assembly*, el cual se compone del siguiente MBOM:

Tabla 3-4. MBOM – Revestimiento inferior con costillas y celosía

Manufacturing Assemblies	Provided Parts
Bottom panel	1r Bot Rivets
Ribs & truss Assembly	2r Bot Rivets
	3r Bot Rivets
	4r Bot Rivets
	5r Bot Rivets
	6r Bot Rivets
	Wingtip Bot Rivets
	Truss Bot Rivets 1st-11th
	12t Bot Rivets
	13t Bot Rivets

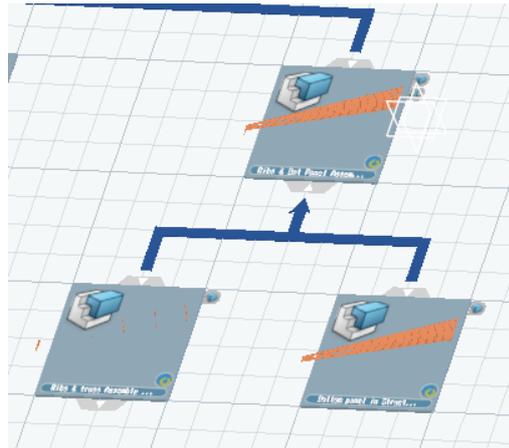


Figura 3-11. MBOM – Revestimiento inferior con costillas y celosía

Como se puede ver en la Tabla 3-4 en la columna de *Provided Parts*, la unión de ambos *Manufacturing Assembly* se hacen a través de los diferentes remaches (*rivets*) de las costillas y barras de las celosías, los cuales no se habían utilizado hasta ahora. La denominación de “Bot” en estas partes es debido a que son los usados para remachar el *Bot Panel*, lo que significará que se tendrán los correspondientes para usarse con el *Top Panel* en una etapa posterior de la fabricación.

Un ejemplo detallado del resultado y la forma del remachado se puede encontrar en la Figura 3-12 de la zona próxima a la punta del ala.

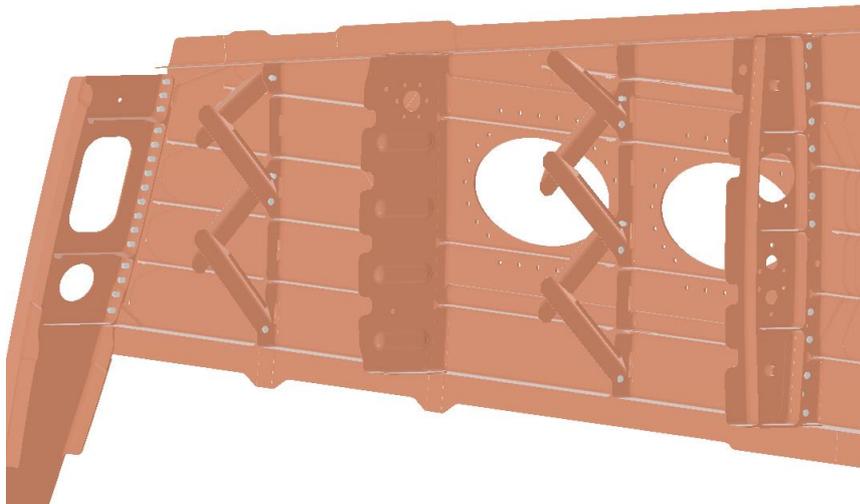


Figura 3-12. Revestimiento inferior con costillas y celosía

3.2.4 Herraje superior de las costillas

Se ha comentado antes que cada costilla, incluyendo la de Wingtip, ha sido mecanizada de en una sola pieza (partiendo de un mismo tocho de material) pero existe una pequeña parte frontal que es externa. Esta consiste en un ángulo sobre el que se montará el larguero superior.

Es en este paso es donde se taladran y remachan cada uno de estos ángulos para así generar el *Manufacturing Assembly* de esta sección: *Ribs with Angle & Bot Panel Assembly*

Más información de la razón por la que esto se debe realizar después de que se ha obtenido el conjunto revestimiento inferior y costillas se ve detallado en la sección 4.3.4.12.

Tabla 3–5. MBOM – Herraje superior de las costillas

Manufacturing Assembly	Provided Parts	Provided Parts
Ribs & Bot Panel Assembly	1r Angle Fastener	1r FS Rivets
	2r Angle Fastener	2r FS Rivets
	3r Angle Fastener	3r FS Rivets
	4r Angle Fastener	4r FS Rivets
	5r Angle Fastener	5r FS Rivets
	6r Angle Fastener	6r FS Rivets
	Wingtip Angle Fastener	Wingtip FS Rivets

El detalle de este nuevo *Manufacturing Assembly* para la primera costilla (1st Rib) se puede ver en la Figura 3-13, donde solo los remaches de unión entre el ángulo y la costilla quedan fijados. Los remaches frontales serán utilizados en el paso de ensamblaje del larguero frontal, pero debido a que ambos conforman una sola *Provided Part*, no es posible separarlos en el modelo.

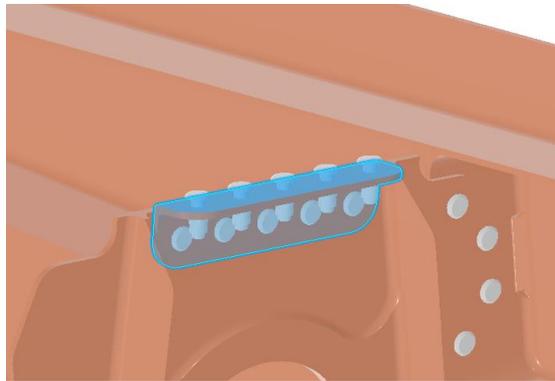


Figura 3-13. Herraje superior de las costillas

3.2.5 Revestimiento superior

En este paso se prepara el revestimiento agrupando sus partes en un solo componente utilizando un útil específico para ello. Dicho revestimiento está compuesto de tres *Provided Parts*, que son el panel interior, central y exterior de dicho revestimiento, los cuales generan el *Manufacturing Assembly* del *Top Panel*.

No se requiere de otras partes de unión ya que estos paneles no están unidos entre sí, sino directamente a los nervios superiores de las costillas y la celosía.

Tabla 3–6. MBOM – Revestimiento superior

Provided Parts
Inner Top Panel
Mid Top Panel
Outer Top Panel

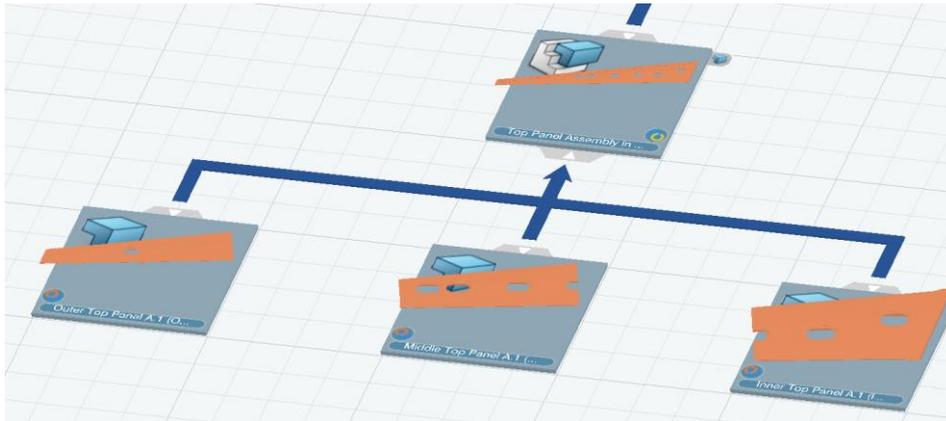


Figura 3-14. MBOM – Revestimiento superior

Como se puede ver, la complejidad del MBOM es bastante menor en comparación con el revestimiento inferior. Esto significará una diferencia cualitativa del proceso de ensamblaje en cuanto a complejidad, recursos y tiempos necesario para llevarlo a cabo su integración.

En cuanto a la tipología del revestimiento se pueden destacar varios aspectos, como la mayor cantidad de handholes de este con respecto al revestimiento inferior. Esto está vinculado con el orden que sigue en el proceso de ensamblado del cajón alar, siendo este revestimiento superior uno de los últimos componentes en ser integrados de forma definitiva, de ahí la necesidad de habilitar estos espacios para que los operarios puedan llevar a cabo el remachado de los paneles con los nervios superiores de las costillas y las celosías.

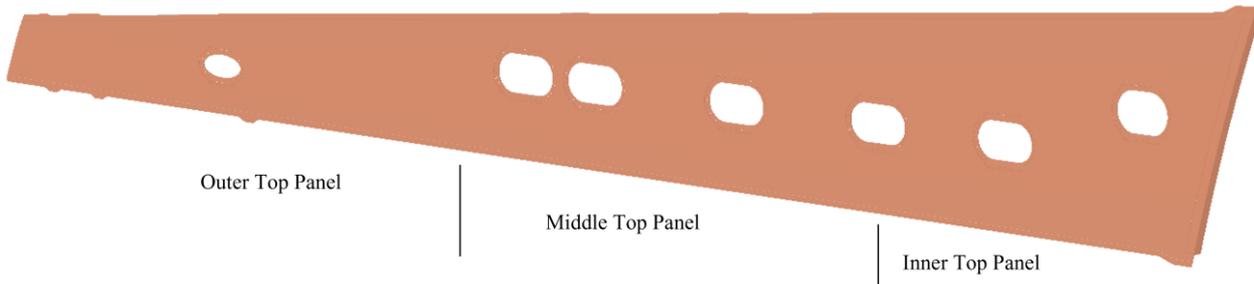


Figura 3-15. Revestimiento superior

3.2.6 Revestimiento superior con revestimiento inferior y costillas

En este paso se integra de forma definitiva el revestimiento superior al resto de componente ya integrados.

La lógica de unión es idéntica a la ya comentada en la sección anterior, cada uno de los tres paneles se remacha a los nervios superiores de las costillas mediante una fila de remaches y un remache adicional para cada barra de las celosías. Con esto, la lista de piezas que conforman este *Manufacturing Assembly* es la siguiente:

Tabla 3-7. MBOM – Revestimiento superior, inferior y costillas

Manufacturing Assemblies	Provided Parts
Ribs with Angle & Bot Panel Assembly	1r Top Rivets
Top Panel	2r Top Rivets
	3r Top Rivets
	4r Top Rivets
	5r Top Rivets
	6r Top Rivets
	Wingtip Top Rivets
	Truss Top Rivets 1st-11th
	12t Top Rivets
	13t Top Rivets

Como ya se ha comentado, si estos elementos de unión se hubieran definido como *Fasteners* en el BOM original, se hubiera podido incluir en el MBOM mediante el elemento *Fasten* en vez de como *Provided Parts*.

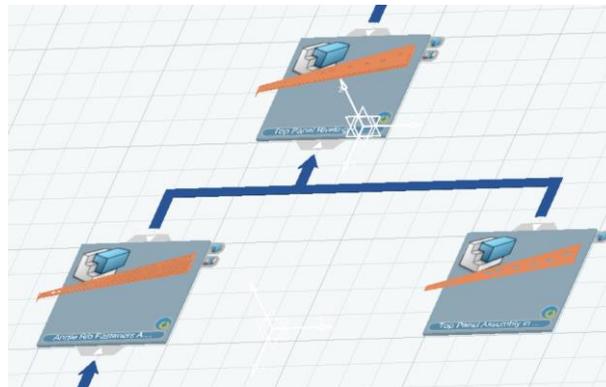


Figura 3-16. MBOM – Revestimiento superior, inferior y costillas

En el detalle de la Figura 3-16 se puede ver cómo se compone el *Manufacturing Assembly* de esta sección, el cual está generado de otros dos *Manufacturing Assemblies* y a su vez, uno de ellos está compuesto por otros sub-*Manufacturing Assemblies*. Los remaches que se incluyen en la Tabla 3-7, no se muestran en la Figura 3-16 para simplificar la vista. Si hubiera sido así, se tendría una baldosa por cada *Provided Part*.

El producto generado en este punto del proceso de ensamblaje se puede ver en la Figura 3-17, donde el cajón alar está ya estaría cerrado por los laterales que cubren los revestimientos y a falta de los largueros para tener la forma estructural completa del cajón.

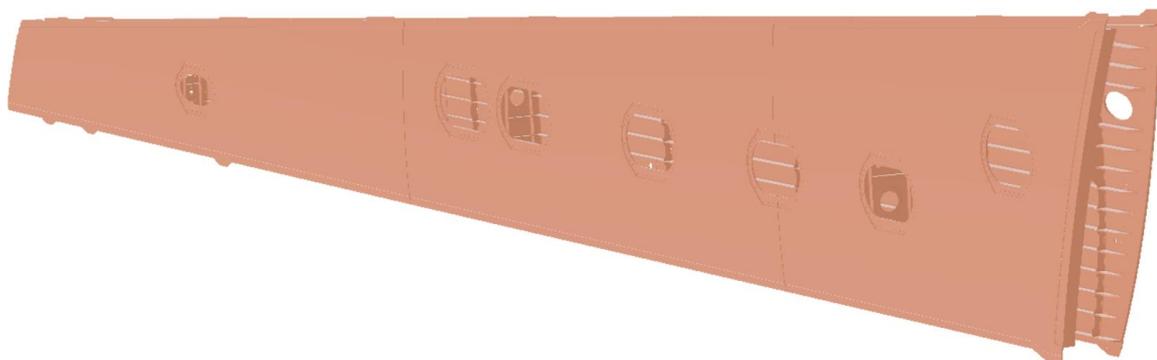


Figura 3-17. Revestimiento superior, inferior y costillas

3.2.7 Larguero Frontal

En esta sección se detallará el MBOM de la integración del larguero superior con el resto de los subconjuntos. Esto realmente se realiza en dos pasos, generándose dos *Manufacturing Assemblies* por razones que se verán en la sección 4.3.4.15 sobre las operaciones de este paso, pero se adelanta levemente en esta sección:

- Primer *Manufacturing Assembly*: Integración del larguero y remachado a las costillas.
- Segundo *Manufacturing Assembly*: remachado del larguero a los revestimientos.

La razón está relacionada con las diferentes gradas y utillaje que se usan durante la fabricación, donde el primer paso se realiza en la Grada Vertical y el segundo paso en la Grada Horizontal.

Con esto, el MBOM de los dos pasos se puede encontrar en la Tabla 3–8:

Tabla 3–8. MBOM – Larguero Frontal

MBOM – Ribs, Panels & pre-FS Assembly		MBOM – Ribs, Panels & SP Assembly	
Manufacturing Assembly	Provided Parts (*)	Manufacturing Assembly	Provided Parts
Ribs & Panels Assembly	1r FS Rivets	Ribs, Panels & pre-FS Assembly	FS Top Rivets
Front Spar	2r FS Rivets		FS Bot Rivets
	3r FS Rivets		
	4r FS Rivets		
	5r FS Rivets		
	6r FS Rivets		
	Wingtip FS Rivets		

(*) Estas *Provided Parts* ya han sido añadidas al modelo, como se detalla en la sección 3.2.4 , debido a que la *Provided Parts* de estos remaches se componen de los que unen el herraje y la costilla y también la unión entre el herraje y el larguero. Se incluye en esta sección de forma ficticia con fines descriptivos del proceso de remachado entre las costillas y el larguero frontal pero no se generarán baldosas asignadas a este *Manufacturing Assembly*, como se puede ver en la sección 3.2.12, donde se detalla el árbol de elementos al completo en la Figura 3-31.

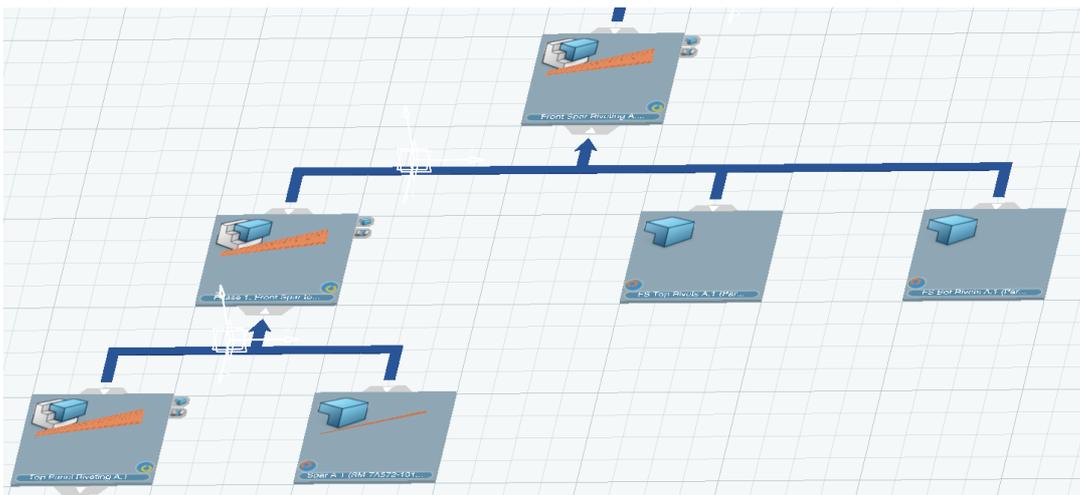


Figura 3-18. MBOM – Larguero Frontal

En la Figura 3-18 se puede encontrar la visualización del MBOM antes detallado. Las *Provided Parts* que aparecen a la derecha son los remaches usados para la unión al revestimiento superior e inferior, respectivamente. Dichos remaches se sitúan en filas de a uno desde el encastre hasta la punta del ala. Un detalle de estos se puede encontrar en la Figura 3-19, junto al larguero superior. Las filas de remaches verticales son los que unen el

larguero con las costillas.

Como se puede volver a contemplar en este punto, las celosías no están unidas a los largueros, tan solo a los paneles.

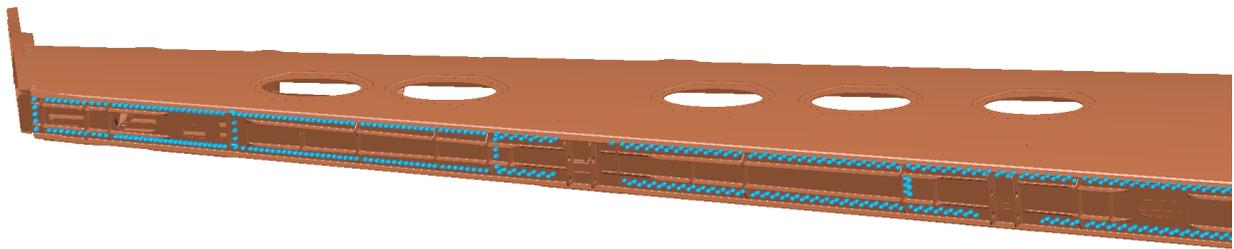


Figura 3-19. Languero Frontal

3.2.8 Languero Trasero

En esta fase del proceso, tan solo falta la integración del languero trasero para completar los grandes subconjuntos del cajón alar.

Este ensamblaje se realiza de una forma similar que el languero frontal, pero esta vez se realiza todo en un mismo sistema, por lo que tan solo se generará un *Manufacturing Assembly*.

Como se ve en la Tabla 3–9, se parte del ensamblaje anterior (revestimientos, costillas y languero frontal) y posteriormente se añade el languero anterior como *Provided Part*. Aparte de esto, se necesitan los diferentes remaches, que por esta vez se han integrado en dos *Manufacturing Kits* diferentes, uno para los de unión entre languero y costillas y otro para la unión entre languero y revestimientos. Ambos compuestos por *Provided Parts* para cada línea de remaches.

Tabla 3–9. MBOM – Revestimiento superior, inferior y costillas

Manufacturing Assemblies	Provided Parts	Manufacturing Kit: RS Rib Rivets	Manufacturing Kit: Rear Spar Rivets
Ribs, Panels & FS Assembly	Rear Spar	1r RS Rivets 2r RS Rivets 3r RS Rivets 4r RS Rivets 5r RS Rivets 6r RS Rivets Wingtip RS Rivets	RS Top Rivets RS Bot Rivets

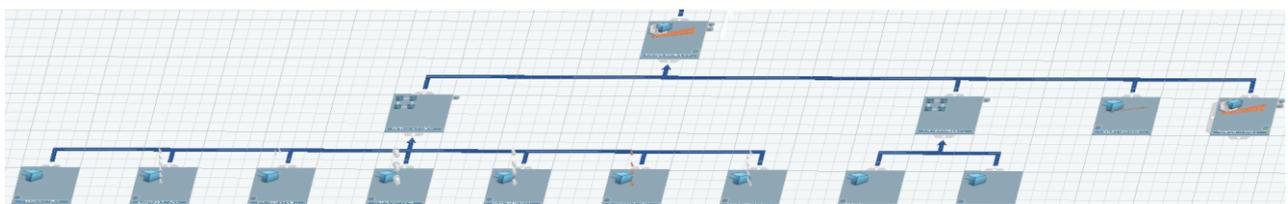


Figura 3-20. MBOM – Revestimiento superior, inferior y costillas

En la Figura 3-21 se vuelve a detallar el resultado, pero esta vez para la parte del encastre del ala.

Se puede apreciar el languero anterior y las filas de remaches, siendo las dos filas que se ven en dirección vertical

los de las costillas 1 y 2, respectivamente.

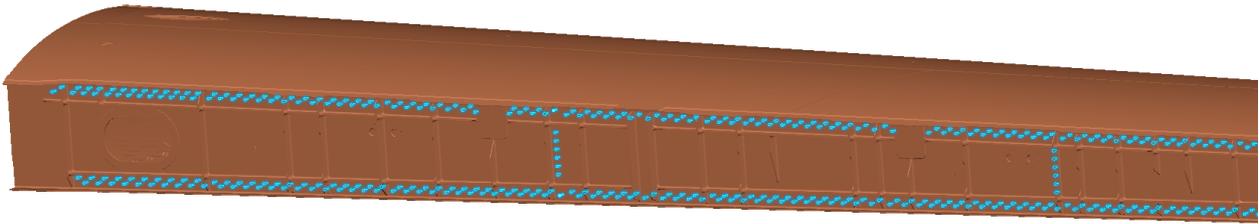


Figura 3-21. Revestimiento superior, inferior y costillas

3.2.9 Fairing

Una vez se tienen ensambladas las piezas más volumétricas como las costillas, los revestimientos y los largueros, se comienza a ensamblar otras partes menores que están incluidas en este modelo de cajón alar. La primera en ser ensamblada es el *fairing* o carenado, el cual consiste en una estructura fuselada que mayormente sirve para albergar el mecanismo del alerón o de los flaps y el cual está ensamblado en el borde de salida del cajón alar, esto es, el larguero posterior mayoritariamente y parte de los bordes de los paneles.

El fairing está compuesto por hasta doce *Provided Parts*, cuyo MBOM se puede encontrar en la Tabla 3–10. Se tienen básicamente 4 tipos de piezas (más los remaches):

- Fairing Spars: son las piezas de mayor tamaño que tras ser remachadas dan forma a la estructura del fairing. Se tienen cuatro piezas de este tipo.
- Fairing Rib: es una pieza rectangular interior ensamblada a las cuatro piezas anteriores que le da rigidez estructural al conjunto. En la parte central tiene un pequeño ángulo que también se remacha.
- Fairing Fastener: son pequeñas pletinas que se sitúan entre los Spars del fairing y la parte de los revestimientos del ala donde está situado este elemento.
- Aileron Mount: es el montante del alerón, una pieza atornillada al fairing en su lado más próximo a la punta del ala y la cual sirve como soporte estructural del alerón.

Tabla 3–10. MBOM – Fairing

Manufacturing Assemblies	Provided Parts	Provided Parts
Ribs, Panels & FS, RS Assembly	Fairing Top spar	Fairing Rib
	Fairing Bottom Spar	Fairing Rib Fastener
	Fairing Right Spar	Fairing Bottom Fastener
	Fairing Left Spar	Tip Fairing Fastener
	Fairing Aileron Mount	Fairing Right Fastener
	Fairing Rivets	Fairing Left Fastener

El detalle del *Manufacturing Assembly* se puede ver en la Figura 3-22. El orden en el que cada pieza es ensamblada se incluye en la sección 4.3.5.4 sobre la operación de ensamblaje de este elemento.

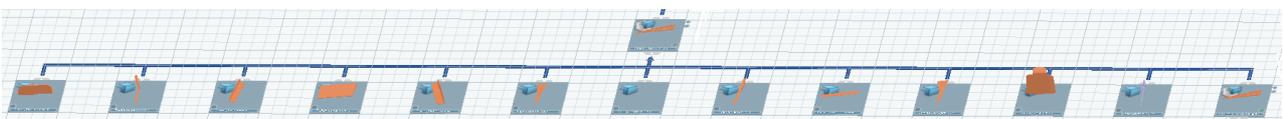


Figura 3-22. MBOM – Fairing

En la Figura 3-23 se puede ver el detalle visual del fairing, y su posición en el ala. Los remaches necesarios para

su montaje se reflejan en blanco para todas las piezas, así como el montante del alerón del fairing, el cual tiene otro color diferente. En la siguiente sección se describirá el montaje del alerón que está en la costilla de punta de ala y que es similar a esta última pieza.

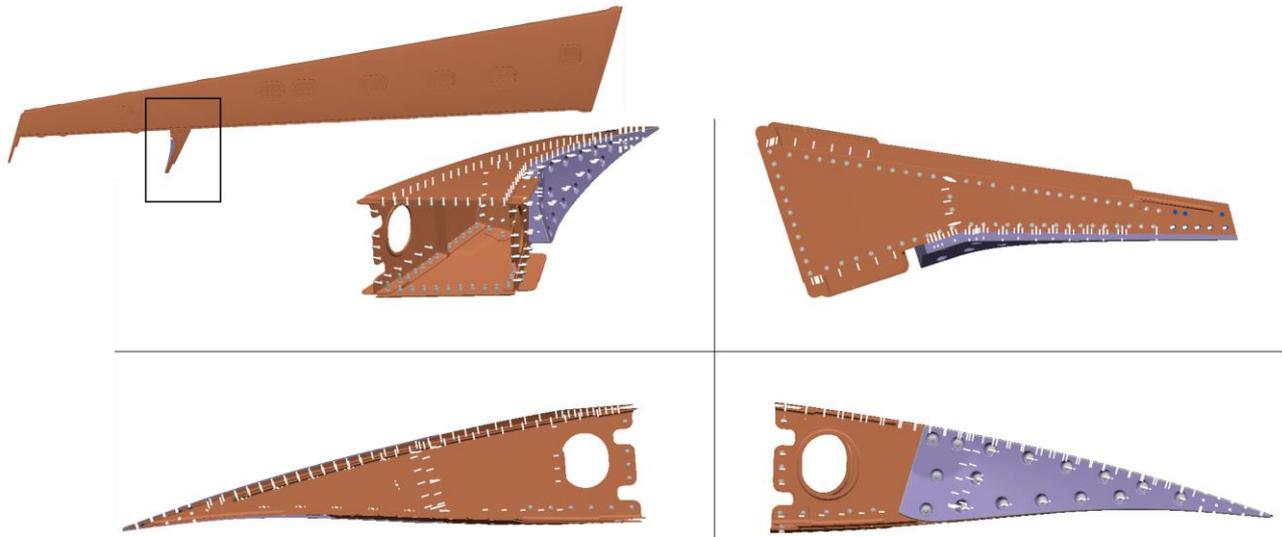


Figura 3-23. Fairing

3.2.10 Montante del alerón del Wingtip

Otras de las partes restantes del cajón alar son dos piezas estructurales de la costilla de punta de ala o Wingtip, las cuales son el otro montante del alerón que acompaña a la pieza ya ensamblada en el fairing, y un pequeño ángulo que se remacha en lateral exterior de la costilla.

Para ambas piezas, se ha creado un *Manufacturing Kit* en conjunto con los remaches o tornillos que cada una lleva asociado. Con esto y partiendo del *Manufacturing Assembly* que se ha construido hasta ahora, se obtiene el MBOM de esta sección:

Tabla 3–11. MBOM – Montante del Alerón

Manufacturing Assemblies	Manufacturing Kit: Aileron Mount	Manufacturing Kit: Wingtip angle fastener
Ribs, Panels, Spars & Faring Assembly	Wingtip Aileron Mount Wingtip Aileron Mount Bolts	Wingtip Angle Fastener Wingtip Outer Fastener Rivets

En la Figura 3-24 se puede ver la vista del MBOM en la aplicación de *Manufactured Item Definition*, con los dos *Manufacturing Kits* comentados, los cuales se componen de dos *Provided Parts* cada uno.

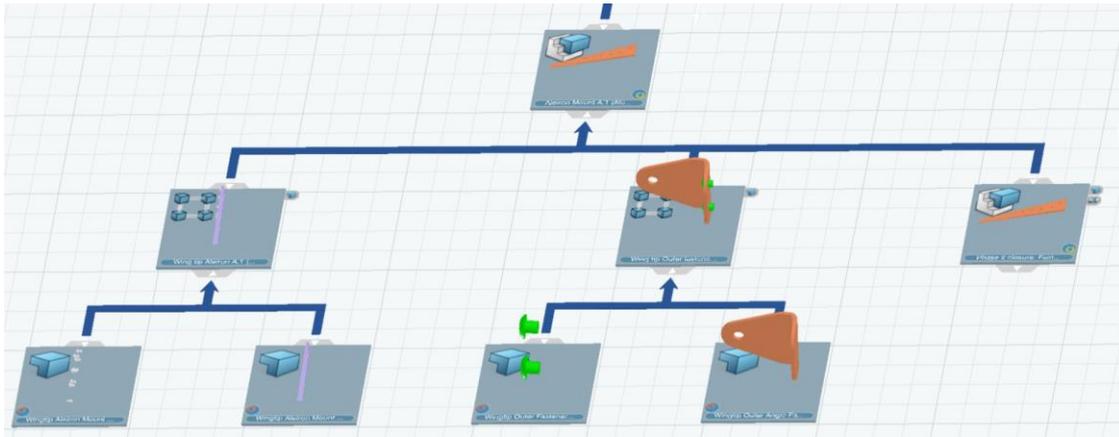


Figura 3-24. MBOM – Montante del Alerón del Wingtip

Por último, se muestra en la Figura 3-24 y en la Figura 3-25 el detalle de estas dos piezas ya integradas en el cajón alar y que son uno de los últimos detalles que forman este modelo.

El ángulo se ha remarcado en la Figura 3-25, el cual se une a la costilla de punta de ala mediante dos remaches.

En cuanto al montante del alerón, se puede ver en la Figura 3-26 y la forma a la que se une a la costilla es mediante un sistema de tuerca y tornillo con hasta nueve elementos de este tipo de unión.

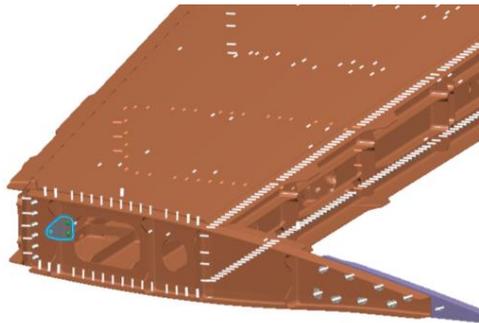


Figura 3-25. Ángulo del Wingtip



Figura 3-26. Montante del Alerón del Wingtip

3.2.11 Covers

Este es el último de los MBOM definidos en este modelo, en el cual se han incluido el montaje de una serie de covers y algunos remaches que se situarán sobre algunos de los handholes de los largueros.

En la Tabla 3–12 se puede ver la lista de partes que se incluye en este *Manufacturing Assembly*.

- En la primera columna se sitúan aquellas que se ensamblan sobre el larguero frontal. En total se tienen cuatro covers más sus asociados remaches, cubriendo así cuatro de los handholes del larguero. Por último, se incluye en el modelo un conjunto de remaches que irán sobre tres handholes, los Handholes Rivets, pero no se dispone de las covers asociadas a ellos.
- En la segunda columna se tiene la única cover con remaches para el larguero posterior.
- En la tercera columna se encuentra una serie de remaches que van sobre el revestimiento superior, los Top Panel Rivets, los cuales serán para los diferentes manholes de estos paneles. De nuevo, no se incluyen las covers, solo los remaches, seguramente debido a que estas secciones se cerrarán completamente en etapas posteriores de la fabricación.
- En la última columna se tienen los Tack Rivets de los largueros y del revestimiento inferior. Este tipo

de elementos suelen ser puntos unión que sirven de guía o centrado y que se usan antes del remachado completo de las partes o durante el montaje, por lo que no pertenecen al conjunto de remaches que soportarán la carga estructural. En algunas ocasiones, este tipo de remaches es temporal, por lo que se eliminan tras el remachado estructural. En este modelo, no se incluye su uso por lo que se tratan como una parte más del cajón alar.

Tabla 3–12. MBOM – Covers

Provided Parts	Provided Parts	Provided Parts	Provided Parts
Cover 1	R Cover	Top Panel Rivets	Spar Tack Rivets
Cover 2	R Cover Rivets		Bottom Panel Tack Rivets
Cover 3			
Cover 4			
Cover 1 Rivets			
Cover 2 Rivets			
Cover 3 Rivets			
Cover 4 Rivets			
Handhole Rivets			

En la Figura 3-27 se tiene el detalle del MBOM en la aplicación *Manufactured Item Definition*, donde solamente se muestran algunas de las baldosas implicadas para poder ver con más claridad las covers y los remaches de estas, los cuales se sitúan a lo largo de todo su perímetro describiendo la elipse.

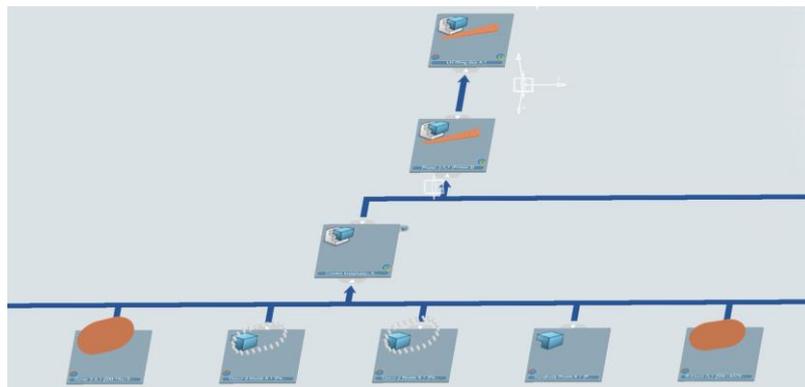


Figura 3-27. MBOM – Covers

La razón por la que todas estas partes se incluyen en un solo *Manufacturing Assembly* es porque, con el alcance del modelo industrial que se tiene, no es posible definir correctamente el punto del proceso en el que estas covers serán remachadas de forma definitiva. Por esto, se ha preferido agruparlo todo en un *Manufacturing Assembly* final que tendrá que ser desarrollado si se aumenta el alcance del modelo.

Un detalle visual de este conjunto de piezas se puede encontrar en la Figura 3-28 donde se muestra una representación de la parte próxima al encastre. En este aparecen las covers del larguero superior (Cover 1, Cover 2), los handhole rivets, los remaches sobre los manholes del revestimiento superior y la cover del larguero anterior.

Por último, en la Figura 3-29 se detalla como ejemplo descriptivo de alguno de los Tack Rivets que aparecen como partes del modelo, en este caso, los que van sobre el larguero frontal o uno de los del revestimiento inferior.

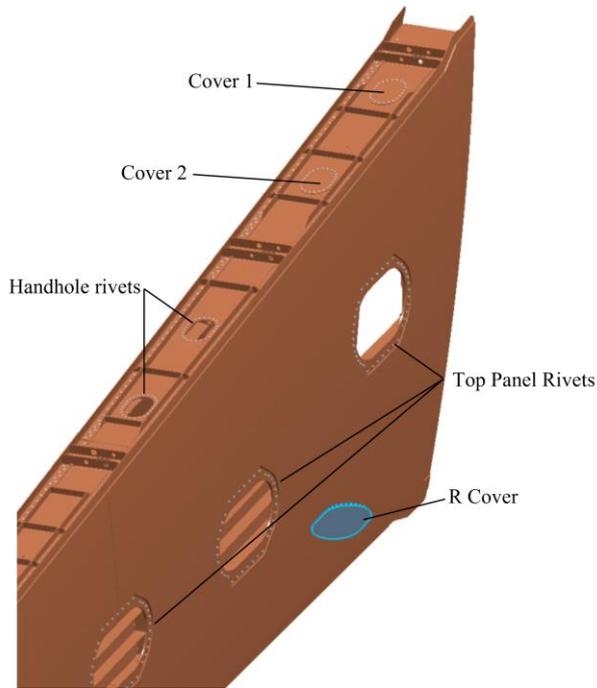


Figura 3-28. Covers

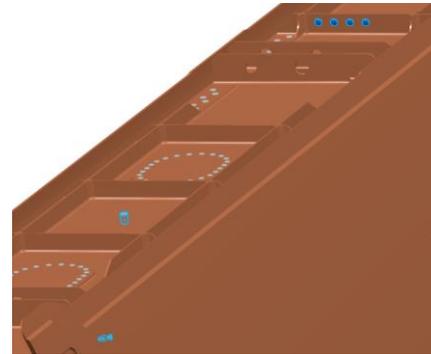


Figura 3-29. Tack Rivets

3.2.12 Resultado del MBOM y validación

Con la consecución de lo expuesto en los apartados anteriores se obtiene finalmente el *Manufacturing Bill of Material* del cajón alar, consiguiéndose vincular todos los componentes del modelo original en los diferentes niveles de dicho MBOM. Para validar este hecho, se hace uso de una de las herramientas de la aplicación más útiles de 3DExperience: la herramienta de *Business Intelligence Essentials* o *BI Essentials*.

Esta herramienta permite obtener diferente información según la aplicación en uso, de una forma muy intuitiva y visual para luego permitir hacer análisis posteriores. Para el caso de la aplicación *Manufactured Item Definition*, se pueden seleccionar varios tipos de análisis, pero el usado para comprobar que todas las piezas están asignadas correctamente es la opción de *Product Assignment Status*. La herramienta mostrará, usando un código de colores, qué piezas del BOM están asignadas a algún elemento del MBOM y cuales no, así como el tipo de asignación (si directa o indirecta, a través de sus subpartes) o si está asignada más de una vez.

Como se puede ver en la Figura 3-30, todas las piezas del cajón alar están asignadas de forma correcta, según se pueden muestra el resultado del BI, tanto en el árbol como en la vista en 3D del ala.

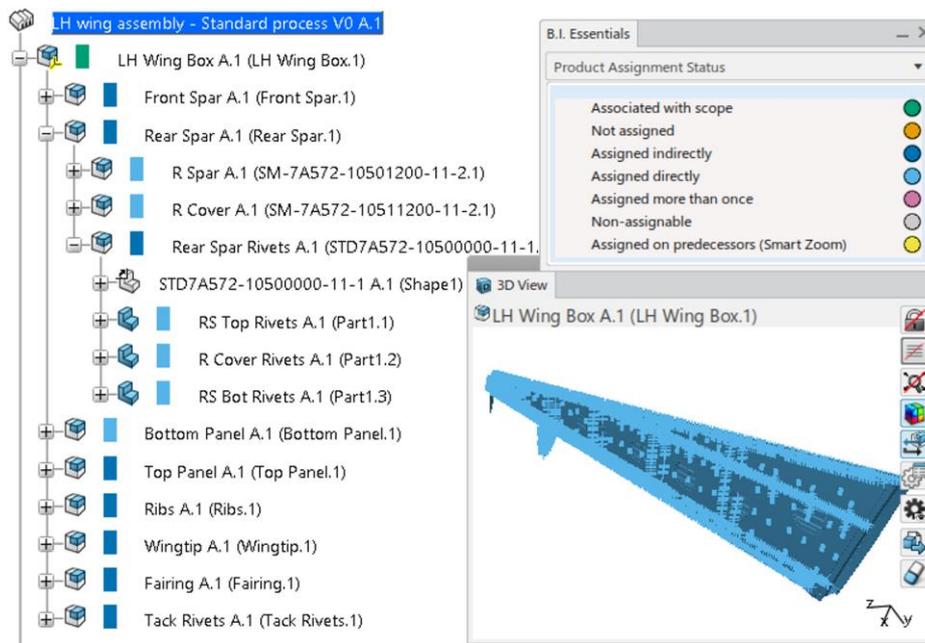


Figura 3-30. Validación del MBOM con BI Essential

Para finalizar este capítulo, se muestra en la Figura 3-31 el árbol resultante del MBOM, seccionándose en dos partes para su correcto ajuste dentro de la página. Se incluye además la leyenda de los diferentes tipos de elementos usados para facilitar su comprensión.

Algo a remarcar es el círculo naranja en el icono de las diferentes *Provided Parts* y en el *Manufacturing Assembly* raíz, el cual indica que existe un *Implement Link* para estos objetos. Como se ha expuesto antes, esto no sucederá en los *Manufacturing Assemblies* o en los *Manufacturing Kits* ya que el vínculo con las partes será de forma indirecta a través de las *Provided Parts* que los componen.

Las líneas verticales en gris ayudan a distinguir los diferentes niveles del MBOM. De izquierda a derecha definen la relación entre los diferentes subconjuntos y su composición. Se puede ver que los componentes del nivel inferior son las costillas y celosías, los que a su vez son los primeros en ser ensamblados y serán la base del resto de elementos, que irán formando los *Manufacturing Assemblies* a medida que se van añadiendo *Provided Parts* y *Manufacturing Kits*.

4 OPERACIONES Y RECURSOS DEL CAJÓN ALAR

*You never change things by fighting the existing reality.
To change something, build a new model that makes the existing model obsolete.*

Buckminster Fuller

En este capítulo se describen las operaciones necesarias para llevar a cabo la fabricación del cajón alar, así como los recursos que están disponibles para ello. Se hará uso de las aplicaciones de 3DEXperience *Process Planning* y *Equipment Allocation*, por lo que se realizará una introducción de las funcionalidades y herramientas que estas aplicaciones ofrecen.

Posteriormente, se describirán las hipótesis consideradas para poder definir el proceso (tiempos de cada operación, así como su secuencia y relación entre las mismas), así como la lista de operaciones y la lista de recursos de los que se dispone para fabricar el cajón alar. Por último, se podrá encontrar el detalle de cada sistema con sus operaciones asociados y los recursos necesarios.

4.1 Introducción a la aplicación Process Planning

La aplicación *Process Planning* permite definir las operaciones que serán llevadas a cabo durante el proceso de fabricación. El punto de partida será el MBOM del producto y el objetivo de esta etapa será diseñar el *Process Plan* que consistirá en la lista de operaciones a realizar y su secuencia.

Una vez se tenga definido el *Process Plan*, se pasará a asignar los recursos necesarios para llevarlo a cabo, lo cual se detalla a partir de la sección 4.3 de este capítulo.



Figura 4-1. Definición del Process Planning [9]

3DEXperience clasifica las diferentes operaciones que se pueden dar en un proceso según el tipo. Los tipos disponibles en la aplicación *Process Planning* se pueden ver en la Tabla 4-1.

Tabla 4–1. Tipos de operaciones en la aplicación Process Planning

Tipo de operación	Descripción y uso
Header Operation 	Este tipo de operación es utilizada para definirse como la cabecera de una secuencia de operaciones, por lo que ocupará un nivel superior con respecto al resto de operaciones.
General Operation 	Este tipo de operación es de uso general ya que puede usarse para definir cualquier tipo de acción sin desarrollar una clasificación concreta, como se hace en los otros tipos.
Point Fastening Operation 	Este tipo de operaciones se utilizan para describir las acciones de remachado, atornillado o soldadura punto a punto, esto es, las que requieren una unión en un punto concreto.
Curve Fastening Operation 	Similar a la operación de unión anterior, pero este tipo de operación describe una unión mediante un elemento continuo como puede ser un cordón de soldadura.
Loading Operation 	Esta es la operación que describe la acción de carga y posicionamiento de un elemento o parte para ser integrada o para que se le realicen una serie de operaciones dentro de un sistema concreto.
Unloading Operation 	Se utiliza para describir operaciones de descarga o desinstalación de una pieza que ya forma parte del sistema.
Transfer Operation 	Operaciones de transferencias de elementos. Se usa para describir aquellas acciones que transportan un elemento de una posición a otra, por lo que no se añade valor al elemento ni al conjunto que forma o formará parte.
Remove Material Operation 	Este tipo de operación describe una acción de eliminado de material, como puede ser un taladrado, corte o lijado.

Con los tipos definidos en la Tabla 4–1, se pueden crear las distintas operaciones que se llevarán a cabo dentro del *Process Plan*. Dependiendo del detalle que se requiera, se pueden combinar dichos tipos, aunque también es posible definir todo el proceso utilizando tan solo el objeto *General Operation*.

Esta lista de operaciones se englobará en lo que en esta aplicación se conoce como *Manufacturing System*, el cual del que colgarán o bien otros *Manufacturing Systems* o una serie de operaciones. Existen varios tipos de *Manufacturing Systems*, pero de forma general, el más común es el *General System* y será el único incluido en el alcance de este documento. Estos sistemas, así como la lista de tipos de operaciones que se usarán para el proceso del cajón alar se puede encontrar en la sección 4.3.1.

Similar a la aplicación *Manufactured Item Definition*, *Process Planning* requiere de la definición de los vínculos entre el MBOM a fabricar y los sistemas que englobarán las operaciones de fabricación, así como la lista de partes o subconjuntos afectados por cada operación. Igualmente, se puede establecer estos vínculos de diferentes maneras o incluso, partiendo de un mismo MBOM, se puede definir más de un sistema de fabricación a la vez, lo que permitiría fabricar el mismo elemento siguiendo diferentes procesos.

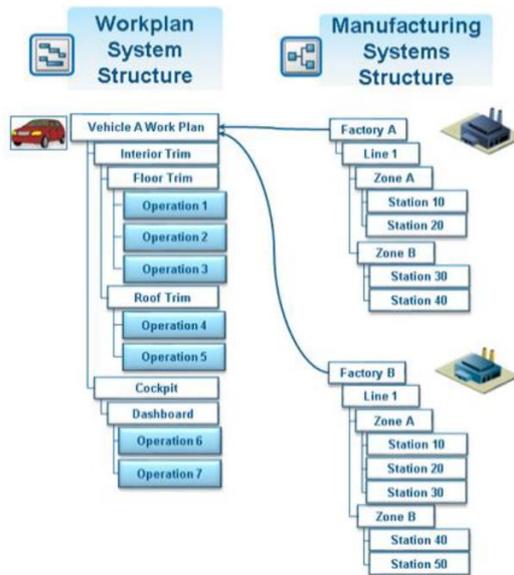


Figura 4-2. Definición del Scope del Manufacturing System

El usuario dispone de varias formas o métodos para generar las operaciones, similar a la aplicación para generar el MBOM, sin embargo, al utilizar la opción *drag and drop* de un conjunto de partes hacia un sistema concreto, *Process Planning* generará una lista de operaciones estándar para cada una de las partes. Para opciones más detalladas donde se requiera utilizar los diferentes tipos de operaciones definidos en la Tabla 4-1, el usuario debe crear una a una y asignar las partes o conjuntos implicados en la operación, mediante el *Assignment Manager* o utilizando el método *drag and drop* para cada elemento y operación.

En cuanto a la interfaz de usuario, se vuelven a utilizar un sistema de baldosas en esta aplicación, donde cada operación será una baldosa con su icono correspondiente y para cada sistema se tendrá una baldosa completa, sabiendo que dentro de cada sistema se encontraron otros subsistemas y operaciones, pudiéndose desplegar la baldosa para visualizarse el detalle. Las partes o conjuntos asignados a estos elementos se representarán sobre las diferentes baldosas, como se ilustra en la Figura 4-3.

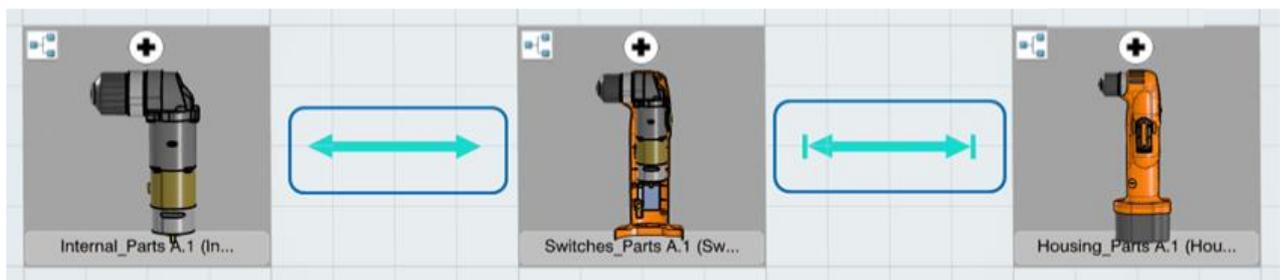


Figura 4-3. Interfaz de la aplicación Process Planning

Aparte, la secuencia de operaciones, así como el flujo de los elementos entre las distintas operaciones quedan detallados mediante un sistema de flechas.

La secuencia entre operaciones y la relación entre ellas se realizarán aplicando la restricción pertinente entre cada par de operaciones. Estas restricciones serán de los cuatro tipos que se describen en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Tipos de restricción o link entre operaciones

Tipo de restricción o link	Descripción y uso
Precedence link 	Determina que la segunda operación comenzará una vez termine por completo la primera
Start-Start link 	Ambas operaciones comenzarán al mismo tiempo
End-End link 	Ambas operaciones acabarán al mismo tiempo
End-Start link 	La segunda operación comenzará una vez termine la primera y se cumpla un margen de retraso establecido

Por último, se considera útil introducir la herramienta que muestra el diagrama de Gantt del proceso, el cual describe de una forma muy visual las operaciones de los diferentes sistemas, el tiempo de cada uno de ellos, así como las relaciones entre las mismas, permitiendo entender el flujo completo del proceso así como cuando comienza y termina una operación o sistema. En la Figura 4-4, se puede ver a modo de ejemplo un diagrama de Gantt.

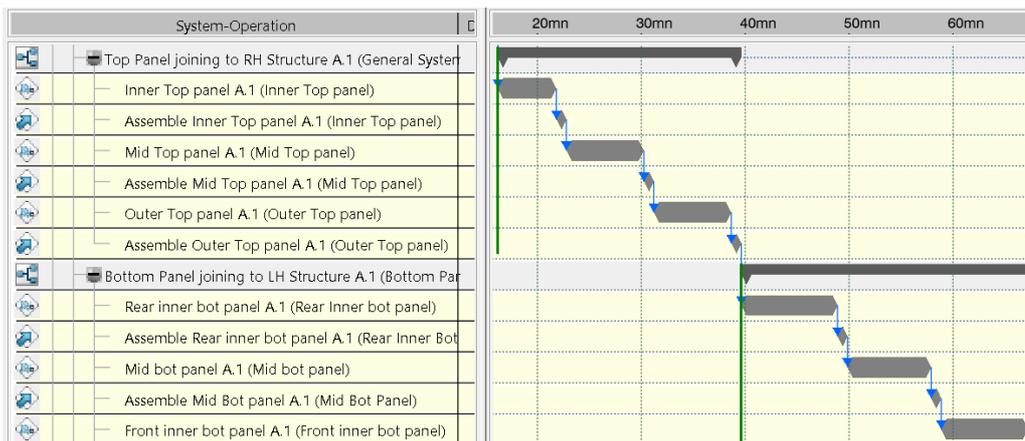


Figura 4-4. Detalle del Diagrama de Gantt de un proceso

4.1.1 Herramienta Time Analysis

Uno de los componentes más importante de cualquier proceso es el tiempo requerido para llevar a cabo las operaciones. Estos tiempos pueden ser calculados, estimados o medidos. En el caso del presente modelo, no se tiene ninguna información de entrada que defina alguno de los tiempos de las operaciones, por lo que tendrán que ser estimados.

En la aplicación *Process Planning*, existe la herramienta *Time Analysis*, la cual permite hacer estimaciones de los tiempos de las operaciones en función de una serie de parámetros que si pueden ser conocidos. Esta herramienta se utilizará para estimar los tiempos de algunas operaciones en el proceso de ensamblaje del ala.

Dentro de *Time Analysis*, existen varios modelos que pueden ser aplicados, cada uno sigue un procedimiento concreto y tiene una serie de variables de entrada y de salida.

En el caso del presente estudio, se utilizará únicamente el modelo *maxiMOST*, siendo *MOST* las siglas de *Maynard Operation Sequence Technique* y el prefijo *maxi* es debido a que los tiempos estimados son para operaciones de escala industrial (por ejemplo, una fábrica). Este modelo está enfocado en medir las actividades que requieren de movimiento de objetos, siendo la mayoría que se realiza manualmente en la industria

movimientos de este tipo.

MOST divide las operaciones en 5 tipos: *General Move*, *Controlled Move*, *Tool Use*, *Manual Crane* y *Process Time*. Donde dentro de cada uno utiliza una serie de parámetros concretos para estimar el tiempo.

En la Figura 4-5, se representa la lista de modelos incluidos en la herramienta *Time Analysis* y la datacard del modelo *maxiMOST*, donde se pueden ver los parámetros y las pestañas de los 5 tipos de operaciones. Una vez fijados los parámetros, el modelo arroja un tiempo estimado para dicha operación.

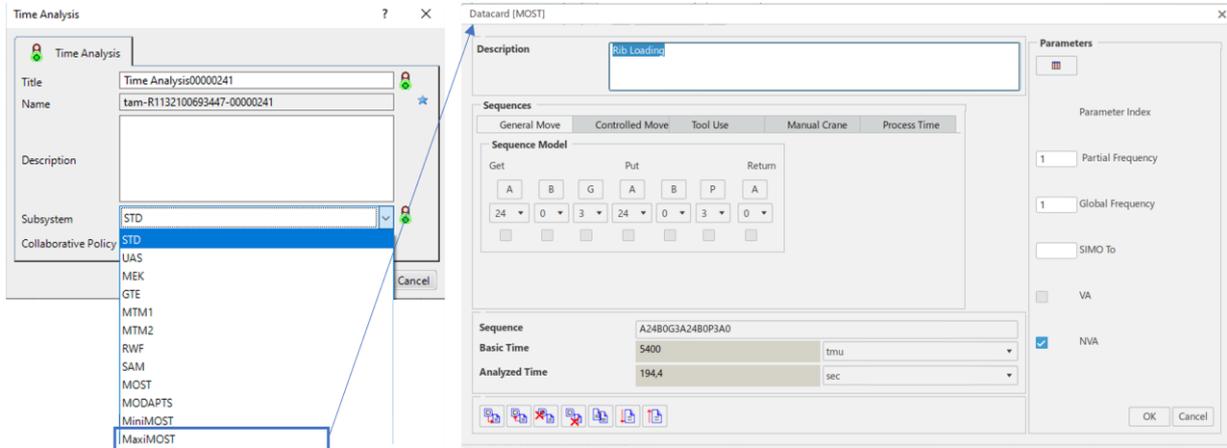


Figura 4-5. Time Analysis y maxiMOST datacard

Los parámetros dentro del modelo *maxiMOST*, varían ligeramente entre sus tipos. En el caso del *General Move*, el cual se centra en las operaciones de traslación de objetos, tiene cuatro parámetros de entrada diferentes, los cuales se han incluido en la Figura 4-6.

Como se puede observar, estos parámetros adquirirán un índice dependiendo de la situación que se dé en cada operación. El parámetro A establecerá un tiempo medio para el desplazamiento en función de los metros o los pasos recorridos, mientras que el parámetro B incrementa el tiempo de la operación en función de la dificultad del desplazamiento. Los parámetros G y P está diseñados para la carga y posicionamiento de objetos. A mayor carga o dificultad de agarre, mayor es G, mientras que, a mayor precisión en el posicionamiento del objeto, mayor es P.

Con la ayuda de estos parámetros se puede modelar operaciones generales de desplazamiento, carga y posicionamiento de partes, por lo que será muy útil para este proceso de ensamblaje, como se verá en los apartados 4.3.4 y 4.3.5 donde se detallan las operaciones incluidas y la forma en la que se han estimado sus tiempos.

A = Action Distance (mainly horizontal)				B = Body Motion (mainly vertical)		G = Gain Control		P = Placement	
Index	Index X10	Steps	Distance (ft)	Distance (m)	Index	Index X10	Index	Index X10	
0		<= 2 in. (5cm.)			0	No Bod...Motion	0	No P...ement	
1		Within Reach			1		0	Hold	
3		1-2 Steps			3	Sit wit...ustments	0	Toss	
6		3-4 Steps			3	Stand w...strments	1	Lay Aside	
10		5-7 Steps			3	Bend an...0% occ	1	Loose Fit	
16		8-10 Steps			6	Bend and Arise	3	Loose... Blind	
24		11-15 Steps	38	12	10	Sit	3	Plac...ments	
32		16-20 Steps	50	15	10	Stand	3	Place...essure	
42		21-26 Steps	65	20	16	Bend and Sit	3	Place...ement	
54		27-33 Steps	83	25	16	Climb on	6	Positi...h Care	
67		34-40 Steps	100	30	16	Climb off	6	Positi...cision	
81		41-49 Steps	123	38	16	Stand and Bend	6	Positi... Blind	
96		50-57 Steps	143	44	16	Through Door	6	Positi...ucted	
113		58-67 Steps	168	51			6	Positi...essure	
131		68-78 Steps	195	59			6	Positi...Moves	
152		79-90 Steps	225	69					
173		91-102 Steps	255	78					
196		103-115 Steps	288	88					
220		116-128 Steps	320	98					

Figura 4-6. Parámetros del General Move de maxiMOST

4.2 Introducción a la aplicación Equipment Allocation

Una vez definidas las diferentes operaciones, en 3DXExperience se dispone de la herramienta *Equipment Allocation* para realizar el proceso de asignación de los recursos que realizan dichas operaciones. Esta aplicación permite de una forma intuitiva definir dichos recursos, así como la situación espacial de los mismos, lo que permite analizar su posicionado con respecto a los otros y a las partes involucradas en el proceso de fabricación.

Similar a las aplicaciones antes mencionadas, *Equipment Allocation* dispone de una categorización de los tipos de recursos según su categoría y su lógica de trabajo.

Según su categoría, se tienen tres tipos de recursos:

- **Working:** recursos capaces de realizar una operación, también conocidos como del tipo *who*. Algunos ejemplos son: un robot, un operario o una grúa o una cinta transportadora.
- **Non-working:** son los recursos utilizados para realizar la operación, también conocidos como tipo *with*, siendo algunos ejemplos herramientas como destornilladores, remachadoras, etc.
- **Organizational:** son los tipos de recursos que definen la zona donde se realiza una operación, también conocidos como *where*. Algunos ejemplos serían: un área o una estación.

Según su lógica de trabajo, se clasificarán en los siguientes dos tipos:

- **Programmable:** A este tipo de recursos se le puede dar una lógica o comportamiento determinado dentro de un contexto, siendo posible programar sus movimientos e interacciones con los demás recursos u objetos. En esta categoría se englobarían recursos como operarios, robots o grúas.
- **Non-programmable:** A los recursos no programables no se les puede dar un comportamiento determinado dependiendo del contexto, sino que solo pueden realizar la operación para la que están diseñados. Ejemplo: cintas transportadoras, herramientas de mano, sensores, estaciones de fabricación, puntos de almacenaje, etc.

Un resumen de los tipos de recursos disponibles y su clasificación en base a lo detallado anteriormente se puede encontrar en la Tabla 4-3:

Tabla 4-3. Tipos de recursos disponibles en *Equipment Allocation* [10]

Tipo de recurso	Categoría	Lógica	Referenciado por
Area 	Organizational	Non-programmable	where
Manufacturing Cell 	Organizational	Non-programmable	where
Robot 	Working	Programmable	who
Worker 	Working	Programmable	who
Transport 	Working	Programmable	who
Conveyor 	Working	Non-programmable	who
NC Machine 	Working	Programmable	who
Industrial Machine 	Working	Non-programmable	who
Inspect 	Working	Programmable	who
Control Device 	Working	Programmable	who
Logic Controller 	Working	Non-programmable	who
Tool Device 	Non-working	Non-programmable	with
Storage 	Non-working	Programmable	with
Sensor 	Non-working	Non-programmable	with
User-Defined 	Non-working	Programmable	with
Manufacturing Product 	Non-working	Non-programmable	with

Los diferentes tipos de recursos se pueden agrupar y agregar entre sí para así generar conjunto de elementos. Por ejemplo, un recurso tipo Área puede contener varios robots, trabajadores, elementos de transporte o herramientas manuales. Esto será necesario para realizar la definición del *scope* entre los grupos de recursos y los sistemas de operaciones, ya que al igual que a la hora de generar el MBOM o los sistemas de operaciones, es necesario definir los vínculos entre recursos y operaciones definiendo los diferentes links necesarios a alto nivel (grupo de recursos – sistemas de operaciones) mediante el “*Resource-Systems Scope*”.

Una vez realizada esta asignación en el nivel superior de los grupos de recursos, se pasa a realizar la asignación a nivel de operación, definiéndose así qué recursos son necesarios para cada operación.

Como se puede ver en la Figura 4-7, se tendrán varios tipos de links entre operaciones y recursos dependiendo de la categoría de cada uno de ellos: Organizational en verde, working en azul y non-working en amarillo.

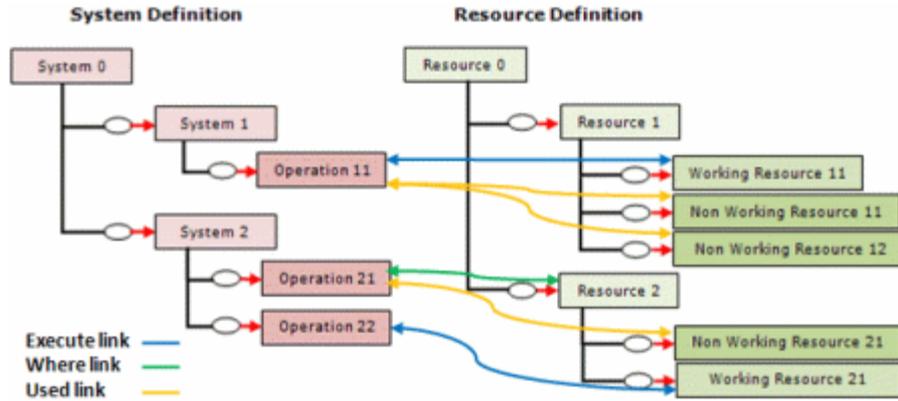


Figura 4-7. Definición del Resource-System Scope y asignación de los recursos [10]

La aplicación *Equipment Allocation* ofrece diferentes herramientas para realizar estas tareas, similares a las anteriores ya usadas, pero en este caso se hace bastante útil el *Assignment Manager*.

Dicha herramienta despliega una ventana auxiliar cuando se selecciona una operación determinada, como se puede ver en la Figura 4-8. En esta ventana, una vez seleccionado la pestaña de recursos, se despliegan las listas de recursos asignados y recursos disponibles. Los recursos disponibles aparecerán clasificados en Working y Non-working resources. Seleccionando el recurso deseado, se puede asignar usando las flechas que aparecen en el centro.

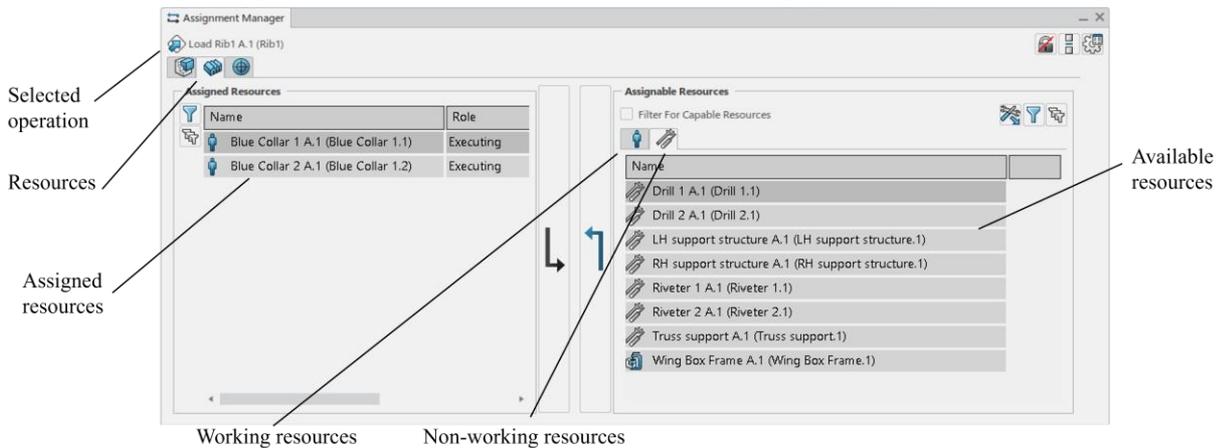


Figura 4-8. Asignación de recursos a operaciones mediante el Assignment Manager

Con respecto a la interfaz de usuario, por esta vez se tienen directamente la representación 3D de las diferentes partes y recursos implicados, lo que le permite al usuario, aparte de definir dichos recursos, darles una posición en la vista.

Con esto, se puede llegar a crear una representación del proceso de ensamblaje, como se puede ver en la Figura 4-9 la cual corresponde a uno de los procesos que se utilizan durante los diferentes tutoriales de la plataforma Edu Space [9].

Una vez se añade un recurso, utilizando el robot y las diferentes herramientas de disponibles, se pueden situar todos los elementos correctamente y poder así realizar un análisis de la distribución en planta.

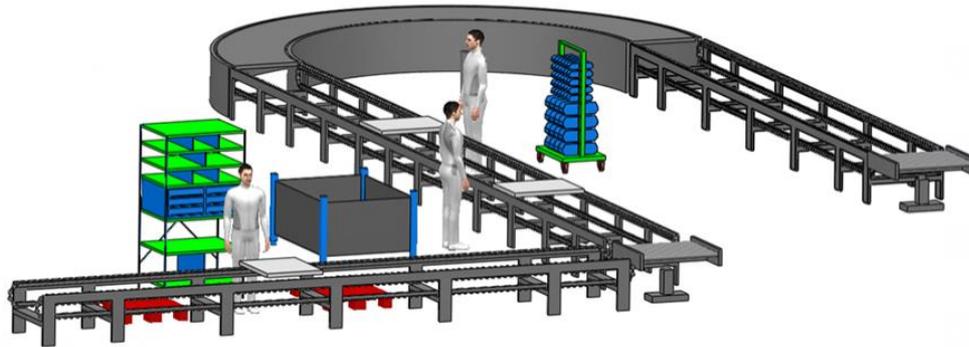


Figura 4-9. Interfaz de la aplicación Equipment Allocation [9]

Una funcionalidad muy útil a la hora de trabajar con recursos es la de definir un catálogo o reutilizar uno ya existente. Un catálogo se puede definir como como un conjunto de elementos, en este caso recursos, que quedan agrupados y clasificados según una serie de criterios, así como si de un repositorio de recursos se tratara.

3DEXperience facilita la creación y uso de catálogos para la definición de un proceso productivo, lo que supone una herramienta muy útil para cualquier empresa que disponga de una serie limitada de recursos. Creando un catálogo para estos, se puede generar de forma eficiente los diferentes procesos productivos que se llevan a cabo dentro de dicha empresa, así como simular varias opciones de fabricación o recursos hasta dar con el más eficiente. Un ejemplo de un catálogo que incluye componentes industriales como contenedores, armarios, racks o mobiliario se puede ver en la Figura 4-10. Además, muchos de estos recursos tienen un diseño parametrizado, siendo posible modificar su diseño (dimensiones, número de brazos, etc.) introduciendo los datos necesarios

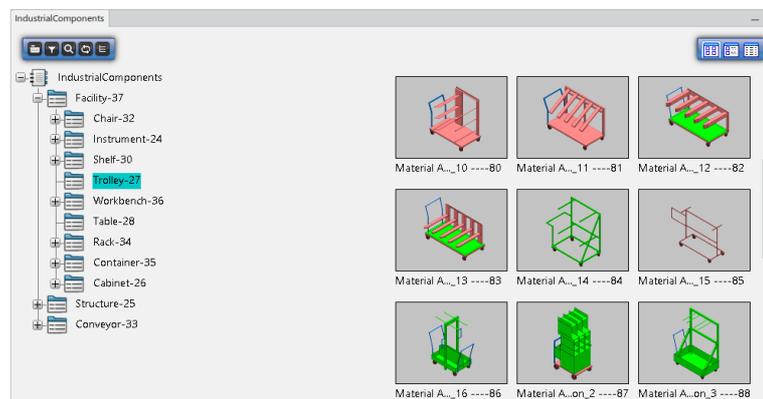


Figura 4-10. Ilustración de un catálogo de recursos

4.3 Operaciones y recursos del cajón alar

En esta sección se detallarán las operaciones para fabricar el cajón alar izquierdo, así como los recursos de los que se dispone o son necesarios para realizarlo.

Primeramente, en la sección 4.3.1 estarán numeradas todas las operaciones en la secuencia que se realizan. Este conjunto de operaciones estará dividido en tres Fases, según aparece referenciado en la literatura soporte que se ha utilizado en este modelo [3] y se han detallado en la sección 4.3.3.1.

En la sección 4.3.24.3.1, aparecen descritos los recursos disponibles.

Es necesario definir una serie de hipótesis para modelar el ensamblaje de este cajón alar izquierdo, puesto que existen variables de las que no están definidas de entrada, como pueden ser: la disposición en planta de la fábrica, la cantidad de operarios de los que se dispone o los tiempos de actuación de las herramientas y ciertos recursos. Todas estas hipótesis están debidamente detalladas en la sección 4.3.3.

Por último, el detalle de cómo se lleva a cabo cada operación en concreto, designado la cantidad de cada recurso

que son necesario, así como el tiempo requerido, se documentan en las secciones 4.3.4 y 4.3.5. Es en estas secciones es donde se describe en profundidad todos los detalles técnicos del proceso y el uso que se le ha dado a las aplicaciones *Process Planning* y *Equipment Allocation*.

4.3.1 Lista de operaciones

En la Tabla 4-4 se incluye la lista de operaciones que se realiza para la construcción del cajón alar izquierdo. Esta lista se ha optimizado en función de los recursos disponibles y su definición final es fruto de haber realizado varias iteraciones definiendo la secuencia de operaciones del proceso.

Se partió de un modelo preliminar incluyendo tan solo los grandes conjuntos como los largueros, revestimientos y costillas, que fue evolucionando en detalle y sufriendo modificaciones en función de su viabilidad respecto a los recursos, siendo la parte de mayor complejidad la integración total de las celosías.

Tabla 4-4. Lista de operaciones del cajón alar

Fase	Nº	Nombre de la operación
I	1	Posicionamiento de las costillas
I	2	Posicionamiento del revestimiento superior en la estructura derecha
I	3	Posicionamiento del revestimiento inferior a la estructura izquierda
I	4	Acercamiento del revestimiento superior al marco central
I	5	Posicionamiento de las barras Outer de las celosías
I	6	Taladrado del revestimiento superior a las costillas y las barras Outer de la celosía
I	7	Cambio de las barras Outer por las Inner de la celosía
I	8	Taladrado del revestimiento superior a las barras Inner de la celosía
I	9	Alejamiento del revestimiento superior y acercamiento del inferior al marco central
I	10	Taladrado del revestimiento inferior a las costillas y la celosía (Inner y Outer)
I	11	Remachado del revestimiento inferior a las costillas
I	12	Taladrado y remachado del ángulo superior de las costillas
I	13	Acercamiento del revestimiento superior al marco central
I	14	Remachado del revestimiento superior a las costillas y remachado de las celosías
I	15	Posicionamiento del larguero frontal y remachado al ángulo de las costillas
I	16	Taladrado de las covers de los revestimientos
II	1	Transferencia del cajón alar a la Estación Horizontal y posicionamiento
II	2	Posicionamiento del larguero anterior y remachado a las costillas
II	3	Taladrado de los largueros a los revestimientos por CN y remachado
II	7	Posicionamiento, taladrado y remachado del fairing
III	8	Taladrado y remachado del montante del alerón en el Wingtip
III	9	Taladrado y remachado de las covers de los largueros

4.3.2 Lista de recursos disponibles

A continuación se listarán los recursos disponibles para el proceso de ensamblaje del cajón alar izquierdo.

Se tendrán dos estaciones principales, la Estación Vertical y la Estación Horizontal. Ambas se definirán como recurso del tipo *Manufacturing Cell*, y a ellas estarán asociadas el resto de los recursos, los cuales dependiendo de su categoría y tipo se clasificarán de una forma u otra.

Entre ellas existirá un puente grúa que moverá las partes más grandes, así como el producto resultante de una estación hacia la otra.

Aparte, se tendrán una serie de utillajes y material de auxiliar para el almacenamiento temporal de las piezas y subconjuntos que abastecerán ambas estaciones de montaje, esto se han definido dentro de un nivel superior de tipo Área llamado *Factory Auxiliary Means and Layout*.

En la Tabla 4-5 se puede ver la lista de recursos disponibles, así como su tipo, lógica y categoría, además de la sección de referencia donde aparece el detalle de cada uno. Los recursos de las secciones desde la 4.3.2.1 hasta la 4.3.2.5, pertenecerán a la Estación Vertical. Los de las secciones 4.3.2.6 a la 4.3.2.8 son íntegros de la Estación Horizontal y el resto serán auxiliares, compartidos o asignables a ambas estaciones.

Tabla 4-5. Recursos disponibles para el ensamblaje cajón alar izquierdo

Nombre del recurso	Sección de referencia	Tipo de recurso	Categoría	Lógica (P / N-P)
Estación Vertical		Area 	Organizational	N-P
Plataforma elevadora	4.3.2.1	Tool Device 	Non-working	N-P
Estructura móvil revestimiento inferior	4.3.2.1	Tool Device 	Non-working	N-P
Estructura móvil revestimiento superior	4.3.2.1	Tool Device 	Non-working	N-P
Marco universal del cajón alar	4.3.2.1	Manufacturing Product 	Non-working	N-P
Posicionadores para costillas y celosías	4.3.2.1	Tool Device 	Non-working	N-P
Estación Horizontal	4.3.2.1	Area 	Organizational	N-P
Posicionador para el fairing	4.3.2.1	Tool Device 	Non-working	N-P
Soporte para la punta del ala	4.3.2.1	Tool Device 	Non-working	N-P
Sistema de taladrado automático por CN	4.3.2.1	Robot 	Working	P
Puente grúa	4.3.2.1	Transport 	Working	P
Taladradora	4.3.2.1	Tool Device 	Non-working	N-P
Remachadora	4.3.2.1	Tool Device 	Non-working	N-P
Operarios	4.3.2.1	Worker 	Working	P
Utillaje auxiliar de las estaciones	4.3.2.1	Storage 	Non-working	P

En las siguientes subsecciones se encontrará el detalle de cada recurso y su ilustración.

4.3.2.1 Estación Vertical

La estación vertical es la grada principal donde se desarrollarán las actividades de la Fase I del proceso. Como se puede ver en la Figura 4-11, se compone de una plataforma cercada a la que se accede mediante escaleras por cada uno de los lados y que se compone de grandes elementos estructurales, algunos de ellos son móviles o desmontables.

En el centro de esta, se encuentra el marco central sobre el que se ensamblará el ala, el cual es fijo durante el proceso y está soportado por grandes estructuras como el pórtico, que se puede encontrar en un lateral, o las vigas verticales. En este marco, se encuentran una serie de posicionadores neumáticos a lo largo de las vigas superiores e inferiores; estos son una serie de barras que se pueden ajustar en altura y los cuales serán el soporte para el ensamblado de las costillas, celosías y larguero frontal. Aparte, en los laterales del marco central se tienen los soportes de la punta de ala y del encastre, los cuales serán las guías para la correcta integración de la costilla de punta de ala y de las piezas del encastre, que son los largueros y los revestimientos.

Existe una parte móvil de la plataforma que permite elevar el suelo de la misma, se ha designado en la Figura 4-11 como *Lifting Platform* y permite realizar trabajos ajustables en altura, lo que es necesario para que un operario alcance a la parte más elevada de esta Estación Vertical.

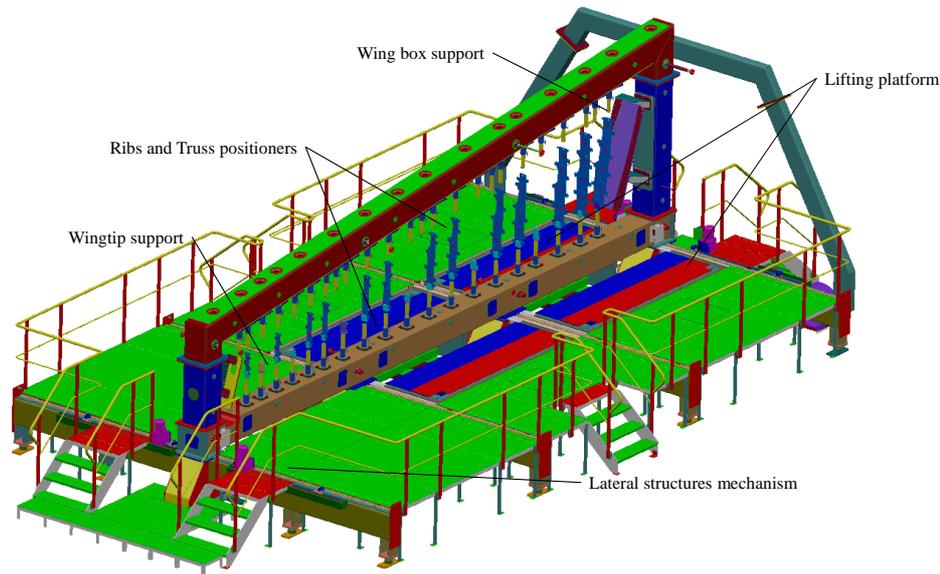


Figura 4-11. Detalle de la estación vertical

Por último, se detalla en dicha Figura 4-11 una serie de mecanismos en los lados de esta. Estos sirven para actuar las estructuras laterales motorizadas con sistema de vacío para posicionar los revestimientos, las cuales son móviles en solo una dirección y se han detallado a continuación, en las secciones 4.3.2.2 y 4.3.2.3.

Esta grada está equipada con soportes anti-gravitatorios para las herramientas de mano que son necesarias utilizar y con suministros de aire y electricidad para poder accionar los mecanismos de las estructuras laterales y sus sistemas de sujeción de los revestimientos y la plataforma elevadora.

4.3.2.2 Estructura móvil para revestimiento inferior

Sobre la estación vertical se encuentra esta estructura móvil situada en la parte izquierda. Su funcionalidad es la albergar el ensamblaje de los paneles del revestimiento inferior, los cuales son posicionados aparte del marco central, primeramente, como se detalla en la sección 3.2.2.

Esta estructura es capaz de realizar un movimiento de aproximación al marco central mediante el mecanismo motorizado que la guía por los raíles situados en la plataforma. Esto permite que el revestimiento inferior se puede aproximar y alejar de forma independiente al marco central, lo cual será necesario para realizar las operaciones que afectan a estas piezas.

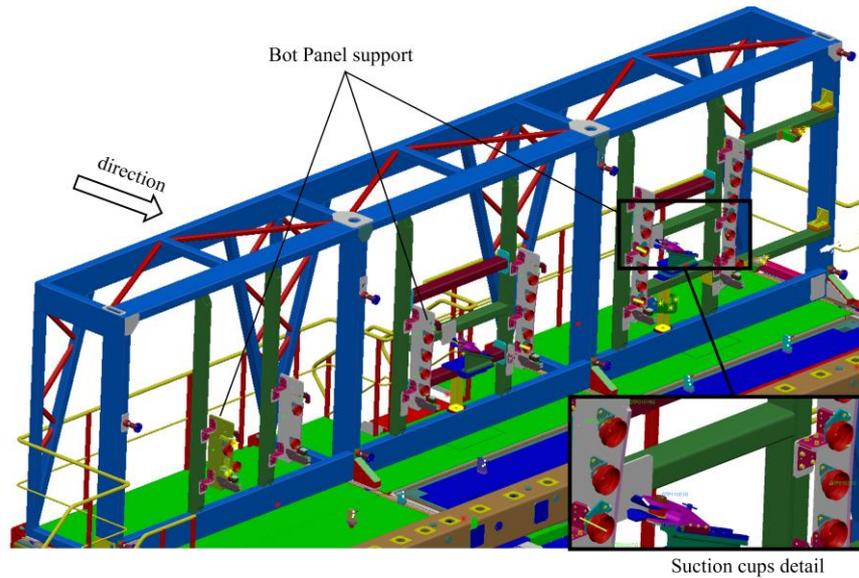


Figura 4-12. Detalle de la estructura lateral izquierda para el revestimiento inferior

Unos componentes relevantes de esta estructura son los elementos de sujeción de los diferentes paneles. Estos se componen de una serie de soportes en los extremos los paneles, así como de ventosas o copas de succión, como se puede ver en la Figura 4-12, que unidos al sistema de vacío que tiene esta estación, permiten que los paneles queden adheridos.

Estos soportes y ventosas permiten también reglar el ajuste de los diferentes elementos del revestimiento inferior antes de ser integrados con el resto de las partes del cajón alar, así como asegurar que se mantienen en la posición correcta durante el movimiento de la estructura lateral o las otras operaciones.

4.3.2.3 Estructura móvil para revestimiento superior

En la parte derecha de la plataforma se tiene la estructura móvil para el montaje del revestimiento superior. En primera instancia, tiene la misma composición y tipo de desplazamiento que la estructura para el revestimiento inferior, salvo por la forma en la que esta estructura sujeta el revestimiento superior.

Se requiere del acople del marco universal para poder realizar su función principal, como se puede ver en la Figura 4-13. Esto hace que esta estructura móvil no tenga los elementos de sujeción de los paneles, sino que disponga de una serie de soportes para situar el marco universal, el cual se detalla en la sección 4.3.2.4 de este documento.

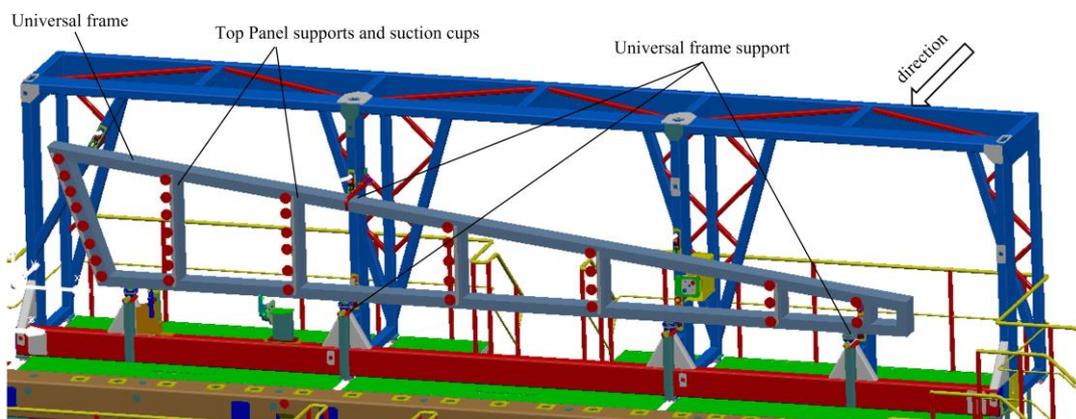


Figura 4-13. Detalle de la estructura lateral derecha para el revestimiento superior y marco universal

4.3.2.4 Marco universal del cajón alar

Para realizar el montaje del revestimiento superior separado de los elementos del marco central de la estación vertical, es necesario disponer de un marco universal del cajón alar.

Este marco es una estructura soporte con la forma del ala y con varias filas de ventosas para adherir cada uno de los tres paneles del revestimiento superior. Lo más relevante de este elemento es su movilidad, ya que una vez se monten los paneles del revestimiento superior y se integren con el resto de los elementos, pasa a ser el útil que permite mover el cajón alar, como se puede ver en la Figura 4-14.

En el modelo utilizado para este estudio no se encontraba la representación de este marco universal, por lo que se ha utilizado la Figura 4-14 obtenida de la fuente [3] como base para realizar un modelado muy básico de este relevante elemento, que permita entender el conjunto de útiles necesarios y definir el proceso de ensamblaje. Esta representación se puede ver en la Figura 4-13 de la sección anterior.

Se deja como propuesta de proyectos de diseño de utillaje el modelado de este marco universal.



Figura 4-14. Fotografías del marco universal [3]

4.3.2.5 Posicionadores para costillas y celosías

Otro de los elementos relevantes de la estación vertical son los posicionadores o soportes de las costillas y celosías.

En el caso de las costillas, se tiene una serie de barras verticales con un elemento de sujeción acoplado a cada extremo de estas, los cuales posicionan las 6 costillas en su situación correcta mediante una unión con bulones. El detalle de estos elementos se encuentra en la Figura 4-15, donde cabe recalcar que solo se disponía de los elementos inferiores la maqueta de este utillaje, pero son idénticos a los superiores y se pueden ver en la parte derecha de la figura.

En cuanto a las celosías, su montaje requiere de unos soportes que permitan ajustar la posición de cada una de las barras. Como si de unos moldes se tratara, estos elementos auxiliares se componen de una serie de fijadores (en verde en la Figura 4-15) para posicionar correctamente las barras y así poder llevar a cabo las operaciones de taladrado y remachado de estas. La forma de sujeción al marco central es también mediante bulones en sus extremos, lo que hace que su montaje y desmontaje sea fácil de realizar por los operarios. Esto es necesario ya que, como se verá en la sección donde se describa la operación de montaje de las celosías, la 4.3.4.5, se requiere del volteo de estos elementos para montar las barras interiores y superiores.

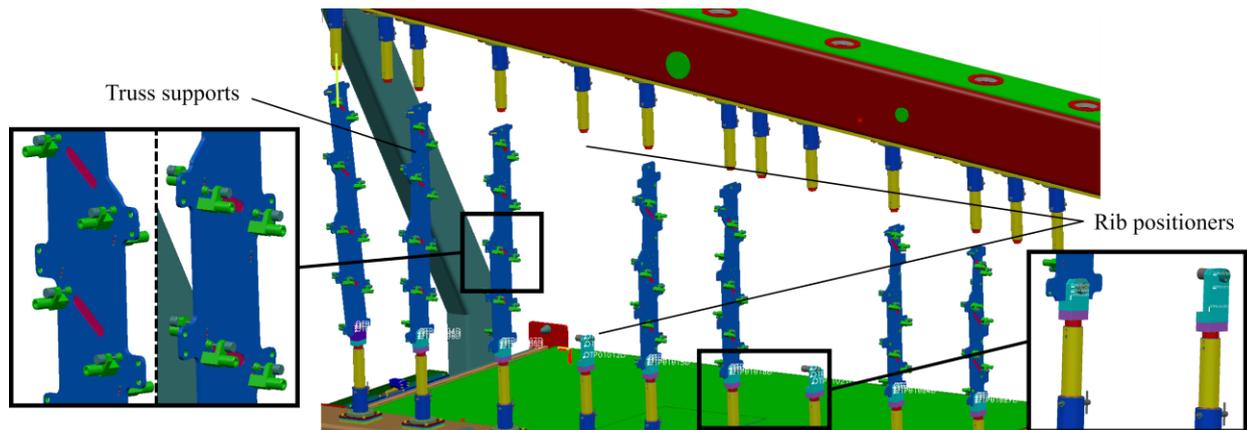


Figura 4-15. Detalle de los posicionadores para costillas y celosías

4.3.2.6 Estación Horizontal

La Estación Horizontal es la grada en la que tiene lugar las operaciones de las Fases II y III del proceso de fabricación del cajón. En comparación con la grada Vertical, es de menor dimensión y complejidad como se puede ver en la Figura 4-16.

A esta estación llega el cajón alar situada sobre el marco universal, por lo que como elemento principal se puede destacar el sistema receptor sobre la que descansará el marco universal, así como una serie de mecanismos que permiten ajustar la altura y posición correctas.

Esta grada está equipada con suministros de aire y electricidad, así como un sistema de taladrado automático por Control Numérico para taladrar los dos largueros del cajón alar [3]. Desafortunadamente, no se disponía de la maqueta de este sistema, pero se ha generado un modelado simple del mismo y se ha situado sobre los raíles que dicho sistema recorre, en los laterales del marco central de la grada. El detalle puede verse en la Figura 4-16.

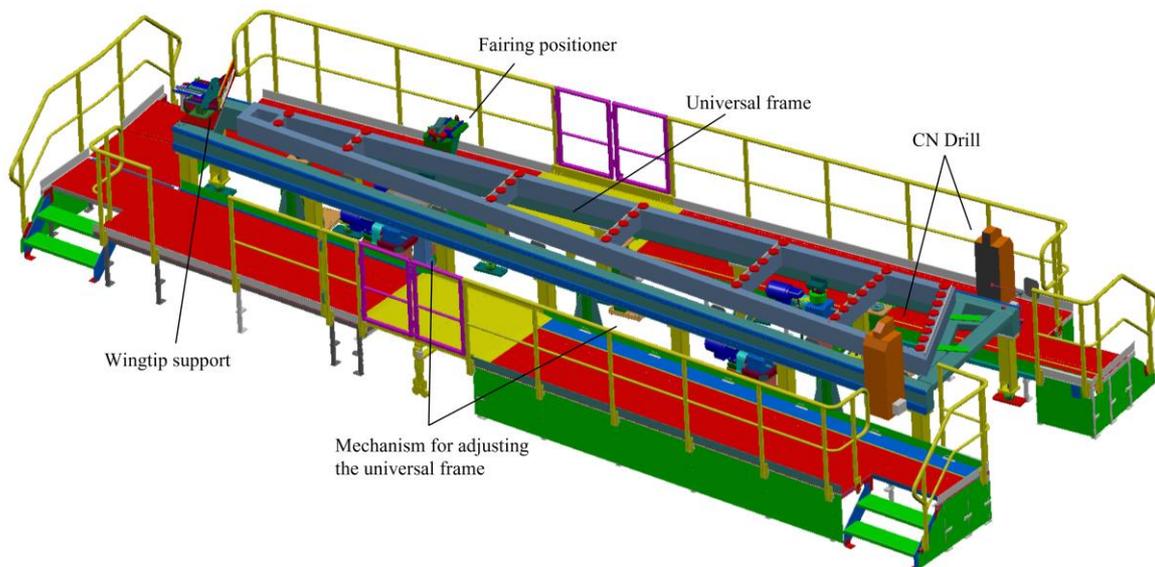


Figura 4-16. Detalle de la estación horizontal

4.3.2.7 Sistema de taladrado automático por CN

Como se puede ver en la Figura 4-16, sobre el marco central de la Estación Horizontal se tiene un sistema de taladrado automático por Control Numérico para realizar el taladrado de los largueros a los revestimientos.

Este sistema realizará de forma paralela el taladrado de dos filas de remaches por cada larguero y se programará para que vaya avanzando desde el encastre hasta la punta del ala.

Dicho sistema de taladrado no estaba incluido en el modelo, pero se ha representado de manera simplificada como se puede ver en la Figura 4-16 en base a la documentación de referencia, en la que se incluye la Figura 4-17.



Figura 4-17. Foto del sistema automático de taladrado

4.3.2.8 Posicionador para el fairing

Este elemento permite ensamblar las partes del fairing e integrarlo con el cajón alar mediante el larguero anterior y los revestimientos.

Está compuesto de varias piezas y mecanismos de ajustes, como se puede ver en la Figura 4-18, para así reglar de forma óptima cada una de las partes, como se ha comentado en la sección 3.2.9.

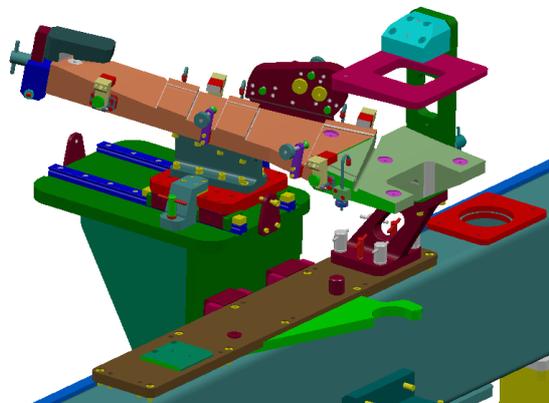


Figura 4-18. Detalle del posicionador del fairing

4.3.2.9 Puente grúa

Para desplazar los elementos más grandes y pesados se requerirá de un puente grúa, el cual recorrerá las posiciones más relevantes del proceso de ensamblaje, como son:

- Situación inicial de las partes del cajón alar
- Estación Vertical
- Estación Horizontal

Algo importante a remarcar es el tipo de movimiento que realizan estos tipos de grúas. Estos se suelen desplazar en un solo eje de movimiento, aparte del desplazamiento de subida y bajada de la grúa, lo que supone que se requieran que los elementos a los que este puente grúa deba alcanzar estén alineados con esta dirección de

desplazamiento. Una suposición de la distribución de estos elementos se puede encontrar en la Figura 4-24.

Un ejemplo de un puente grúa se puede ver en la Figura 4-19, obtenida de la documentación de referencia [3].

Aparte del puente grúa como tal, se requerirá de una serie de utillaje extra para conseguir anclar y elevar los diferentes elementos a elevar, como por ejemplo el marco universal.

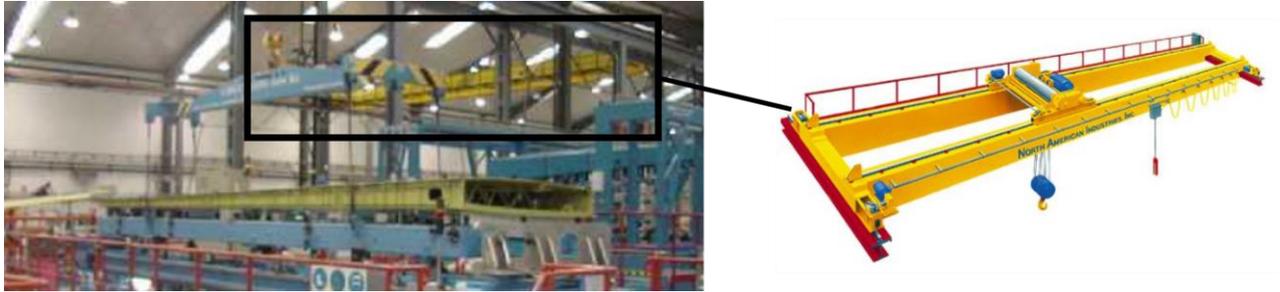


Figura 4-19. Detalle del puente grúa

4.3.2.10 Taladradora neumática

Para llevar a cabo las operaciones de taladrado, se supondrá que se dispone de una serie de taladradoras neumáticas como la que se detalla en la Figura 4-20, obtenida de la referencia [3].

Estas taladradoras serán de accionamiento manual por el operario, lo que requerirá que se utilicen útiles para el correcto posicionado de los taladros antes de realizarlos y así asegurar la correcta operación. Además, se generará una viruta fina que requerirá de un posterior aspirado o soplado para que no quede en el interior del cajón alar, y así evitar problemas de contaminado del mismo.



Figura 4-20. Ejemplo de la taladradora

4.3.2.11 Remachadora neumática

Se supondrá que se tendrá una serie de remachadoras neumáticas de accionamiento manual como las que aparecen en la Figura 4-21, obtenidas de las referencias [11] y [12].

Estas remachadoras deformarán los remaches en el interior de cada taladro empleando potencia neumática y su accionamiento será manual y llevado a cabo por un operario.



Figura 4-21. Ejemplo de la remachadora

4.3.2.12 Operarios

Otros de los recursos básicos serán los operarios o personal humano realizará las tareas de transporte, posicionamiento, ensamblaje, taladrado y remachado. En la mayoría de los casos, estos operarios serán los que utilicen los otros recursos que se han detallado anteriormente, es por ello por lo que son recursos del tipo *Working*.

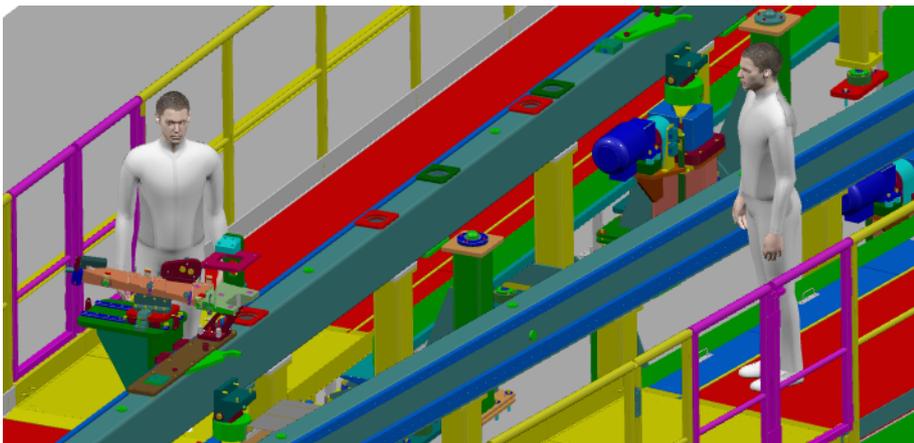


Figura 4-22. Detalle de operarios en la estación horizontal

4.3.2.13 Utilaje auxiliar de las estaciones

Las estaciones principales deben abastecerse desde posiciones auxiliares cercanas a ellas, donde las piezas y conjuntos puedan ser traídas y posicionadas desde el almacén. Además, se necesitarán áreas auxiliares de trabajo donde se puedan realizar pequeñas operaciones previas a la integración en el cajón alar.

Por esto, se han definido una serie de zonas en la fábrica al lado de las estaciones, que además serán de fácil acceso para el puente grúa. En estas zonas, se puede encontrar unidades de almacenaje como estanterías, racks para el material estándar (remaches, tuercas, arandelas, tornillos, etc.), mesas de trabajo y útiles específicos para almacenar las piezas del ala como costillas, paneles y largueros. Esto se puede contemplar en la Figura 4-23.

Todos los recursos de este tipo que se han utilizado en el modelo se han obtenido del catálogo *Industrial Components*, obtenido de los tutoriales de la plataforma Edu Space [9], como se detalla en la Figura 4-10.

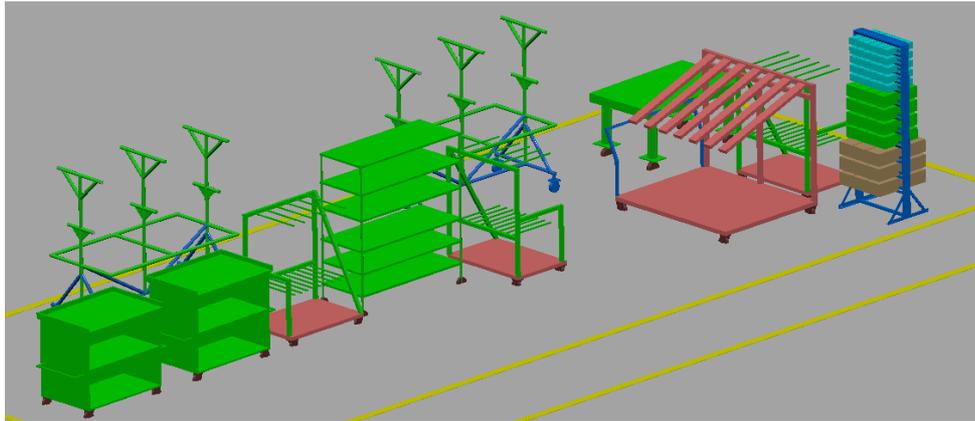


Figura 4-23. Detalle de posicionador de larguero anterior

4.3.3 Hipótesis del proceso de ensamblaje

En esta sección se resumirán las diferentes hipótesis que se han tenido en cuenta para diseñar el modelo del proceso de ensamblaje. Estas hipótesis se tomarán sobre tres ámbitos principales: la secuencia de las partes del montaje, la cantidad de recursos y su distribución en la planta de fabricación y los tiempos de las operaciones.

4.3.3.1 Hipótesis sobre la secuencia de montaje de las partes del cajón

De acuerdo con la documentación de referencia [3], el proceso de ensamblaje del cajón alar se realiza en varias fases. Dichas fases, suelen estar vinculadas a las estaciones de montaje que los componentes recorren hasta formar el cajón alar o incluso el ala completa, dividiéndose así las diferentes operaciones a realizar y los recursos empleados.

Se ha tomado como hipótesis que el modelo del proceso de ensamblaje que en este documento se desarrolla, se cumplirá con la división en fases tal y como se establece en [3]. Dichas fases serán:

- Fase I: se llevará a cabo en la Estación Vertical (detallada en 4.3.2.1) y comprenderá desde el inicio del proceso, esto es, el montante de las costillas, hasta el remachado a las costillas al larguero frontal. El detalle de las operaciones se puede consultar en la Tabla 4-4. Lista de operaciones del cajón alar, donde en la primera columna se indica a qué fase pertenece cada operación a realizar.
- Fase II: Se realizará en la Estación Horizontal (detallada en 4.3.2.6), por lo que es necesario que se realice el movimiento de una estación a otra antes de comenzar las operaciones de ensamblaje de esta fase. Se ha considerado que dicha operación de transporte está incluida en la Fase II. Es aquí donde se realizará el taladrado de ambos largueros y su remachado, aparte de otras operaciones menores.
- Fase III: Esta fase tendrá lugar en la misma Estación Horizontal usada en la Fase II y se realizarán las operaciones finales incluidas en el alcance de este modelo, como son la integración del montante del alerón en la punta de ala y las tapas o covers.

En la documentación de referencia [3], se incluyen al menos una fase más (Fase IV), la cual se centra en el montaje de las costillas de los bordes de ataque y de salida, así como realizar una prueba de volteo para detectar elementos que se hayan podido quedar sueltos o confinados en el cajón del ala. Aparte, para las Fases I, II y III, se incluyen más operaciones de las detalladas en la Tabla 4-4, como la integración de las tuberías del sistema hidráulico, sin embargo, estas operaciones y la Fase IV no se incluyen en el alcance de este estudio por no disponerse de la información suficiente para realizarlo, así como, de las maquetas de estas gradas, utillajes o partes.

4.3.3.2 Hipótesis sobre la cantidad de recursos utilizados y su situación en la fábrica

Aun partiendo de la lista de recursos disponibles que se ha detallado en la sección 4.3.2, quedan algunas variables y detalles sin definir de estos y los cuales son relevantes para el proceso de fabricación. Es por eso por lo que se

han definido las siguientes hipótesis relacionadas con la distribución y cantidad de recursos de algunos tipos:

- Distribución en planta de los recursos:

Es necesario definir una situación en el plano de las Estaciones Vertical y Horizontal, y las áreas donde se posicionan las piezas antes de ser definitivamente despachadas a estas estaciones. La distancia entre ellas será la variable principal que define los tiempos de carga y transporte de las partes, junto con la velocidad de desplazamiento, por lo que es más que relevante elegir una situación adecuada para así obtener unos resultados representativos de los tiempos de este tipo de operaciones.

Debido a esto, se ha supuesto la distribución que se puede ver en la Figura 4-24. Como se puede observar, primeramente, se tendrá la Estación Vertical que será donde se realicen las primeras operaciones, y posteriormente se pasará a la Estación Horizontal, definiendo así la dirección de fabricación.

Al lado de cada estación, se han situado zonas auxiliares para abastecerlas con las partes del ala y las herramientas. La zona de abastecimiento de mayor tamaño será la encargada de abastecer a la Estación Vertical, puesto que en esta estación se lleva a cabo la integración de las piezas más volumétricas, como son los revestimientos y los largueros, y por tanto se requiere mayor espacio de almacenamiento.

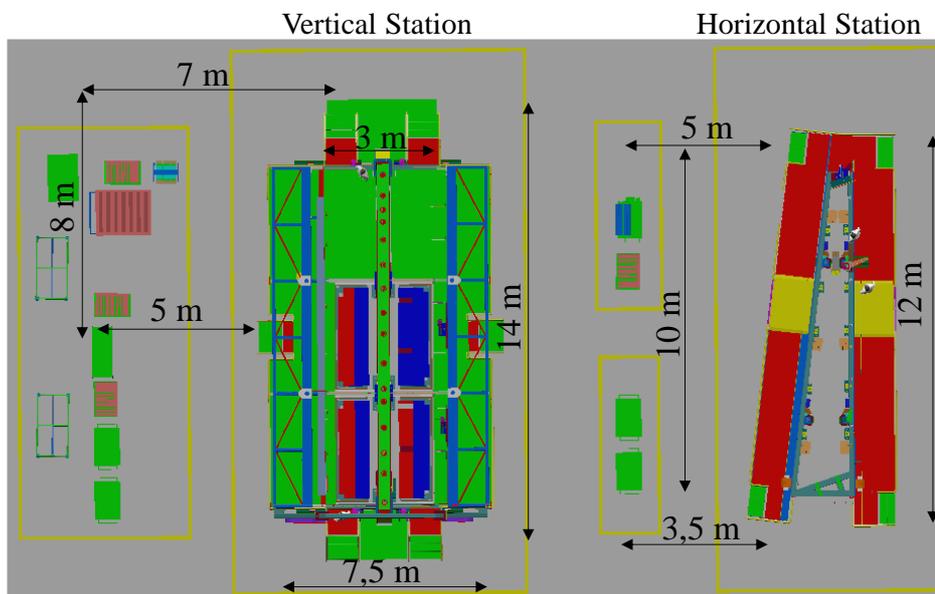


Figura 4-24. Distribución de las estaciones de montaje

La zona auxiliar situada entre ambas estaciones estará dedicada en su mayor parte a las herramientas y partes que la Estación Horizontal necesita, aunque también puede abastecer a la otra estación en ciertos puntos del proceso. En esta zona no se almacena ningún componente de gran tamaño, y puesto que en la Estación Horizontal es donde se integrará el larguero anterior (según la Tabla 5-5), se requerirá transportarlo desde el útil de soporte en la otra zona auxiliar a esta estación usando el puente grúa.

Las distancias entre las estaciones y las zonas auxiliares se han definido en la Figura 4-24, lo que será influyente a la hora de calcular los tiempos de las operaciones de transporte de las piezas y de los desplazamientos que los operarios deben realizar desde las estaciones a las zonas donde se encuentran las herramientas, las piezas de menor tamaño o los racks con los remaches y otro material estándar.

- Número de operarios y herramientas manuales:

Otra variable relevante para modelar el proceso de ensamblaje es el número de recursos que realizarán las operaciones, los *who* o *working resources* definidos en 4.2, esto es, el número de operarios. Estos operarios están asignados a las Estaciones Verticales y Horizontales, pero el número de personal que existe o es necesario en cada una de ellas no está definido de antemano, por lo que es necesario establecer una hipótesis de partida.

En función de los demás recursos como son las gradas, el puente grúa o estructuras laterales, se estima que el número de operarios para una correcta actuación es de dos operarios, debido a que un solo operario puede tener dificultades para realizar la mayoría de las operaciones. Es posible que se pueda aumentar el número de personal trabajando en las estaciones, sin embargo, se establecerá la hipótesis de que se tienen dos operarios por Estación de montaje para simular el proceso.

Para el caso en el que se quiera aumentar la demanda de fabricación de este tipo de alas, se deberá optimizar el tiempo total de fabricación, siendo una forma habitual de hacerla realizando operaciones en paralelo o previamente, lo que tiene por consecuencia una necesidad del aumento de recursos disponibles. Una comparativa de este caso se ha detallado en las secciones del Capítulo 6.

4.3.3.3 Hipótesis sobre las velocidades de desplazamiento de operarios, puente grúa y estructuras móviles

El tiempo que requiere cada operación es una de las variables clave del modelo. Algunos de estos tiempos se han estimado usando la herramienta *Time Analysis* de la aplicación *Process Planning*, pero otros tiempos se han calculado partiendo de una serie de estimaciones e hipótesis como son la distancia a recorrer, la velocidad de desplazamiento o los tiempos de operación de las herramientas. Para este último caso, se detalla en esta sección las principales hipótesis tomadas y cómo se han calculado los principales parámetros, los cuales se utilizarán para estimar el tiempo de cada operación en las secciones 4.3.4 y 4.3.5.

- Velocidad de desplazamiento de los operarios:

Para las operaciones en la que se requiera que el operario que la lleva a cabo se deba desplazar andando en la línea de ensamblaje, se necesita conocer de antemano la distancia a recorrer y la velocidad media de desplazamiento para así calcular el tiempo.

En la Figura 4-24 se han incluido las principales distancias que se han de realizar, las cuales mayoritariamente son de las Estaciones a las áreas auxiliares para transportar las partes y herramientas requeridas por la operación.

Con respecto a los tiempos de desplazamiento, se ha calculado partiendo de las hipótesis que una zancada media de una persona es de $0,6\text{ m}$, y que una persona promedio realiza 2 pasos por segundos con esa longitud de zancada, es por esto, que la velocidad media de desplazamiento calculada será de:

$$0,6\text{ m} \cdot 2 = 1,2\text{ m/s} = 4,32\text{ km/h}$$

La razón por la que se ha estimado esta velocidad partiendo de la zancada media en metros es debido a que uno de los parámetros de entrada de la herramienta *Time Analysis* es el número de pasos a realizar en la operación, los cuales se calcularán con esta longitud de zancada y la distancia a recorrer, según la Ecuación (4-1).

$$\text{número de pasos} = \text{zancada media} \cdot d = 0,6 \cdot d \quad (4-1)$$

- Velocidad de desplazamiento del puente grúa:

El puente grúa que se utiliza para mover las piezas más volumétricas como los largueros, los paneles y el cajón alar resultante después de la Estación Vertical. El movimiento de este recurso se compone de un movimiento vertical que realiza el gancho de la grúa, del movimiento longitudinal que realiza el carro y del movimiento de translación que realiza el puente, según la Figura 4-25.

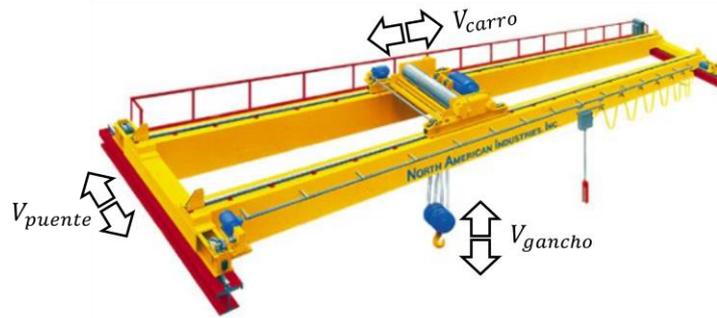


Figura 4-25. Velocidades y movimientos del puente grúa

Estos tres movimientos llevarán asociada cierta velocidad de movimiento, por lo que, sabiendo la distancia que se recorre en cada operación de transporte, se podrá calcular el tiempo total de la operación utilizando la (4-2), donde d es la distancia recorrida.

$$t_{crane} = V_{gancho} \cdot d_{gancho} + V_{carro} \cdot d_{carro} + V_{puente} \cdot d_{puente} \quad (4-2)$$

Los valores de velocidad que se van a emplear se han estipulado utilizando la referencia [13], donde aparecen las velocidades máximas que son capaces de alcanzar algunos modelos de puente grúa, por lo que luego se ha escogido una velocidad media de operación, como se muestra en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6. Velocidades del puente grúa

Velocidad	V_{max} según [13]	V_{media} considerada
V_{gancho}	12,5 m/min	5 m/min
V_{carro}	30 m/min	10 m/min
V_{puente}	40 m/min	10 m/min

- Velocidad de desplazamiento de las estructuras móviles y la plataforma elevadora:

Tal y como se ha definido en el apartado correspondiente de estos recursos (4.3.2.1, 4.3.2.2 y 4.3.2.3), estas estructuras móviles tendrán que realizar un desplazamiento longitudinal a través de los carriles situados en la Estación Vertical para poder así acercar y separar los diferentes revestimientos según las necesidades del plan del proceso de ensamblaje.

Además, la plataforma elevadora que permite realizar los trabajos en las posiciones más alta del marco central también tendrá un mecanismo que se debe de accionar en el momento necesario. Este mecanismo permitirá que se pueda subir uno de los lados de la estructura o ambos a la vez.

Para calcular los tiempos totales de estos movimientos, se requiere definir en forma de hipótesis una velocidad de movimiento. Se va a suponer que realizan un desplazamiento controlado, traccionados por un mecanismo con un paso corto, por lo que el movimiento será lo suficientemente lento como para poder hacerlo de forma segura.

El tiempo que se va a suponer como hipótesis es el que se puede ver en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7. Velocidad de las estructuras móviles y la plataforma elevadora

Velocidad	V considerada
$V_{estructura}$	3 m/min
$V_{plataforma}$	3 m/min

4.3.3.4 Hipótesis sobre los tiempos de taladrado y remachado

Por último, es necesario fijar la forma de calcular los tiempos promedios que se van a considerar para las operaciones de taladrado y remachado.

Estos tiempos se estimarán como un valor promedio multiplicados por el número de taladros o remaches a realizar, por lo que una vez fijado esos valores promedio, el tiempo de cada operación dependerá de la cantidad de taladros o remaches que se hagan en cada una.

El tiempo promedio dependerá de la complejidad del taladrado o remache, de la pericia del operario que lo realiza y de las herramientas empleadas. También se tiene en cuenta que en la Estación Horizontal se dispone de un sistema de taladrado automático por Control Numérico, como se detalla en la sección 4.3.2.6, por lo que el tiempo promedio por cada taladro en las operaciones que se realicen aquí será menor que utilizando la taladradora manual.

Con lo detallado anteriormente, en la Tabla 4-8 se puede encontrar los tiempos promedios considerados en cada una de las ocasiones.

Tabla 4-8. Tiempos de taladrado y remachado

Recurso	Tiempo promedio por taladro o remache
Taladrado manual	20 s
Taladrado automático (Estación Horizontal)	15 s
Remachado manual	10 s

4.3.4 Operaciones de la Fase I

4.3.4.1 Posicionamiento de las costillas

Este sistema será el que inicie el proceso de ensamblaje y consiste en posicionar las diferentes costillas del cajón alar y la costilla de punta de ala. A continuación se muestra cada uno de los detalles de las operaciones que se engloban dentro de este sistema, los recursos utilizados y el tiempo total estimado.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Los operarios van hasta el área donde se sitúa el utillaje en el que se han despachado las costillas, en la zona auxiliar izquierda según la Figura 4-24.

Posteriormente, cada operario obtiene una costilla cada vez, vuelve a la Estación Vertical y la sitúa en su posición correcta utilizando los posicionadores verticales. En el caso de las costillas 1 y 2, por ser las de mayor tamaño, se ha considerado que se requiere a los dos operarios para llevar a cabo el transporte y el ajuste.

Los recursos utilizados serán los de la Estación Vertical, en especial los posicionadores verticales de las costillas, y los dos operarios asignados a estación. Puesto que la Estación Vertical se ha definido como un recurso de categoría *Organizational* no es necesario asignarlo a una operación, además, los posicionadores verticales están incluidos en dicha estación. Debido a esto, los recursos asignados son los que aparecen en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9. Recursos para el posicionado de las costillas

Estación Vertical		Blue Colar 1	
		Blue Colar 2	

La distribución de los operarios será tal y como se ha detallado antes: las costillas 1 y 2, por ser de mayor tamaño, requerirán de ambos operarios, mientras que para el resto de, bastará con solo uno. Esto permite que una vez se monten las costillas de mayor tamaño de forma secuencial, se realicen las operaciones para el resto de las costillas siendo las costillas en paralelo, las 3 y 4 las montará un operario, y las costillas 5, 6 y de punta de ala, el otro operario.

En la Figura 4-26 se puede ver una representación de la operación, centrada en las costillas 3 y 5, mientras que en la Figura 4-27 aparece la representación de este sistema, donde las flechas son las restricciones temporales, que en este caso serán todas del tipo *Precedence Link*, como se puede ver en el diagrama de Gantt en la Figura 4-29.

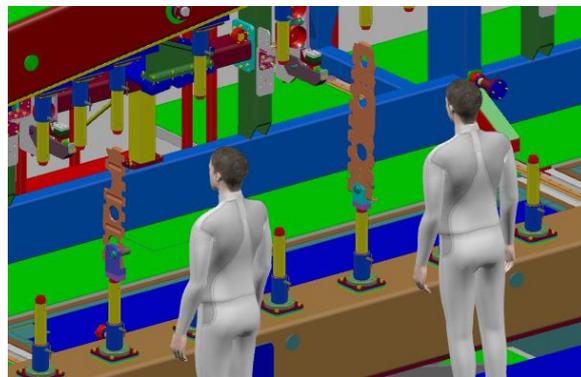


Figura 4-26. Posicionamiento de las costillas

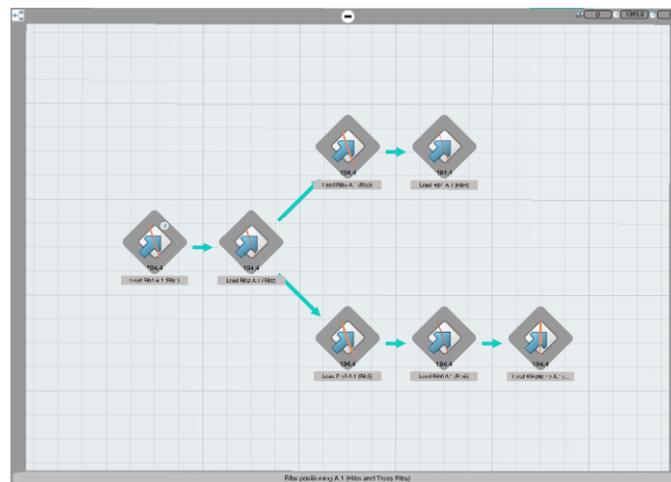


Figura 4-27. Sistema de las operaciones para el posicionamiento de las costillas

- Estimación del tiempo:

En este caso se ha utilizado la herramienta *Time Analysis* de la aplicación *Process Planning*, para estimar el tiempo de este tipo de operaciones, tal y como se describe en el apartado 4.1.1. Dentro del modelo *maxiMOST*, se tratará de un *General Movement*, por lo que los parámetros que se tendrán en cuenta en la datacard serán: el número de pasos o metros a recorrer, el peso o volumen de las costillas y el tipo de ajuste que se realizará. No se va a considerar el parámetro “B”, correspondiente a *Body Motion* debido a que no hay complejidad en el movimiento de agarre y carga de las costillas.

Se ha estimado que cada operario recorrerá de media unos 12 metros, lo que significa que serán unos 20 pasos, según la Ecuación (4-1). Por lo que el parámetro “A” seleccionado será 24.

Aparte, se considera que las costillas son de un tamaño o peso medio, lo que hace que el índice seleccionado para el parámetro “G” sea de 3.

Por último, el parámetro “P” referido al posicionamiento, se considera que será *Placed with Adjustments*, por lo que el índice también será de 3.

Con esto, el tiempo obtenido será de 194,4 segundos o 3,24 minutos.

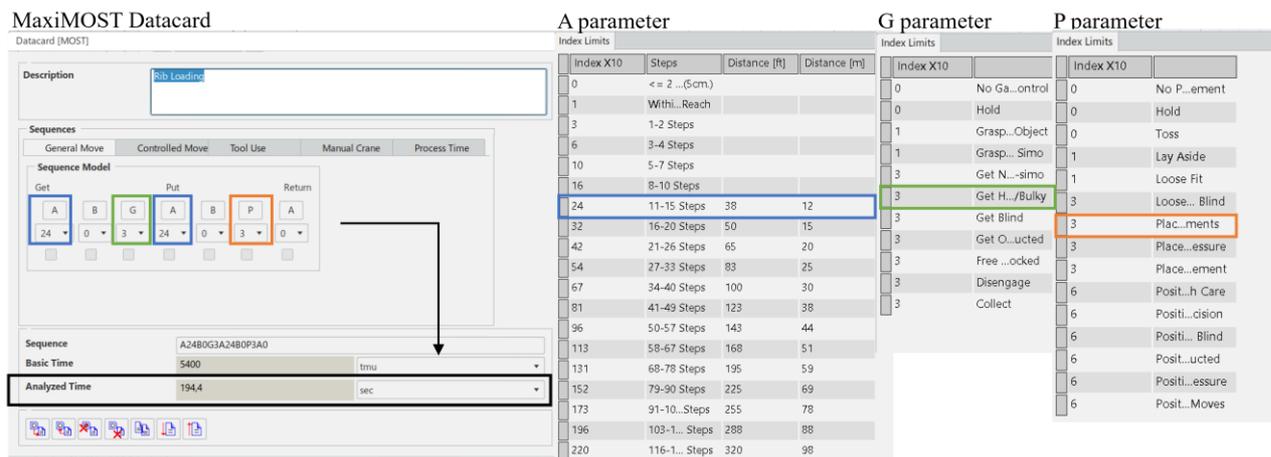


Figura 4-28. Estimación del tiempo del posicionamiento de una costilla

Finalmente, una vez definido el número de operaciones, su secuencia y restricciones temporales, así como los tiempos totales de cada operación, se puede calcular el diagrama de Gantt del sistema completo, el cual se puede ver en la Figura 4-29, obteniéndose que el tiempo total de la operación será de 16,20 minutos.

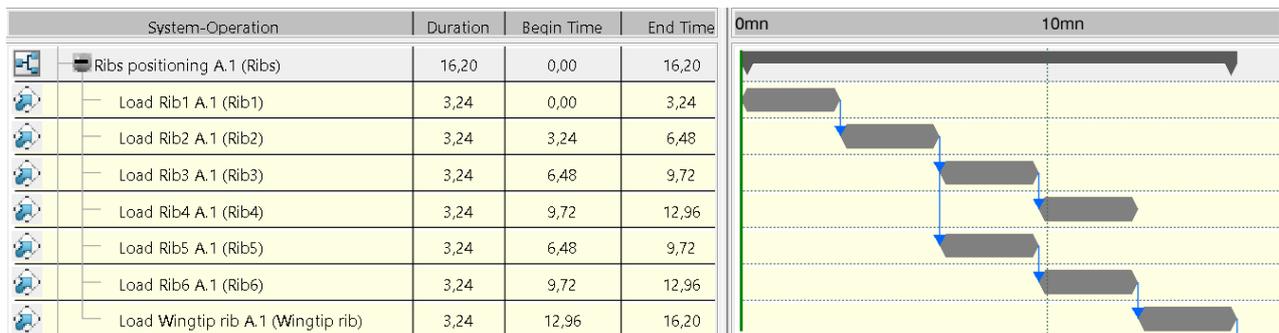


Figura 4-29. Diagrama de Gantt del posicionamiento de las costillas

4.3.4.2 Posicionamiento del revestimiento superior en la estructura derecha

En este sistema de operaciones se realiza el posicionamiento del revestimiento superior en la estructura móvil derecha. Dicha estructura estará en la posición más alejada del marco central, posibilitando espacio suficiente para realizar las operaciones y el paso de los operarios, los cuales accederán a ella por las escaleras laterales de la Estación Vertical.

Los paneles del revestimiento serán transportados con la ayuda del puente grúa. Debido a su tamaño y delicadeza, no es recomendable que sean transportados por los operarios ya que podrían dañarlo o dañarse ellos.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

El revestimiento superior se compone de tres paneles, como se ha detallado en su MBOM en la sección

3.2.5. El orden de estos será primero el más interior, luego el central y por último el de punta de ala (Inner, Mid y Outer Top Panels).

Se supondrá que el puente grúa comienza con el gancho en su posición más alta, es decir, que se requiere bajarlo y anclar el panel mediante cinchas. Posteriormente se eleva el panel y se transporta hasta su posición moviendo el puente y por último el carro del puente grúa, para terminar con la bajada del panel y su posicionamiento en la estructura móvil.

Es necesario puntualizar que la estructura móvil ya estará equipada con el marco universal (ver Figura 4-13), por lo que los paneles son fijados a este marco mediante su sistema de succión y se requerirá para ello a los dos operarios de la estación para situar cada uno de los paneles y activar el puente grúa.

Los recursos necesarios serán por tanto los que se pueden encontrar en la Tabla 4-10.

Tabla 4-10. Recursos para el posicionado del revestimiento superior

Estación Vertical		Blue Colar 1 	Puente grúa 
		Blue Colar 2 	Marco universal 
			Estructura móvil derecha 

Una ilustración de la operación se puede ver en la Figura 4-30, donde se representa el momento después del posicionamiento del primer panel en el marco universal.

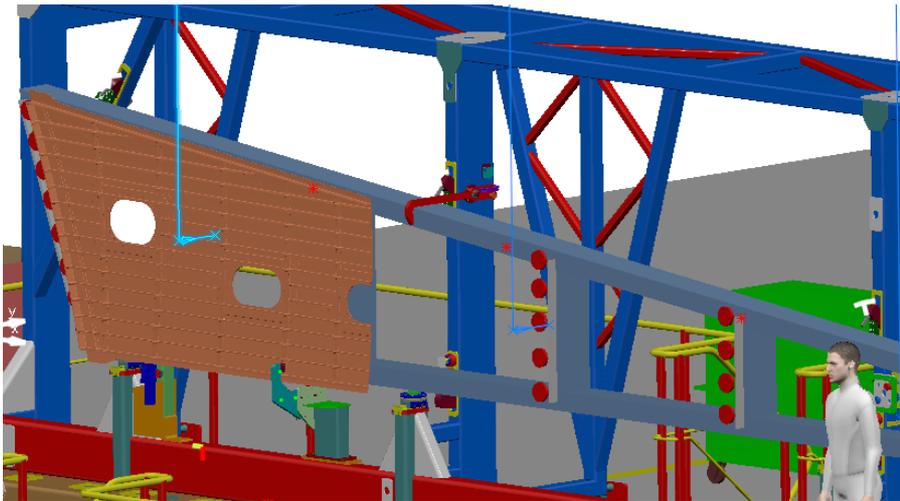


Figura 4-30. Posicionamiento del revestimiento superior

- Estimación del tiempo:

En este caso se tendrá una operación compuesta por un ajuste inicial del panel al gancho de la grúa usando cinchas, una traslación usando el puente grúa y un ajuste final en el marco universal. Para la estimación de los tiempos de ajuste de los paneles al gancho y al marco se ha vuelto a utilizar la herramienta *Time Analysis*, no obstante, para la estimación del tiempo de la traslación se ha usado la Ecuación (4-2) partiendo de la distancia recorrida por el puente grúa.

El sistema de operaciones se realiza panel a panel, por lo que se requiere que el puente grúa regrese a su posición inicial, la cual será sobre el área donde se han despachado los paneles, con el gancho en su posición más elevada.

En la Figura 4-31 se muestra cómo se ha estimado el tiempo de ajuste de los paneles mediante la herramienta *Time Analysis*, de nuevo el modelo *maxiMOST* ha sido el empleado, pero esta vez se requiere usar la pestaña de *Controlled Movement*, la cual dispone del parámetro “I, *Alignment*” donde se ha considerado que el tipo de ajuste es *Alignment with precision*, ($I = 16$). Con esto, el tiempo obtenido será de 57,6 segundos por cada operación de ajuste. Se usará este tiempo tanto para el ajuste al gancho

de la grúa como al marco universal.

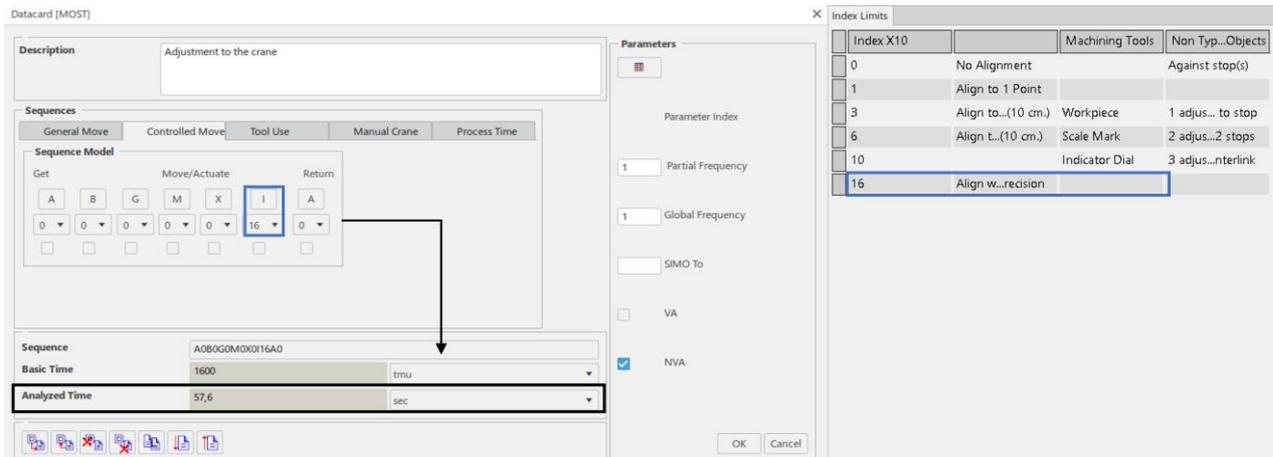


Figura 4-31. Estimación del tiempo de ajuste de un panel al puente grúa o a la estructura

A este tiempo de ajuste se le debe sumar el tiempo de translación. Este tiempo se ha calculado utilizando las velocidades de desplazamiento de cada eje de cada grúa (Tabla 4-6) y la distancia recorrida (según Figura 4-24 y suponiendo que se requiere elevar el panel unos 6 metros). Los resultados para cada panel se pueden ver en la Tabla 4-11, donde el parámetro d es la distancia recorrida para cada uno de los movimientos de la grúa, en la columna t_{crane} es el resultado de aplicar la Educación (4-2).

Tabla 4-11. Tiempos calculados para la translación de cada panel del revestimiento superior

Operación	d_{gancho}	d_{carro}	d_{puente}	t_{crane}
Inner Top Panel	$6\ m \cdot 2$	$3\ m$	$7\ m$	204 s
Mid Top Panel	$6\ m \cdot 2$	$0\ m$	$7\ m$	186 s
Outer Top Panel	$6\ m \cdot 2$	$3\ m$	$7\ m$	204 s

El panel central no tendrá que realizar el movimiento de translación del carro debido a que se ha considerado que su posición está en la misma línea que el útil donde están se han despachado los paneles, por lo que su tiempo será algo menor.

El tiempo total de todas las acciones para cada panel se puede ver en la Tabla 4-12, donde se ha considerado que $t_{transporte} = t_{ajuste\ a\ la\ grúa} + t_{crane} + t_{crane_0}$ considerando t_{crane_0} como el tiempo que se necesitaría para restablecer la posición original de la grúa: en el primer panel, tan solo es necesario bajar el gancho ($6m \cdot 5m/min = 72\ s$), en el caso del segundo y tercer panel la grúa deberá recorrer de nuevo la misma distancia que el panel anterior. Con esto, la grúa finalizará con el gancho junto al Outer Top Panel, lo que hay que tenerlo en cuenta para el próximo sistema de operaciones.

El t_{total} será resultado de $t_{total} = t_{transporte} + t_{ajuste\ al\ marco}$.

Tabla 4-12. Tiempos totales de operación para cada panel del revestimiento superior

Operación	t_{crane_0}	$t_{ajuste\ a\ la\ grúa}$	t_{crane}	$t_{transporte}$	$t_{ajuste\ al\ marco}$	t_{total}
Inner Top Panel	76 s	57,6 s	204 s	337,6 s	57,6 s	395,2 s
Mid Top Panel	204 s	57,6 s	186 s	447,6 s	57,6 s	505,2 s
Outer Top Panel	186 s	57,6 s	204 s	447,6 s	57,6 s	505,2 s

Finalmente, se puede definir el diagrama de Gantt del sistema mostrado en la Figura 4-32 junto a la vista de baldosas del *Process Planning*, donde se puede ver que se ha considerado dos tipos de

operaciones: una primera para el transporte y ajuste a la grúa de duración $t_{transporte}$ y una segunda de carga de tiempo $t_{ajuste\ al\ marco}$.

La razón por lo que no se ha considerado todo en una misma operación de carga o *Loading* según la Tabla 4-1 es porque se ha estimado oportuno aislar el tiempo de traslación usando el puente grúa. Puesto que esa operación no añade valor directo al conjunto, se ha utilizado una operación del tipo *Transfer*.

Con esto, el tiempo total es de 23,43 minutos y este sistema se ejecuta inmediatamente una vez termina el anterior, por lo que en la Figura 4-32 se puede ver que no parte del minuto 0 del proceso completo, sino que se ha tenido en cuenta el tiempo del sistema realizado anteriormente, los 16,20 minutos.

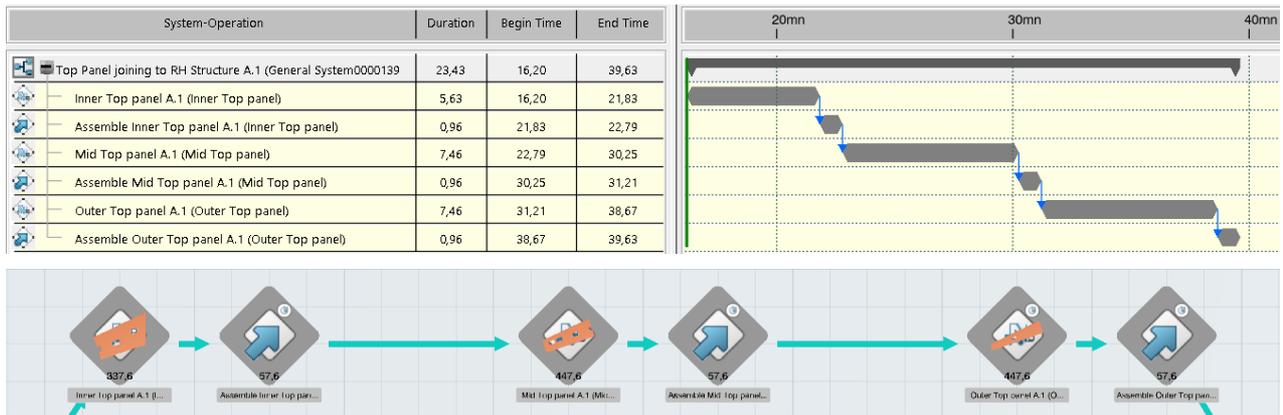


Figura 4-32. Sistema de las operaciones para el posicionamiento del revestimiento superior

4.3.4.3 Posicionamiento del revestimiento inferior a la estructura izquierda

El siguiente sistema de operaciones en realizarse será el posicionamiento del revestimiento inferior en su estructura móvil correspondiente. De nuevo, dicha estructura estará en la posición más alejada del marco central, y los paneles serán transportados con la ayuda del puente grúa.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Según el MBOM de este revestimiento (detallado en 3.2.2), se compone de 4 paneles donde los dos junto al encastre y el siguiente están unidos mediante una serie de brackets y remaches, por lo que en este sistema se tendrá que realizar por primera vez operaciones de taladrado y remachado.

La secuencia seguida será primeramente ajustar los paneles que se deben de taladrar, realizar el taladrado y remachado y por último el panel que está en la punta del ala.

Los recursos utilizados serán similares a los usados para el revestimiento superior, pero incluyendo las herramientas manuales para taladrar y remachar que serán usadas por los operarios.

Tabla 4-13. Recursos para el posicionado del revestimiento inferior

Estación Vertical	Blue Colar 1	Puente grúa	Taladradora neumática (x2)
	Blue Colar 2	Estructura móvil izquierda	Remachadora neumática (x2)

- Estimación del tiempo:

En cuanto a los tiempos, se procederá de forma similar al revestimiento superior, esto es, calculando el tiempo de ajuste a la grúa y a la estructura móvil y añadiéndole el tiempo de traslación en función de la distancia recorrida.

El tiempo de ajuste será el mismo que se detalla en la Figura 4-31, es decir, 57,6 segundos por operación.

La distancia recorrida por el puente grúa para cada panel es la que se detalla en la Tabla 4-14, así como su tiempo calculado según la Ecuación (4-2).

Tabla 4–14. Tiempos calculados para la traslación de cada panel del revestimiento inferior

Operación	d_{gancho}	d_{carro}	d_{puente}	t_{crane}
Rear Inner Bot Panel	$6\ m \cdot 2$	$3\ m$	$10\ m$	$222\ s$
Front Inner Bot Panel	$6\ m \cdot 2$	$3\ m$	$10\ m$	$222\ s$
Mid Bot Panel	$6\ m \cdot 2$	$0\ m$	$10\ m$	$204\ s$
Outer Top Panel	$6\ m \cdot 2$	$3\ m$	$10\ m$	$222\ s$

De nuevo, habiéndose definido como $t_{transporte} = t_{ajuste\ a\ la\ grúa} + t_{crane} + t_{crane_0}$ y considerando t_{crane_0} como el tiempo que se necesitaría para restablecer la posición origen de la grúa, se ha calculado el tiempo total para cada uno de los paneles, siendo t_{total} será resultado de $t_{total} = t_{transporte} + t_{ajuste\ al\ marco}$.

En el caso del primer panel, se debe tener en cuenta que el t_{crane_0} es el resultante de devolver al puente grúa a su posición original desde la posición en la que se encuentra en este momento del proceso, que tal y como se ha detallado en 4.3.4.2 para el otro revestimiento, es junto al panel de punta de ala del revestimiento superior. Después de realizar esto, se debe bajar el gancho para comenzar con el primer panel del revestimiento inferior.

Tabla 4–15. Tiempos totales de operación para cada panel del revestimiento superior

Operación	t_{crane_0}	$t_{ajuste\ a\ la\ grúa}$	t_{crane}	$t_{transporte}$	$t_{ajuste\ al\ marco}$	t_{total}
Rear Inner Bot Panel	$204\ s + 72\ s$	$57,6\ s$	$222\ s$	$555,6\ s$	$57,6\ s$	$613,2\ s$
Front Inner Bot Panel	$222\ s$	$57,6\ s$	$222\ s$	$501,6\ s$	$57,6\ s$	$559,2\ s$
Mid Bot Panel	$222\ s$	$57,6\ s$	$204\ s$	$483,6\ s$	$57,6\ s$	$541,2\ s$
Outer Top Panel	$204\ s$	$57,6\ s$	$222\ s$	$483,6\ s$	$57,6\ s$	$541,2\ s$

Una vez se posicione el último panel, se va a realizar el movimiento de posicionar la grúa en su posición original, por lo que este tiempo será añadido como una operación extra al final del sistema, como se puede ver en el diagrama de Gantt de la Figura 4-35.

Aparte del posicionamiento de los paneles, se deben de realizar las operaciones de taladrado y remachado de los brackets, así como de los tres de los paneles, como se puede ver en la Figura 4-33. La forma de estimar los tiempos de estas operaciones será utilizar los valores medios de tiempos definidos en la sección 4.3.3.4 sobre las hipótesis en los tiempos de taladrado y remachado y multiplicarlo por el número de taladros o remaches a realizar en cada caso.

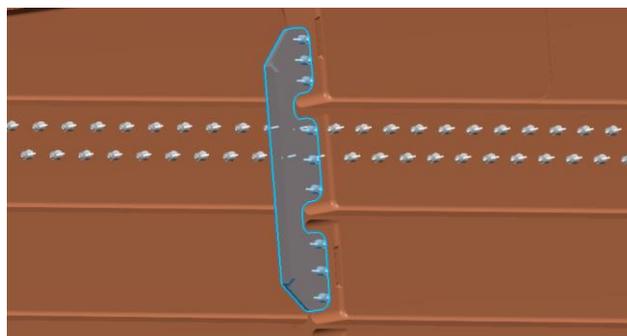


Figura 4-33. Detalle de los remaches entre paneles del revestimiento inferior

El total de taladros y remaches a realizar se puede ver en la Tabla 4–16, donde los cinco brackets tienen

10 taladros, los dos últimos 9 taladros, el ángulo tiene 4 taladros y las dos filas de remaches sobre los revestimientos suman un total de 340. Utilizando los tiempos medios de la Tabla 4-8, se puede calcular el tiempo de taladrado y remachado en cada caso de la Tabla 4-16. En el último de los casos, puesto que para esta operación se dispondrá de dos operarios con posibilidad de usar una taladradora y una remachadora cada uno, la cantidad de trabajo a realizar se va a repartir equitativamente, por lo que el tiempo de taladrado y remachado se puede reducir a la mitad.

Tabla 4-16. Cantidad de taladros y remaches del revestimiento inferior y tiempos

Operación	nº taladros y remaches	$t_{taladrado}$	$t_{remachado}$
Bottom Bracket (1 a 5)	10 (x5)	200 s (x5)	100 s (x5)
Bottom Bracket (6 y 7)	9 (x2)	180 s (x2)	90 s (x2)
Angle fastener	4	80 s	40 s
Remaches sobre los revestimientos	340	6800 s (÷2)	3400 s (÷2)

Por último, es necesario tener en cuenta que antes de comenzar estas operaciones, los operarios deberán ir a la zona de abastecimiento correspondiente y coger los brackets y remaches respectivamente, por lo que es necesario incluir este tipo de operación y su tiempo correspondiente. La forma de calcular el tiempo ha sido mediante la herramienta *Time Analysis*, de una forma similar a lo que se ha detallado para el posicionamiento de las costillas en la sección 4.3.4.1, pero ajustando el parámetro A=50 para los brackets, puesto que la distancia entre la estructura móvil izquierda y el donde se encuentran las piezas es algo mayor que para las costillas (unos 26 metros de media), mientras que para los remaches se ha fijado A = 24 y G=1 por tener la posibilidad de obtenerlos del rack situado en la otra área de abastecimiento.

Una vez transferidos los brackets, se deberán ajustar utilizando un útil en la posición exacta donde se van a remachar, es por ello por lo que se ha definido P=6, significando *Positioning with precision*.

En el caso de los remaches no es necesario añadir el tiempo de posicionamiento puesto que ya se contabiliza en el tiempo total de remachado.

Tabla 4-17. Tiempos de transporte y posicionamiento de los brackets y remaches

Operación	d_{media}	parámetros del <i>Time Analysis</i>	t
Transportar los brackets	27 m	A54B0G3A54B0P3A0	399,6 s
Posicionar los brackets		A0B0G0A0B0P6A0	21,6 s
Transportar los remaches	20 m	A24B0G1A24B0P0A0	176,4 s

Finalmente, una vez definido el número de operaciones, su secuencia y restricciones temporales, se puede construir el sistema con las diferentes baldosas en la aplicación *Process Planning*, detallado en la Figura 4-34, y posteriormente obtener el diagrama de Gantt completo de la Figura 4-35.

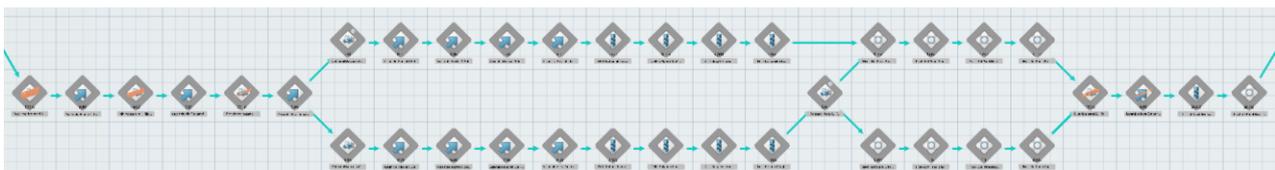


Figura 4-34. Sistema de las operaciones para el posicionamiento del revestimiento inferior

Como se ha comentado antes, se pueden identificar pasos en este sistema: primero se posicionan tres de los paneles. Posteriormente, se taladran y remachan los brackets, donde cada operario realizará la

mitad de las operaciones en paralelo al otro. Uno de ellos deberá ir al rack por los remaches, por lo que el otro puede finalizar sus operaciones y esperar, es por eso por lo que se ha incluido una restricción adicional extra. Después de esto, se posiciona el último de los paneles y ambos operarios comenzarán con el taladrado y remachado de las filas de remaches sobre los paneles.

En la Figura 4-35 también se ha incluido el diagrama del *Workload Balancing* de este sistema y se ha remarcado en celeste la operación de mayor duración, en este caso, la del taladrado, la cual toma un tiempo muy superior al resto. En naranja se muestra la siguiente operación a esta, es decir, el remachado.

El tiempo total de este sistema es de 150,95 minutos.

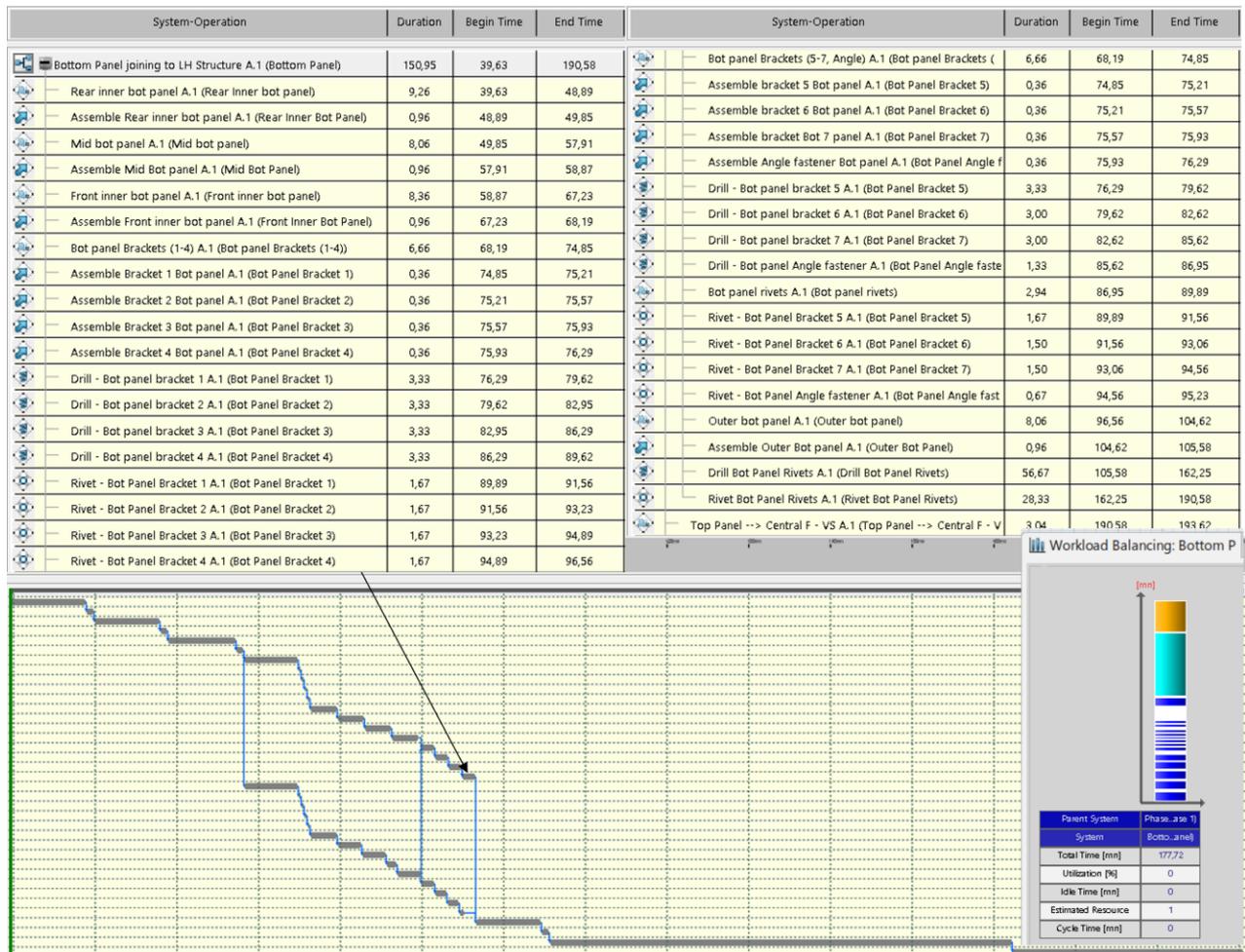


Figura 4-35. Diagrama de Gantt del posicionamiento del revestimiento inferior

4.3.4.4 Acercamiento del revestimiento superior al marco central

Una vez se tienen los revestimientos situados en su estructura móvil correspondiente, comienzan las operaciones sobre ellos para conseguir su integración en el cajón alar. La primera de las acciones a realizar es el acercamiento del revestimiento superior al marco central mediante el accionamiento de la estructura móvil para posteriormente taladrarlo.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

La operación consiste en que uno de los operarios accione el mecanismo de la estructura móvil para acercar el panel, mientras que el otro operario controla el movimiento desde una posición paralela para evitar que haya alguna obstrucción o posible impacto del panel contra un elemento no deseado que pueda provocar un fallo fatal en este.

Por lo tanto, los recursos que se necesitan para esta operación son los resumidos en la Tabla 4-18.

Tabla 4-18. Recursos para el acercamiento del revestimiento superior

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Estructura móvil derecha 
	Blue Colar 2 	

El resultado tras esta operación será el panel situado próximo al marco central, por lo que se podrá a comenzar a realizar las operaciones de taladrado sobre el mismo. En la Figura 4-36 se puede ver la situación resultante, donde se ha remarcado las costillas que están instaladas desde el comienzo del proceso. Adicionalmente se ha ocultado el revestimiento inferior y su estructura móvil.

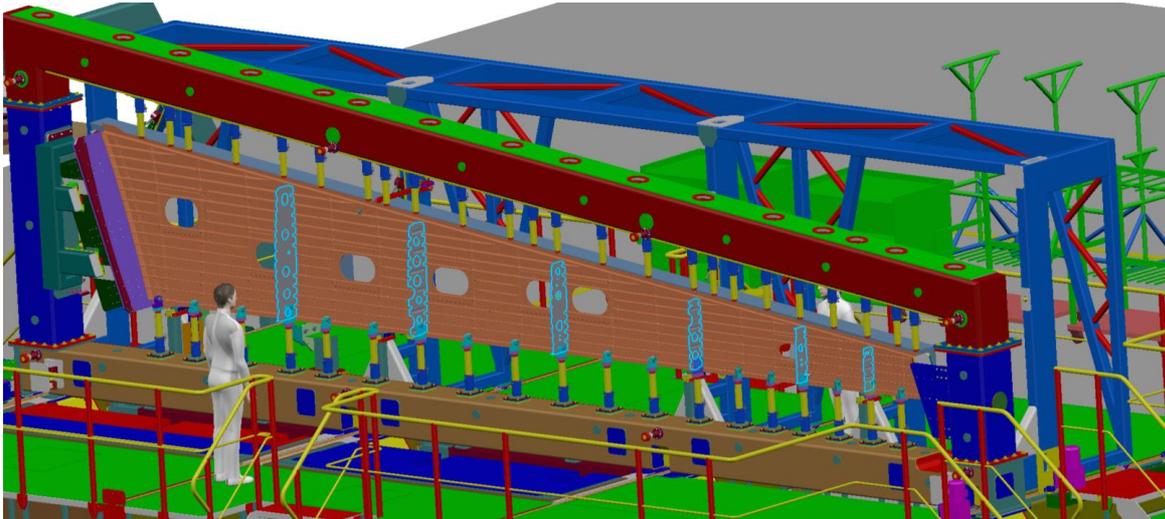


Figura 4-36. Acercamiento del revestimiento superior

- Estimación del tiempo:

Para calcular el tiempo total de la operación, se requiere tener la velocidad del movimiento de las estructuras móviles, así como la distancia a recorrer.

De la Tabla 4-7, conocemos la velocidad que se va a utilizar en el cálculo, y sabiendo que la distancia que ambas estructuras móviles recorren entre su posición más alejada hasta la posición junto al marco central es de 1,55 m, el tiempo resultante de cada desplazamiento de las estructuras es de:

$$1,55 \text{ m} \cdot 3 \text{ m/min} / 60 = 31 \text{ s}$$

Este será el tiempo que la estructura tarda en recorrer la distancia hasta el marco (o viceversa), pero antes de realizar dicho desplazamiento, se considera que los operarios deben acondicionar el espacio para que esta operación sea totalmente segura, retirando las posibles herramientas que pueda haber en la plataforma de la Estación Vertical, así como revisando que no hay ningún tipo de partícula u objeto que pueda obstruir los carriles que direccionan la estructura móvil. Es por eso, que el tiempo total de la operación de transferencia se va a incrementar.

Para estimarlo se ha vuelto a usar la función *Time Analysis*, como se puede ver Figura 4-37, donde en la primera línea del datacard se construye fijando $A = 42$ para estimar el tiempo que los operarios tardan en realizar la preparación antes del accionamiento de la estructura, y la segunda línea es el tiempo del movimiento de la estructura, por lo que el tiempo total de esta operación será de 182,2 segundos.

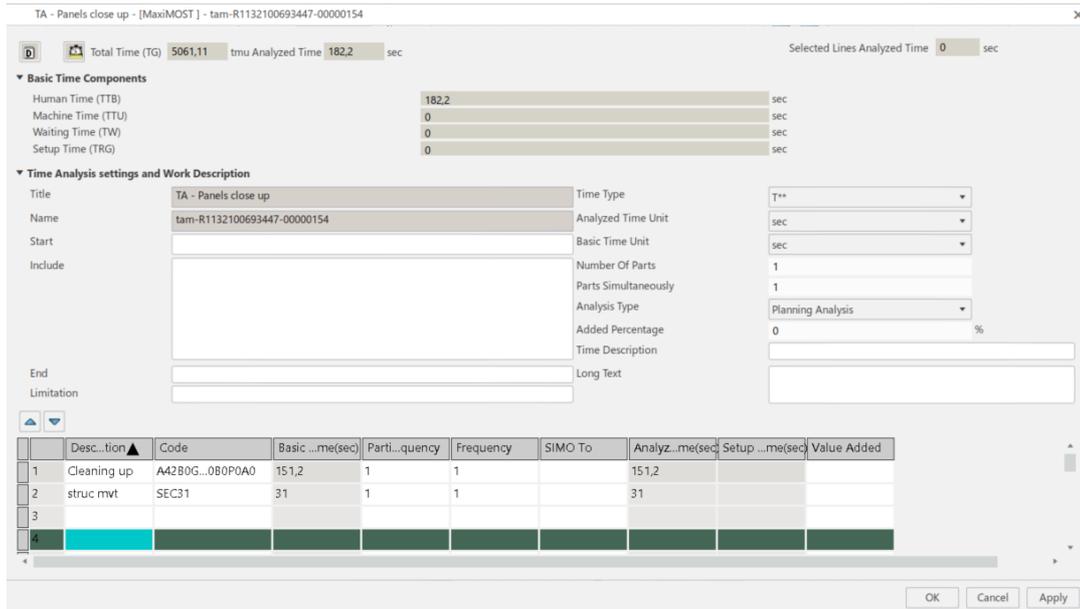


Figura 4-37. Estimación del tiempo de acercamiento de los paneles

En la Figura 4-38 se ha incluido el detalle del diagrama de Gantt donde se puede ver los tiempos de comienzo y finalización de esta operación, así como su duración. Además, se ha incluido el detalle de los recursos utilizados para esta operación, los cuales concuerda con lo detallado en esta sección.

System-Operation		Duration	Begin Time	End Time
	✚ Ribs positioning A.1 (Ribs)	16,20	0,00	16,20
	✚ Top Panel joining to RH Structure A.1 (General System0000)	23,43	16,20	39,63
	✚ Bottom Panel joining to LH Structure A.1 (Bottom Panel)	150,95	39,63	190,58
	— Top Panel --> Central F - VS A.1 (Top Panel --> Central F	3,04	190,58	193,62

Figura 4-38. Diagrama de Gantt del acercamiento del revestimiento superior

4.3.4.5 Posicionamiento de las barras Outer de las celosías

Una vez se tiene el revestimiento superior en la posición de la Figura 4-36, se va a posicionar las barras de la celosía para posteriormente realizar los taladros a este revestimiento. En este sistema tan solo se colocará las barras más exteriores (Outer) de cada celosía, puesto que su taladrado solo se puede hacer en esta configuración. Para taladrar las otras barras (Inner) se requiere desmontar las anteriores y ajustar el útil, lo que se hará en sistemas posteriores.

Previamente a la colocación de las barras, se deberá situar el útil de soporte de las celosías correctamente alineado con los nervios del revestimiento y accionar la plataforma elevadora que permite alcanzar las posiciones más elevadas.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Como se ha introducido, los operarios comenzarán por montar los útiles sobre los que se posicionan las diferentes barras de las celosías, estos útiles son similares a las costillas y su mecanismo de sujeción muy similar, utilizando también los posicionadores de la Estación Vertical.

Posteriormente, deberán situar las barras a montar próximas al marco central, por lo que deben traerlas desde el área de abastecimiento donde se han despachado. Una vez aquí, se irán posicionando una a una las barras en su posición correspondiente.

Para realizar estas operaciones, se necesitará los dos operarios y del útil para el posicionado de las barras. Además, como se puede ver en la Figura 4-39, las celosías próximas a las primeras costillas tienen barras situadas en una posición muy elevada, por lo que se requiere activar la parte izquierda de la plataforma elevadora de la Estación Vertical, lo que permitirá que los operarios puedan trabajar de una forma ergonómicamente correcta.

Con esto, los recursos disponibles serán los incluido en la Tabla 4-19.

Tabla 4-19. Recursos para el posicionamiento de las celosías

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Soporte de las celosías 
	Blue Colar 2 	Plataforma Elevadora izquierda 

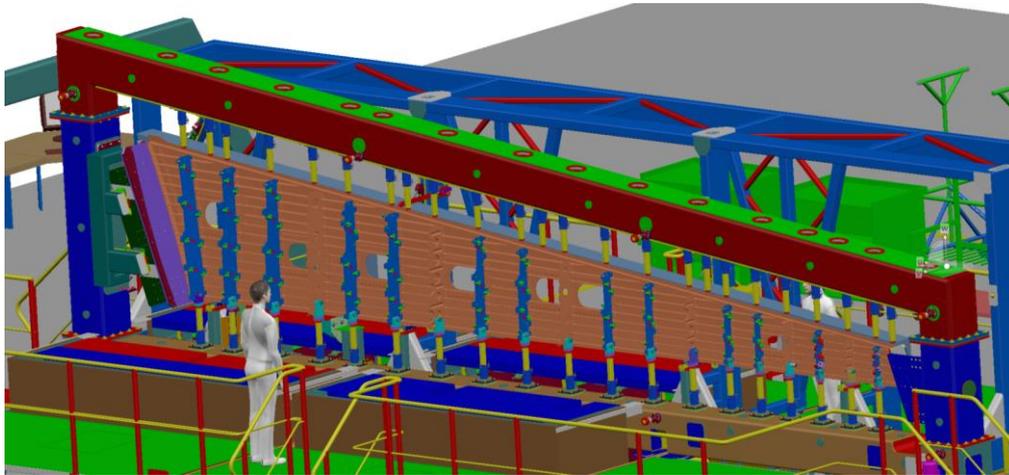


Figura 4-39. Posicionamiento de las barras de la celosía

- Estimación del tiempo:

Como se ha detallado antes, se tendrá varios tipos de operaciones en este sistema, por lo que se tendrán varias formas de estimar los tiempos de operación.

El tiempo de accionamiento de la plataforma elevadora se calculará de forma similar que las estructuras móviles de la Estación Vertical y utilizando la velocidad media definida en la Tabla 4-7. La distancia a la que se necesita subir esta plataforma será 50 centímetros, por lo que el tiempo de accionamiento será:

$$t_{up/down} = 0,50 \text{ m} \cdot 3\text{m}/\text{min} / 60 = 10 \text{ s}$$

De nuevo, como se ha procedido en el caso de la estructura móvil para el revestimiento superior (sección 4.3.4.4), se considera incluir un tiempo previo para que los operarios se aseguren que el accionamiento de la plataforma es seguro. Se considera fijar el parámetro $A = 32$ (entre 16-20 pasos necesarios), por lo que el tiempo estimado en el modelo *maxiMOST* es de 115,2 segundos, sumados al tiempo de accionamiento de la plataforma, hacen que esta operación dure un total de:

$$t_{plataforma} = t_{clean\ up} + t_{up/down} = 115,2 + 10 = 125,2 \text{ s}$$

La próxima operación a realizar será posicionar los útiles de soporte para las celosías. Como se puede ver en la Figura 4-39, los soportes de las primeras celosías son bastantes grandes en tamaño, incluso más que la primera de las costillas, mientras que los más próximos a la punta del ala son muy livianos. Para los de mayor tamaño, se considera que, aunque sean de gran volumen, no serán muy pesados y podrán ser portados por un operario sin que le suponga una dificultad o riesgo. Esto se aplicará a los útiles de la celosía 1st a la 7th. El resto de los útiles (del 8th al 13th), son de bastante menor tamaño, por lo que un solo operario podrá portar dos a la vez para posicionarlos en su lugar correcto.

Con lo detallado anteriormente, para calcular el tiempo se ha aplicado la misma lógica y parámetros en que para posicionar las costillas, siendo el resultado el mismo que el mostrado en la Figura 4-28, un total de 194,4 segundos por operación, que aplicado a un total de 10 operaciones (los útiles, 8th-9th, 10th -11th y 12th - 13th, se posicionarán en la misma operación), que serán realizadas por ambos operarios en paralelo (5 cada uno), da un total de 972 segundo para el montaje de los útiles.

$$t_{\text{posicionado útiles}} = t_{\text{transporte y posicionado por útil}} \cdot 10 / 2 = 194,4 \cdot 10 / 2 = 972 \text{ s}$$

Una vez se tienen los útiles posicionados, se necesita acercar las barras de las celosías para que puedan ser montadas en dichos útiles. La forma de hacerlo será similar a una operación de transporte de una de las costillas, por lo que el tiempo estimado será de nuevo 194,4 segundos (calculado en Figura 4-28). Para que esto sea posible, se va a suponer que las barras de celosía están dispuestas en la zona de abastecimiento de la Estación Vertical, dentro de un útil en forma de caja que aparte de almacenar las diferentes barras, las tiene clasificadas para cada celosía y agrupadas en las barras Outer e Inner, tal y como se puede ver en la Figura 4-40.

Dentro de dicha caja, existirá una placa de espuma con la contraforma específica para cada celosía y se tendrán dos cajas similares a la que se muestra en la Figura 4-40, una para las celosías de gran tamaño 1st a 4th, y otra para las celosías más pequeñas, desde la 5th hasta la 13th. En la en Figura 4-40 se ha representado la caja que incluye las celosías de mayor tamaño, siendo la primera contraforma la de la primera celosía, la cual se compone de 8 barras, 4 Outer y 4 Inner. Debajo de esta se encontrarán las contraformas para las celosías 2nd, 3rd y 4th.

La caja es de unas dimensiones suficientemente pequeñas para que un solo operario pueda transportarlas, siendo su longitud máxima menor a 1 metro, como se puede ver en dicha figura.

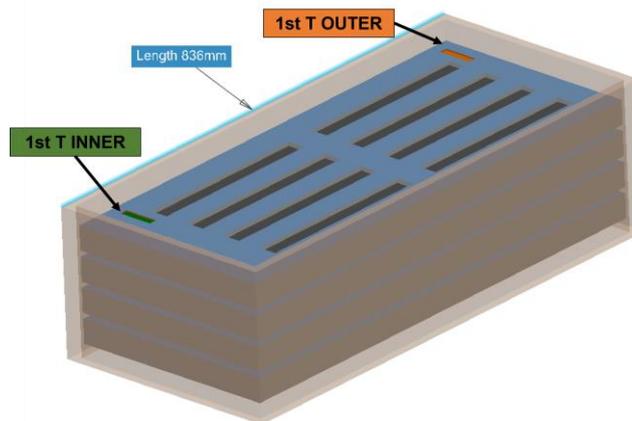


Figura 4-40. Útil para almacenaje de las barras de las celosías

Por último, tan solo falta colocar las barras Outer en su posición correcta en el útil. Esto se considerará una operación de posicionamiento y se puede estimar utilizando la herramienta de *Time Analysis* y fijando el parámetro P = 6, esto es: *Adjustment With Precission*. El tiempo resultante es de 21,6 segundos por barra, como se puede observar en la Figura 4-41.

	Description	Code	Frequency	Analyzed...ime(sec)	Value Added
1	Place tru... the tool	A0B0G0A0B0P6A0	1	21,6	YES

Figura 4-41. Tiempo de posicionamiento de una barra de la celosía

Partiendo del MBOM de las celosías de la sección 3.2.1 para saber el número de barras Outer que tiene cada una de ellas, se puede calcular el tiempo de montaje total, el cual se ha mostrado en la Tabla 4-20.

Tabla 4-20. Tiempos de montaje de las barras Outer de las celosías

Operación	nº barras Outer	$t_{montaje}$ por celosía
1st-3rd Truss	4	86,4 s
4th-7rd Truss	3	64,8 s
8th-13rd Truss	2	43,2 s

Finalmente, en la Figura 4-42 se muestra el diagrama de Gantt resultante, siendo el tiempo total de este sistema 27,62 minutos. En la misma imagen se ha incluido la vista del *Process Planning* con las celdas de este sistema.

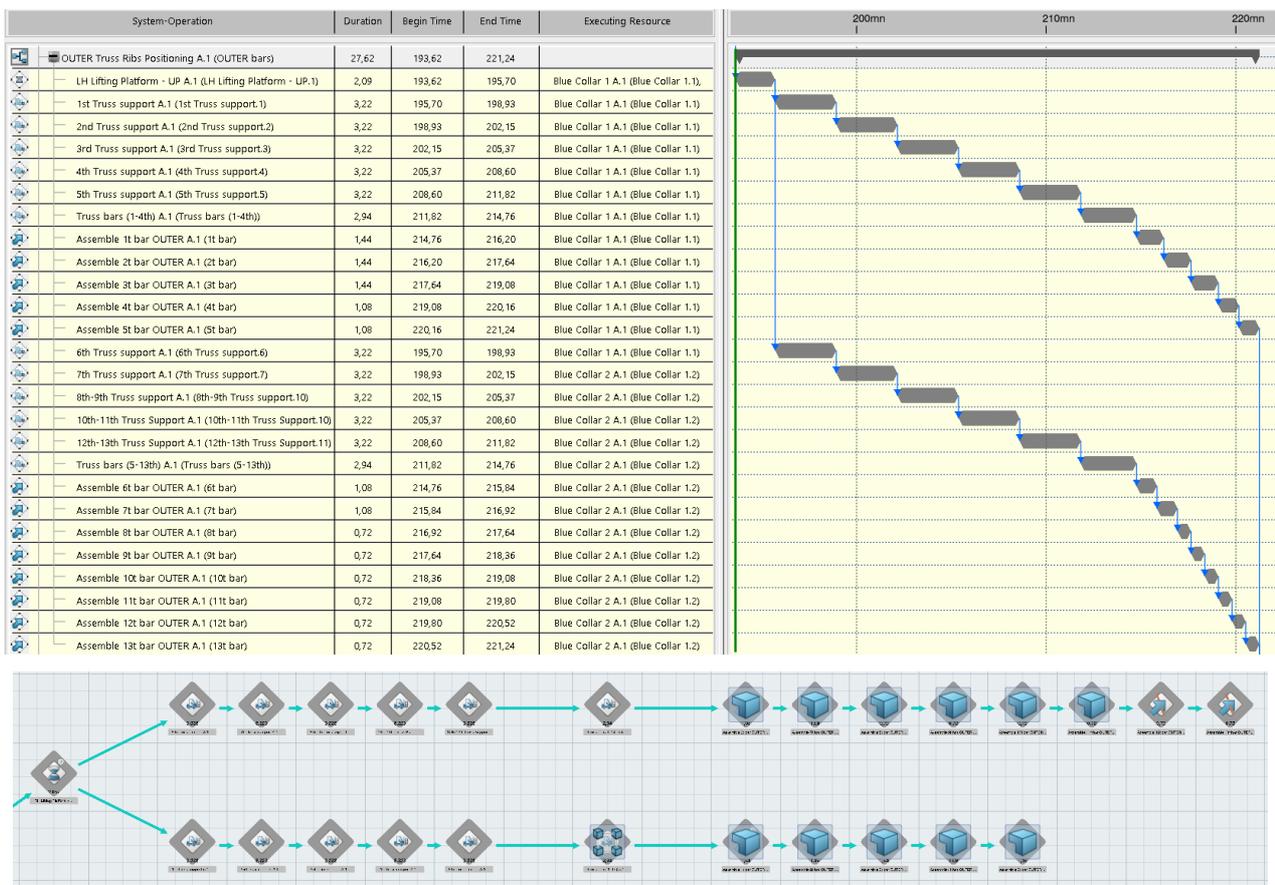


Figura 4-42. Diagrama de Gantt del posicionamiento de las barras Outer

4.3.4.6 Taladrado del revestimiento superior a las costillas y las barras Outer de la celosía

A continuación, partiendo de la situación de la Figura 4-39 y con las barras de celosía Outer posicionadas correctamente con respecto a los nervios de los paneles del revestimiento superior, se procede a realizar el taladrado de este revestimiento, las costillas y dichas barras Outer.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

La forma de proceder será que ambos operarios trabajarán a la vez con una taladradora manual cada uno. El primero taladrará las costillas y celosías más próximas al encastre y el otro a las de punta de ala.

Por tanto, los recursos necesarios serán los detallados en la Tabla 4-21.

Tabla 4–21. Recursos para el taladrado del revestimiento superior a costillas y barras Outer

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Taladradora manual 1 
	Blue Colar 2 	Taladradora manual 2 

Se recuerda que en este punto del proceso se tiene la estructura móvil derecha, el marco universal, la plataforma elevadora y los soportes de las barras posicionados en la forma correcta, por lo tanto, aunque sea recursos en uso, no se requiere su activación o modificación. Es por esto por lo que no se incluyen en la Tabla 4–21.

- Estimación del tiempo:

Los tiempos de taladrado dependerán de la cantidad de taladros que se tenga que realizar, que junto al tiempo medio por taladro indicado en la sección 4.3.3.4, que era de 20 s por taladro, permite calcular el tiempo de cada operación. El total de taladros por cada una de las partes se puede ver en la Tabla 4–22.

Tabla 4–22. Cantidad de taladros y tiempos del revestimiento superior con costillas y celosías

Operación	nº taladros	$t_{taladrado}$
1r Rib	42	840 s
2r Rib	32	640 s
3r Rib	28	560 s
4r Rib	16	320 s
5r Rib	16	320 s
6r Rib	15	300 s
Wingtip Rib	15	300 s
1st-3rd Truss	4 (x3)	80 s (x3)
4th-7rd Truss	3 (x4)	60 s (x4)
8th-13rd Truss	2 (x5)	40 s (x5)

Por último, es necesario tener en cuenta que antes de comenzar las operaciones de taladrado, los operarios deberán ir a la zona de abastecimiento que está situada entre las estaciones y preparar las taladradoras y demás útiles de soporte para posteriormente acercarlas a la zona de trabajo, junto al marco central. Este tiempo se ha calculado ajustando el parámetro $A=24$ (ida y vuelta) y $G=1$ en el *Time Analysis*, por lo que la configuración correspondiente es “A24B0G1A24B0P0A0” y el resultado arrojado es 176,4 s.

La lista completa de operaciones y sus tiempos se muestran en el diagrama de Gantt de la Figura 4-43, donde se ha vuelto a secuenciar en paralelo la mayoría de las operaciones para ambos operarios, por lo que el tiempo total de este sistema es de 36,94 minutos.

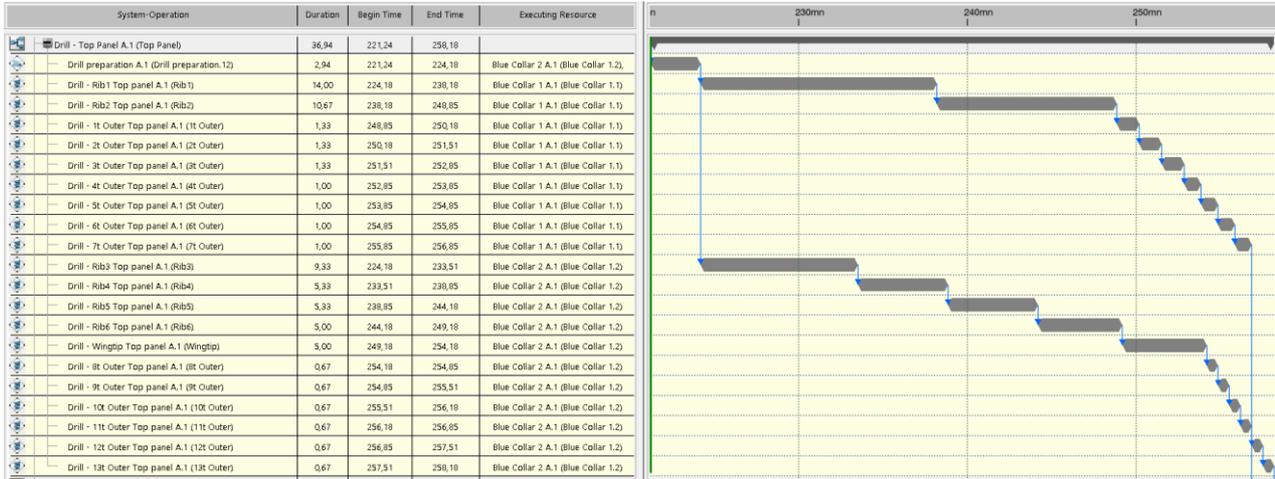


Figura 4-43. Diagrama de Gantt del taladrado del revestimiento superior a las costillas y barras Outer

4.3.4.7 Cambio de las barras Outer por las Inner de la celosía

En el sistema anterior, 4.3.4.6, se han taladrado las barras Outer de la celosía, pero para poder taladrar las Inner, se requiere el desmontaje de las anteriores, ajustar el útil de soporte y montar las Inner. Es por esto por lo que es necesario definir este sistema.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Las operaciones a realizar tan solo serán la del desmontaje de todas las barras Outer, ajuste del útil y montar las barras Inner, para posteriormente taladrarlas al revestimiento superior.

No se requiere de ninguna herramienta adicional de las que ya se tienen, puesto que se llevará a cabo por los operarios de forma manual. Por tanto, los recursos necesarios son los que aparecen en la Tabla 4-23.

Tabla 4-23. Recursos para el cambio de las barras Outer por Inner

Estación Vertical	Blue Colar 1	Soporte de las celosías
	Blue Colar 2	

- Estimación del tiempo:

No se requerirá ninguna operación extra debido a que todo lo necesario estará ya situado en las inmediaciones del marco central. Esto es en parte gracias al útil donde se almacenan las celosías antes de su posicionamiento, definido en la Figura 4-40. Las barras Outer estarán en los soportes del marco central, mientras que las barras Inner estarán almacenadas en dicho útil, por lo que tan solo se tendrá que intercambiar sus posiciones.

El tiempo de posicionado de las celosías, ya se ha estimado en la Figura 4-39, el cual es 21,6 segundos por barra, pero es necesario estimar también el tiempo que se tarda en desmontar las barras y reajustar el útil. Se procederá con la herramienta *Time Analysis* para su estimación.

En el caso del desmontaje de las barras, se estima conveniente hacerlo fijando el parámetro P=3, *Place with adjustment*, lo que ofrece un resultado de 10,8 segundos, la mitad del tiempo usado para su montaje.

	Description	Code	Frequency	Analyzed...ime(sec)	Value Added
1	Disassemble bar	A0B0G0A0B0P3A0	1	10,8	NO

Figura 4-44. Tiempo de desmontaje de una barra de la celosía

En el caso de la operación desmontaje y montaje de nuevo del útil de las celosías, se procederá con una lógica similar a la que se definió para su primer montaje, donde se fijó el parámetro P=3, como se explica en la sección 4.3.4.5. Como se trata de un desmontaje, volteo y montaje ajustándolo al nervio del revestimiento superior y a los posicionadores de la Estación Vertical, se han incluido dos líneas en la Figura 4-45, por lo que el tiempo total es de 21,6 segundos.

	Description	Code	Frequency	Analyzed...ime(sec)	Value Added
1	Disassemble	A0B0G0A0B0P3A0	1	10,8	NO
2	Assemble	A0B0G0A0B0P3A0	1	10,8	YES

Figura 4-45. Tiempo de cambio de posición del útil de soporte de las celosías

El total de barras Outer e Inner de las celosías se detalla en la Tabla 4-24, junto con el tiempo necesario para su montaje y desmontaje.

Tabla 4-24. Tiempos de montaje de las barras Inner de las celosías y desmontaje de las Outer

Operación	nº barras Outer	$t_{desmontaje}$ por celosía	nº barras Inner	$t_{montaje}$ por celosía
1st-3rd Truss	4	43,2 s	4	86,4 s
4th-5rd Truss	3	32,4 s	4	86,4 s
6th-7rd Truss	3	32,4 s	3	64,8 s
8th-11rd Truss	2	21,6 s	2	43,2 s
12th Truss	2	21,6 s	3	64,8 s
13rd Truss	2	21,6 s	2	43,2 s

Finalmente, en la Figura 4-46 se muestra el diagrama de Gantt resultante de este proceso. Este diagrama es diferente respecto al resto ya que no tiene forma de cascada, sino que tiene una dirección ascendente.

Esto se debe a que se ha definido el orden de las operaciones del cambio de las barras Outer de forma inversa a como se ha hecho en el taladrado de estas, el cual se puede ver en la Figura 4-43. La razón por la que se ha hecho esto es que comienza a desmontar y cambiar las barras Outer por las Inner justo en la celosía en la que se finalizó el taladrado, en el proceso anterior. Esto evita que el operario tenga que desplazarse de forma innecesaria, pudiendo comenzar con este sistema en la misma posición en la que finalizó el anterior. Además, en el diagrama se ha respetado el orden numerado de las barras, lo que ha generado la forma de este diagrama.

El tiempo total de operación de este sistema es de 16,20 minutos.

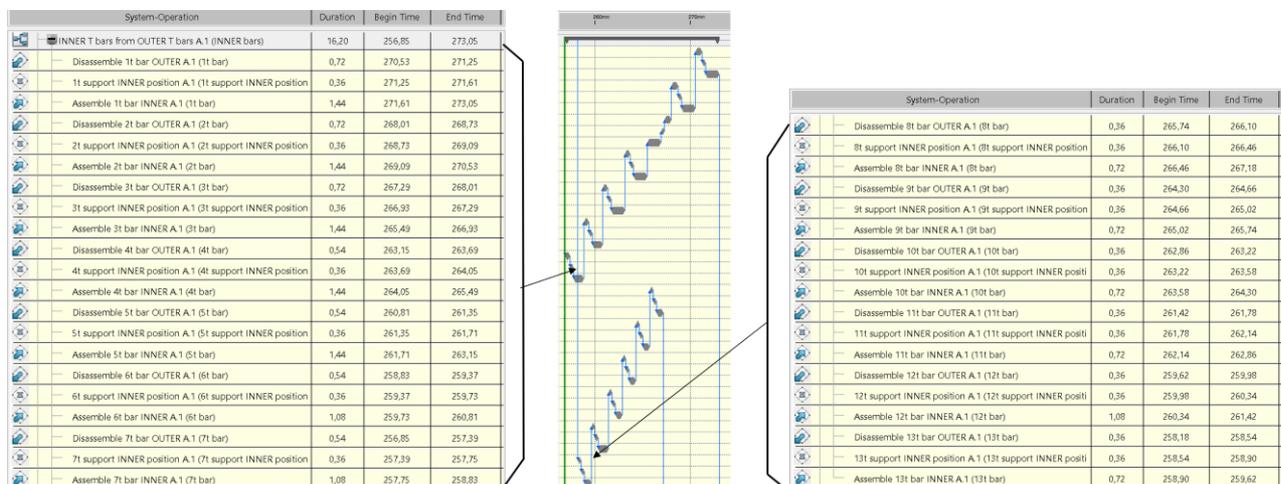


Figura 4-46. Diagrama de Gantt del cambio de las barras Outer por Inner

4.3.4.8 Taladrado del revestimiento superior a las barras Inner de la celosía

Una vez se tienen posicionadas las barras Inner en los útiles de soporte, se realiza el taladrado de estas al revestimiento superior.

Los recursos necesarios y los tiempos de las operaciones serán similares a los ya detallados en el taladrado de las barras Outer, en la sección 4.3.4.6.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

De nuevo, ambos operarios trabajarán de forma paralela en la misma área que en las pasadas operaciones y con las mismas herramientas, por lo que los recursos necesarios de este sistema son lo detallados en la Tabla 4–25

Tabla 4–25. Recursos para el taladrado del revestimiento superior a las barras Inner

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Taladradora manual 1 
	Blue Colar 2 	Taladradora manual 2 

- Estimación del tiempo:

Los tiempos de taladrado de cada celosía dependerán de la cantidad de barras Inner que tenga cada una de ellas. El tiempo medio de taladrado por cada taladro será el detallado en la sección 4.3.3.4, que es 20 s por taladro. El tiempo total por cada celosía se muestra en la Tabla 4–26.

Tabla 4–26. Tiempos de taladrado de las barras Inner

Operación	nº barras Inner	$t_{taladrado}$ por celosía
1st-3rd Truss	4	80 s
4th-5rd Truss	4	80 s
6th-7rd Truss	3	60 s
8th-11rd Truss	2	40 s
12th Truss	3	60 s
13rd Truss	2	40 s

En este caso no es necesaria ninguna operación extra para el abastecimiento de herramientas puesto que los operarios ya disponen de todo lo necesario en las cercanías del marco central de lo utilizado en los sistemas anteriores.

El resultado de la lista completa de operaciones y sus tiempos se muestran en el diagrama de Gantt de la Figura 4-47. El tiempo total de este sistema es de 14,53 minutos, pero en dicho diagrama se puede observar que el operario que trabaja en las barras de celosías 1st-7th, terminaría 10,2 minutos más tarde que el que trabaja en el área de las celosías 8th-13th.

La definición de ambas áreas, parte del sistema de la Figura 4-43, donde el operario que trabaja en la punta de ala necesitaba más tiempo para realizar las operaciones que el otro. Se ha considerado mantener esta distribución a pesar del gap temporal, para evitar añadir complejidad extra a la coordinación de ambos operarios.

Este gap temporal se corrige en la última operación, donde las dos operaciones finales de los operarios convergen en la misma línea temporal, como se puede ver en la Figura 4-47. En esta, ambos operarios deberán acondicionar el área para retirar el revestimiento superior ya taladrado y acercar el otro.

Dicho tiempo de acondicionamiento del área también se ha incluido en este sistema, donde se han incluido las siguientes operaciones:

- Una operación para mover los recursos del marco central al área de abastecimiento con una duración de 176,4 s, que se corresponde con lo estimado para la operación de traer dichos recursos, detallada en la sección 4.3.4.6.

- Una operación para bajar la plataforma elevadora a su nivel 0. Que requerirá el mismo tiempo que para accionar su mecanismo elevador, siendo de 125,2 segundos según lo descrito en la sección 4.3.4.5.



Figura 4-47. Diagrama de Gantt del taladrado del revestimiento superior a las barras Outer

4.3.4.9 Alejamiento del revestimiento superior y acercamiento del inferior al marco central

Una vez se ha terminado de taladrar las costillas y celosías al revestimiento superior, se deberá hacer lo mismo para el revestimiento inferior, pero antes, se debe retirar el otro revestimiento y aproximar este. Se considera conveniente detallar ambas operaciones en el mismo apartado debido a su similitud.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Procediendo de forma similar a lo que se detalló en la sección 4.3.4.4 para el acercamiento del revestimiento superior, las operaciones de este sistema consisten en que uno de los operarios accione el mecanismo de las estructuras móviles, mientras el otro operario controla los movimientos desde una posición paralela para evitar que haya una obstrucción o impacto indeseado del panel.

Los recursos para llevar a cabo esta operación se han resumido en la Tabla 4-27.

Tabla 4-27. Recursos para el alejamiento del revestimiento superior y acercamiento del inferior

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Estructura móvil derecha 
	Blue Colar 2 	Estructura móvil izquierda 

El resultado tras esta operación será el revestimiento inferior situado próximo al marco central y el revestimiento superior en su posición más alejada del marco. Se ha representado en la Figura 4-48.

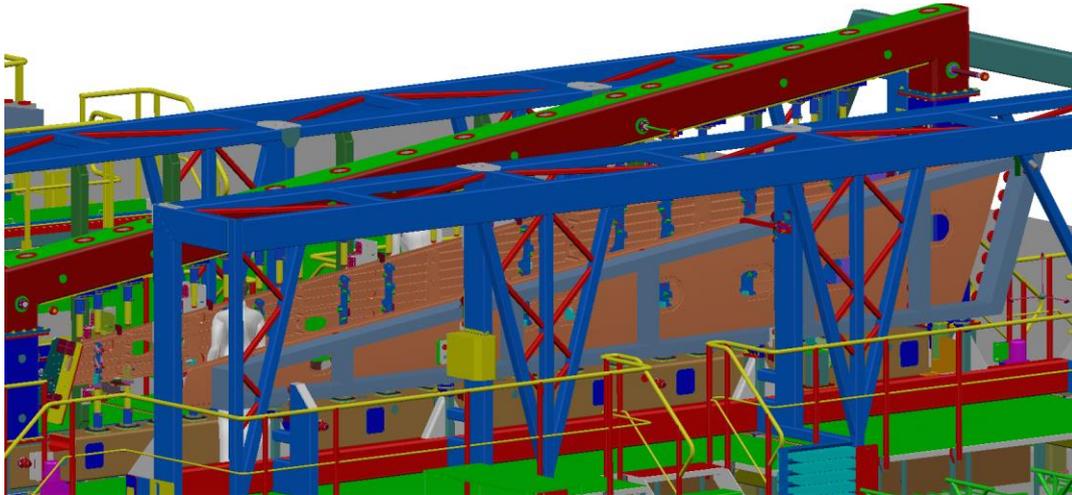


Figura 4-48. Situación después del acercamiento del revestimiento inferior

- Estimación del tiempo:

No se requiere volver a estimar los tiempos de accionamiento de las estructuras móviles debido a que se supondrá que es el mismo utilizado en la operación de acercamiento, el cual se ha detallado en la sección 4.3.4.4 y es de 182,2 segundos por cada una de las estructuras.

No se considera añadir tiempo extra de acondicionamiento o preparación puesto que ya está incluido en el valor que se ha estimado.

System-Operation	Duration	Begin Time	End Time	Executing Resource	Used Resource(s)	290mn
Phase 1 A.1 (Phase 1)	552,60	0,00	552,60			
Ribs positioning A.1 (Ribs)	16,20	0,00	16,20			
Top Panel joining to RH Structure A.1 (General System00001)	23,43	16,20	39,63			
Bottom Panel joining to LH Structure A.1 (Bottom Panel)	150,95	39,63	190,58			
Top Panel --> Central F - VS A.1 (Top Panel --> Central F - V)	3,04	190,58	193,62	Blue Collar 2 A.1 (Blue Collar 1.2),	RH support struct	
OUTER Truss Ribs Positioning A.1 (OUTER bars)	27,62	193,62	221,24			
Drill - Top Panel A.1 (Top Panel)	36,94	221,24	258,18			
INNER T bars from OUTER T bars A.1 (INNER bars)	16,20	256,85	273,05			
Drill - Top Panel to Inner T bars A.1 (Drill - Top Panel to Inner)	19,56	267,18	286,74			
Top Panel UNLOAD Central F - VS A.1 (Top Panel UNLOAD)	3,04	286,74	289,78	Blue Collar 2 A.1 (Blue Collar 1.2),	RH support struct	
Bot Panel --> Central F - VS A.1 (Bot Panel --> Central F - V)	3,04	289,78	292,81	Blue Collar 2 A.1 (Blue Collar 1.2),	LH support struct	

Figura 4-49. Diagrama de Gantt del después del acercamiento del revestimiento inferior

4.3.4.10 Taladrado del revestimiento inferior a las costillas y la celosía (Inner y Outer)

Partiendo de la situación de la Figura 4-48 y sabiendo el útil para las barras de celosía está correctamente posicionado y con las barras Inner, como se finalizó en el apartado 4.3.4.8, en esta sección se va a detallar el sistema de operaciones para el taladrado completo del revestimiento inferior, es decir, a las costillas, a las barras Inner y a las barras Outer.

Entre el taladrado de los dos tipos de barras se requerirá que se realice el desmontaje de las barras Inner, el cambio de posición del útil de la celosía y el posicionamiento de las barras Outer. Esto será un proceso similar al detallado en la sección 4.3.4.7.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

La forma de realizar esta operación será similar a la seguida en los anteriores sistemas donde ambos operarios trabajarán de forma secuencial realizando las operaciones de taladrado en su área asignada.

Antes de empezar el proceso se deberá subir la plataforma elevadora derecha para poder acceder a las barras de las celosías situadas a mayor altura.

Al terminar las operaciones, se deberá bajar la plataforma elevadora, desmontar el útil de soporte de las celosías y acondicionar la zona para que se puedan realizar las próximas operaciones de forma segura.

Por tanto, los recursos necesarios serán los detallados en la Tabla 4–28.

Tabla 4–28. Recursos para el taladrado del revestimiento inferior

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Taladradora manual 1 	Soporte de las celosías 
	Blue Colar 2 	Taladradora manual 2 	Plataforma elevadora derecha 

- Estimación del tiempo:

En cuanto a los tiempos de las operaciones, se seguirán las mismas estimaciones que se ha realizado anteriormente debido a la similitud que existe entre el taladrado de este revestimiento y el superior.

El tiempo de elevación de la plataforma derecha será 125,2 segundos, según lo calculado en 4.3.4.5, puesto que la distancia a la que se elevará volverá a ser 50 centímetros.

Una vez hecho esto y antes de comenzar con el taladrado de costillas y celosías, se debe aproximar las herramientas del taladrado, siendo el tiempo el mismo que se tomó en la sección 4.3.4.6, 176,4 segundos. Aparte de las herramientas, en la misma operación se necesitará realizar el aprovisionamiento de los remaches que unirán el revestimiento inferior con las celosías, para así posicionarlas según lo mostrado en la Figura 4-50, obteniéndolos del rack próximo a dichas herramientas.

El total de taladros a realizar será el que se detalla en la Tabla 4–29, donde el número de taladros serán similares en cantidad a los del revestimiento superior. El tiempo por cada taladro será el detallado en el apartado 4.3.3.4 de las hipótesis, esto es, 20 segundos por taladro.

Tabla 4–29. Número de taladros del revestimiento inferior a costillas y celosías

Costillas	nº taladros	Celosía	nº barras Inner	nº barras Outer
1r Rib	30	1st-3rd Truss	4	4
2r Rib	26	4th-5rd Truss	4	3
3r Rib	20	6th-7rd Truss	3	3
4r Rib	15	8th-11rd Truss	2	2
5r Rib	17	12th Truss	3	2
6r Rib	16	13rd Truss	2	2
Wingtip Rib	16			

Es necesario tener en cuenta que entre el taladrado de las barras de celosías Inner y las Outer, se requiere realizar el cambio de las barras, así como el reajuste del útil de soporte. El tiempo necesario para esto será el mismo que el estimado en la sección 4.3.4.7, el cual se ha resumido en la Tabla 4–30, donde el tiempo de montaje y desmontaje habrá que multiplicarlo por el número de barras de cada tipo que tenga cada celosía.

Tabla 4–30. Tiempo de intercambio de las barras de celosía y el útil

$t_{desmontaje}$	$t_{cambio\ del\ útil}$	$t_{montaje}$
$10,8\ s \cdot n^{\circ}\ barra$	21,6 s	$21,6\ s \cdot n^{\circ}\ barra$

Una vez se haya realizado el taladrado completo de todas las barras, se dará por finalizado el taladrado del revestimiento superior. La próxima acción será su remachado, sin embargo, antes de proceder a ello, es necesario retirar el útil de soporte de las barras puesto que ya no es necesario. El tiempo requerido para su retirada se considera el mismo que el de su posicionamiento, el cual se definió en el apartado 4.3.4.5 y sumaba un total de 972 segundos con los dos operarios trabajando en paralelo.

Antes de retirar el útil por completo de cada posición de la celosía, por motivos de eficiencia, los operarios deberán dejar las barras Outer unidas de forma provisional al revestimiento inferior utilizando

la caña del remache. Estos remaches han sido aprovisionados a la vez que las herramientas para el taladrado, como se ha detallado al inicio de esta sección.

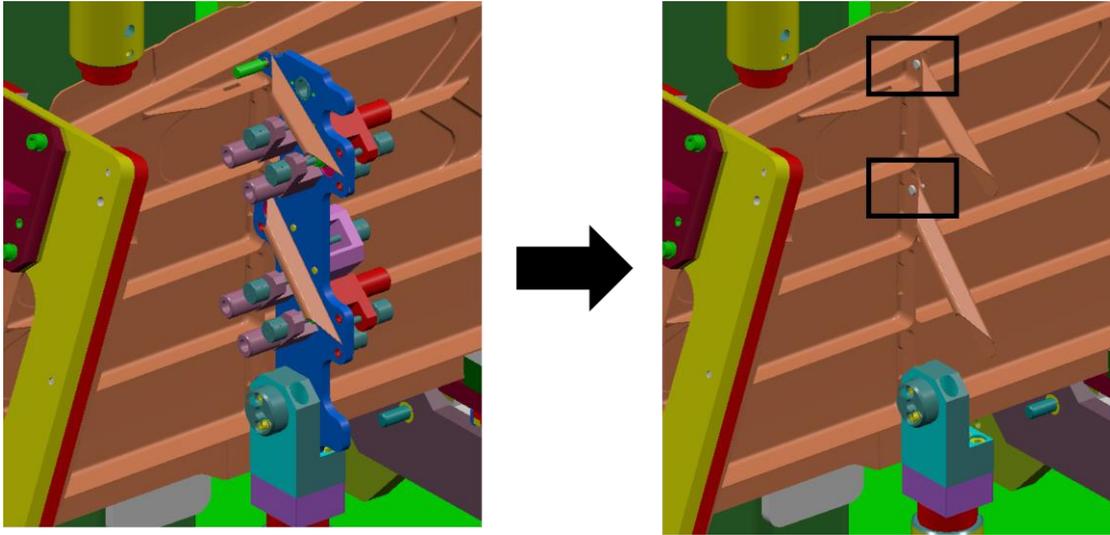


Figura 4-50. Imagen de la retirada del útil de las celosías

Llegados a este punto, ya es posible generar la lista de operaciones con sus tiempos correspondiente, así como su secuencia. La forma de hacerlo será agrupar los diferentes tipos de operaciones en varios sistemas que comprenderán todas las acciones de remachado de este revestimiento. A continuación se irán mostrando los diagramas de Gantt de cada sistema y su estructura de baldosas en el *Process Planning*.

En la Figura 4-51 se puede ver el primero de los sistemas, el cual comprende las operaciones de taladrado de las costillas y las barras de celosías Inner. El primer operario comenzará las operaciones por la celosía más próxima al encastre, esto es, la primera de las celosías e irá avanzando a lo largo del ala taladrando las celosías y costillas que se encuentran desde esta hasta la celosía 6th. El otro operario trabajará en paralelo para taladrar desde la celosía 7th hasta la 13th, pasando por las costillas que se encuentran situadas entremedias.

El tiempo total será 38,36 minutos.

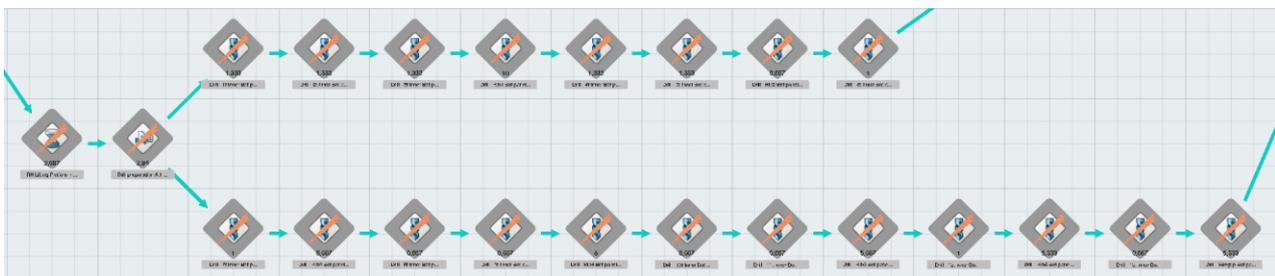


Figura 4-51. Diagrama de Gantt del taladrado del revestimiento inferior a las costillas y barras Inner

Una vez se ha realizado esto, el operario realizará el cambio de las barras Inner por las Outer en la misma secuencia que ha realizado el taladrado, por lo que el primer operario comenzará en la celosía 6th y terminará en la 1st, mientras que el otro operario lo hará de la 13th a la 7th. Esto tendrá una duración total de 17,98 minutos.

Se ha mantenido el orden numeral de las celosías para el diagrama de Gantt, es por esto por lo que se tiene el sentido ascendente en la secuencia de operaciones mostrada en la Figura 4-52.

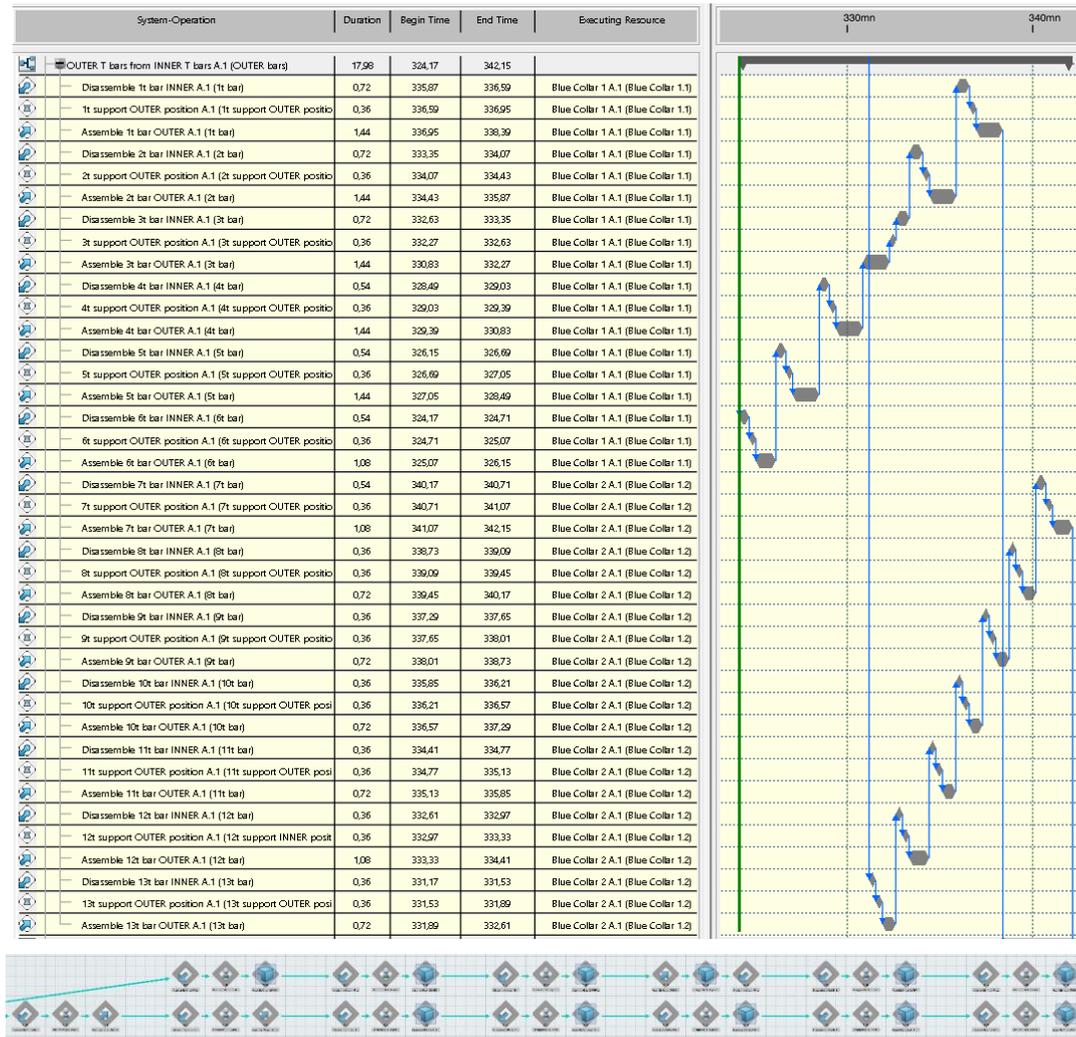


Figura 4-52. Diagrama de Gantt del cambio de las barras para taladrado del revestimiento inferior

Se finalizará las operaciones de taladrado con las barras Outer sobre las mismas celosías que cada operario ha estado trabajando con anterioridad, como se puede ver en el diagrama de la Figura 4-53, lo cual tomará un tiempo de 8,76 minutos.

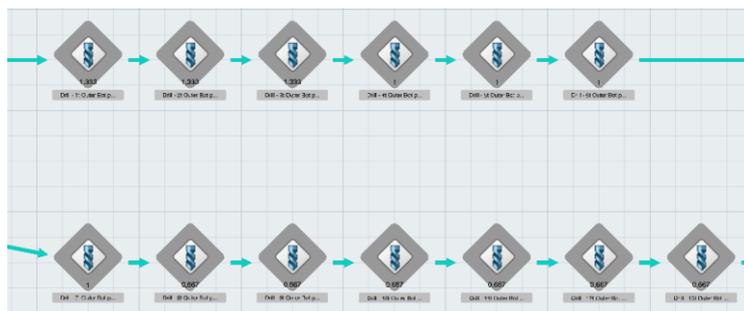


Figura 4-53. Diagrama de Gantt del taladrado de las celosías Outer al revestimiento inferior

Por último, se requiere el desmontaje de los útiles de soporte de las celosías, dejando las barras Outer unidas de forma provisional a los nervios del revestimiento inferior, tal y como se ha detallado en la Figura 4-50. El tiempo total será de 19,34 minutos, según la Figura 4-54.

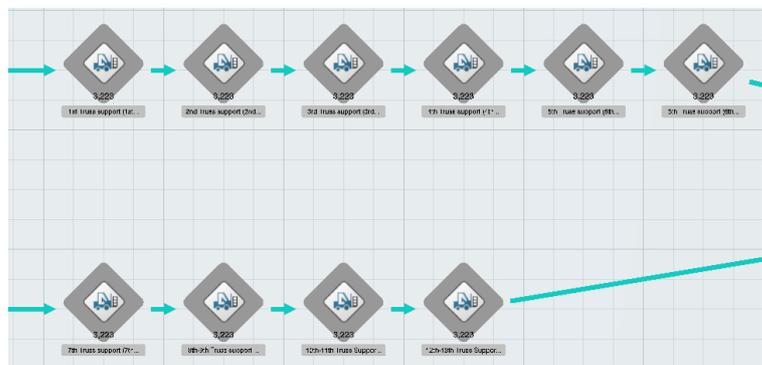
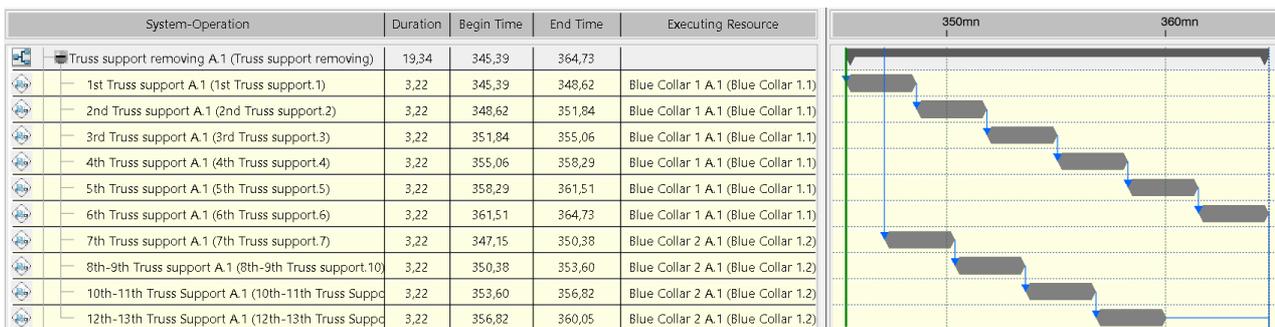


Figura 4-54. Diagrama de Gantt del desmontaje del útil de soporte de las celosías

4.3.4.11 Remachado del revestimiento inferior a las costillas

Una vez que las partes del revestimiento inferior, así como las barras de celosía y las costillas, están completamente taladradas, se procede a realizar las operaciones de remachado de las costillas con el revestimiento inferior.

Las barras de celosía no se podrán remachar de forma aislada a este revestimiento ya que se requiere que estas queden en la posición específica a la que se han taladrado con anterioridad al revestimiento superior. Por esta razón, se necesita que cada barra esté correctamente posicionada en ambos revestimientos a la vez antes de proceder a su remachado. En esta sección solamente se posicionarán las barras Inner en la misma situación que las Outer, descrita en la Figura 4-50.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

De nuevo, se recurrirá a dividir la zona de trabajo en dos para que ambos operarios puedan realizar el taladrado de forma secuencial sobre las costillas.

Como antecedentes al remachado en sí, los operarios deberán disponer de los remaches y de las remachadoras manuales en las proximidades del marco central, por lo que se incluirá una operación de transferencia para incluir esta tarea en el proceso.

La plataforma elevadora derecha seguirá estando elevada para posibilitar el alcance a las celosías de mayor tamaño, por lo que no se requerirá su accionamiento.

Los recursos asignados para esta operación son los incluidos en la Tabla 4-31.

Tabla 4-31. Recursos para el taladrado del revestimiento inferior

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Remachadora manual 1 
	Blue Colar 2 	Remachadora manual 2 

- Estimación del tiempo:

Para describir este sistema de operaciones, se debe disponer de varios tipos de tiempos ya definidos anteriormente: tiempo de aprovisionamiento para las herramientas y remaches, tiempo de remachado y el tiempo necesario para instalar las barras Inner de nuevo, las cuales se desmontaron en el sistema anterior, 4.3.4.10, y se encuentran almacenadas en su útil descrito en la Figura 4-40.

El tiempo de aprovisionamiento será de nuevo el mismo que se ha estimado para ocasiones anteriores como la 4.3.4.6, es decir, 176,4 segundos.

El tiempo de remachado será el definido el apartado de las hipótesis y aparece en la Tabla 4-8, esto es, 10 segundos por remache. La cantidad de remaches a realizar será el mismo que el número de taladros realizados en este revestimiento y en las costillas, los cuales se han resumido en la segunda columna de la Tabla 4-29.

Por último, como se ha descrito antes, las barras de celosía Outer están unidas al revestimiento inferior mediante la caña del remache, como se detalla en la Figura 4-50, pero se requiere que las barras Inner se posicionen de forma similar para su posterior remachado a ambos revestimientos a la vez. Esto se incluye en este sistema y se realizará una vez se finalice el taladrado de las costillas.

Se ha estimado que tomará un tiempo de 10,8 segundos por barra, considerando el parámetro $P=3$, *Place with Adjustment*, el cual se utilizó para la operación de desmontaje de las barras en la Figura 4-44, lo que se considera de una dificultad similar al solo tener que ajustar cada barra con el taladro y remache correspondiente.

El diagrama de Gantt resultante es el mostrado en la Figura 4-55. Como se puede ver, el primer operario tan solo tiene asignadas las costillas 1 y 2, para luego continuar con el montaje de las barras de celosía desde la 7th a la 1st, en orden decreciente. La razón de esta definición es, de nuevo, la de dividir el trabajo a realizar en dos zonas donde cada operario pueda trabajar de forma autónoma y sin interferir con el otro. Por esta vez, el punto de corte de ambas zonas ha sido la celosía 7th, la cual tiene a continuación la costilla 3, según como se puede ver en la Figura 3-8.

El tiempo total de este sistema es de 19,30 minutos.

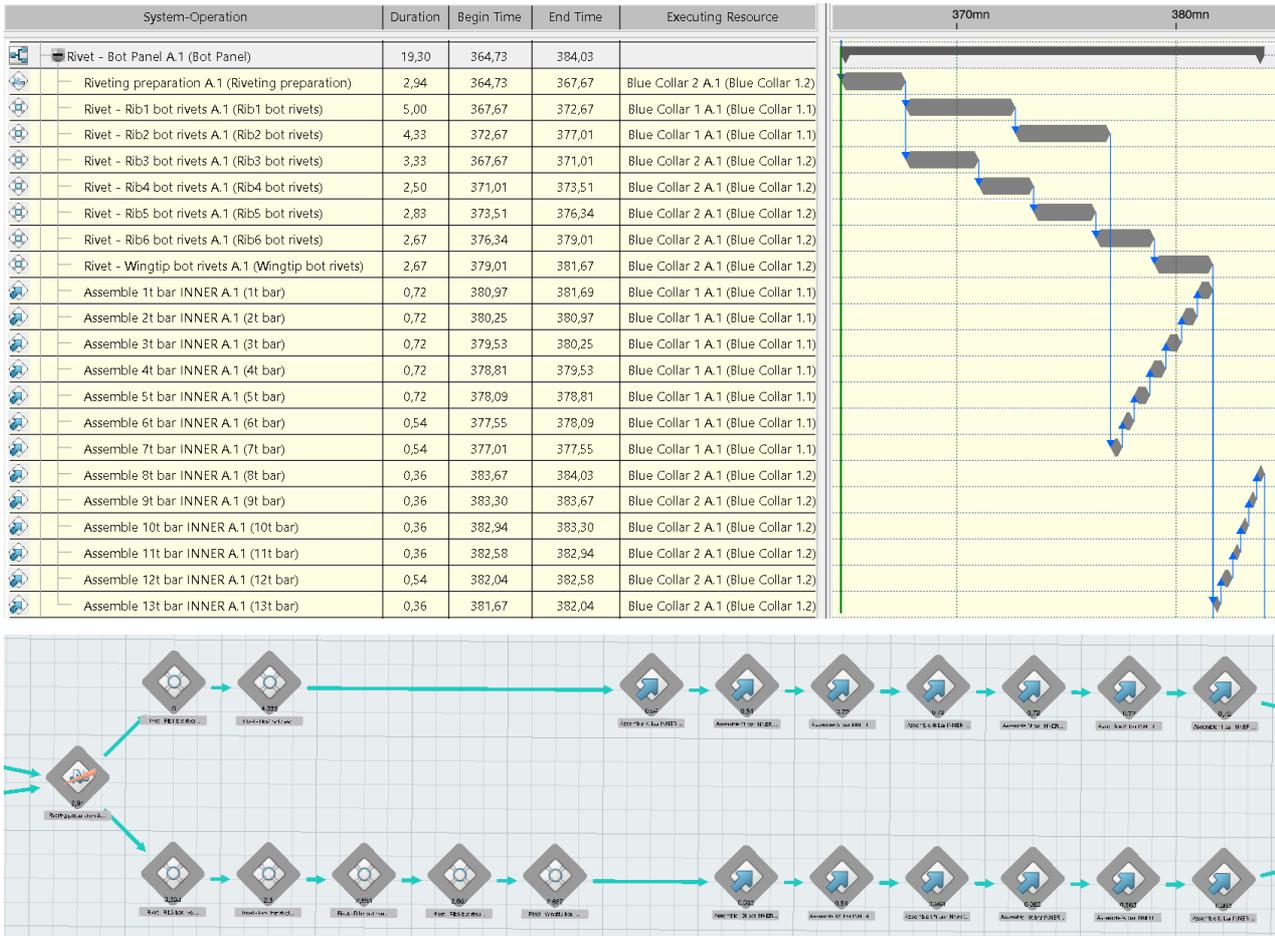


Figura 4-55. Diagrama de Gantt del remachado del revestimiento inferior a las costillas

4.3.4.12 Taladrado y remachado del ángulo superior de las costillas

El siguiente de los sistemas será realizar el taladrado y remachado del ángulo que se acopla en la parte superior de la mayoría de las costillas y sobre el que descansará el larguero frontal.

Dicho ángulo se muestra en la Figura 4-56 para el caso de la segunda costilla. Se considera remarcar que será necesario desacoplar la costilla del posicionador superior de la Estación Vertical antes del taladrado del ángulo. Esto provocará que el conjunto de costillas, celosías y revestimiento inferior esté soportado por los posicionadores inferiores del marco central acoplados a las costillas, la estructura móvil izquierda y por el útil que ajusta la costilla de punta de ala.

Una vez se realicen estas operaciones, se deberá accionar la plataforma elevadora derecha para situarla en su nivel 0, la cual permanece elevada al inicio de este sistema.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Con respecto a los recursos, de nuevo se tendrá que ambos operarios trabajan de forma secuencial, realizando el taladrado y remachado del ángulo costilla a costilla, por lo que necesitarán disponer cada uno de una taladradora y remachadora manual. El total de recursos utilizados son los que se han incluido en la Tabla 4-32.

Tabla 4-32. Recursos para el taladrado del ángulo de las costillas

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Remachadora manual 1 	Plataforma elevadora 
	Blue Colar 2 	Remachadora manual 2 	

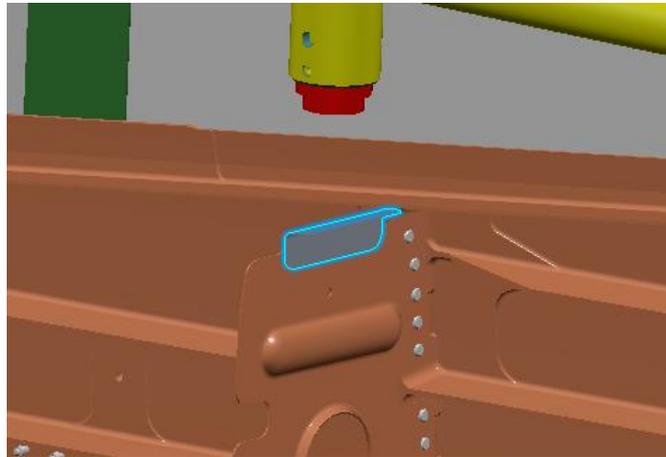


Figura 4-56. Detalle del ángulo de las costillas

- Estimación del tiempo:

El tiempo del desmontaje del posicionador superior se considerará el mismo que el desmontaje del útil de las celosías definido en la Figura 4-45, 10,8 segundos. Mientras que el tiempo para posicionar correctamente cada uno de los ángulos será el mismo que el tiempo de posicionamiento de una barra de celosía, es decir 21,6 segundos, según la Figura 4-41.

El tiempo de remachado y taladrado dependerá de cada costilla y se ha definido en la Tabla 4-33, aplicando la hipótesis de que se tarda 20 segundos por taladro y 10 segundos por remache, según lo definido en la Tabla 4-8. Como se puede observar, la costilla 5 no dispone de este ángulo, por lo que no será necesario incluirlo en el sistema de operaciones.

Tabla 4-33. Número de taladros de los ángulos de las costillas

Ángulo de las costillas	nº taladros	$t_{taladrado}$	$t_{remachado}$
1r Rib angle	5	100 s	50 s
2r Rib angle	5	100 s	50 s
3r Rib angle	4	80 s	40 s
4r Rib angle	3	60 s	30 s
6r Rib angle	6	120 s	60 s
Wingtip Rib angle	6	120 s	60 s

Aparte de estas operaciones, se incluirá la operación de aprovisionamiento de los ángulos de las costillas, lo que serán piezas livianas y que cada operario podrá transportar sus asignadas a la vez, por lo que dicho tiempo se calcula ajustando el parámetro $A=24$ (ida y vuelta) y $G=1$ en el *Time Analysis*, siendo la codificación resultante “A24B0G1A24B0P0A0” y el tiempo de 176,4 segundos.

Además, después de la finalización de estas operaciones, se procederá a bajar la plataforma elevadora y a colocar las herramientas en su zona de abastecimiento correspondiente, por lo que se han añadido estas dos operaciones al final del proceso con los mismos tiempos de duración que en secciones anteriores como la 4.3.4.10.

El diagrama de Gantt con el total de operaciones y el proceso está definido en la Figura 4-57, donde se puede

comprobar que el tiempo total es de 11,52 minutos.

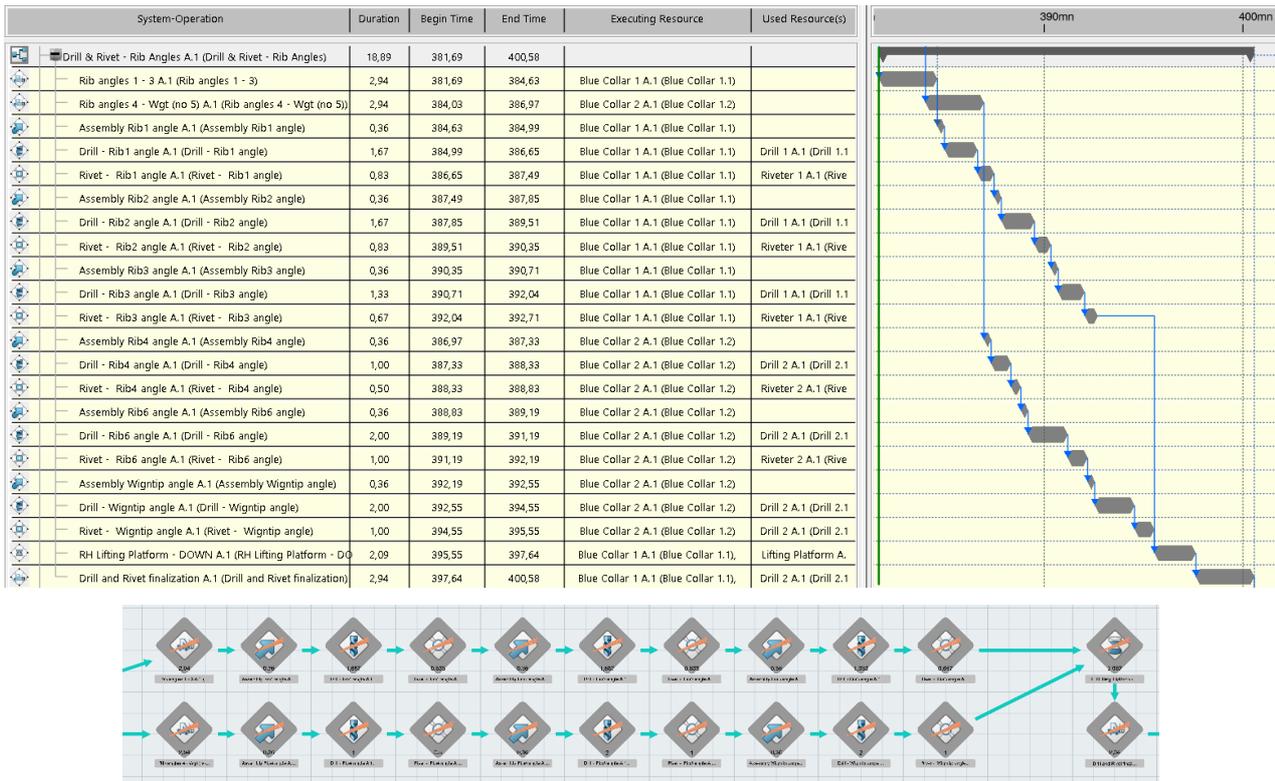


Figura 4-57. Diagrama de Gantt del remachado del revestimiento inferior a las costillas

4.3.4.13 Acercamiento del revestimiento superior al marco central

En este punto del proceso de ensamblaje se efectuará la aproximación final de revestimiento superior para su remachado. La descripción de las operaciones, recursos utilizados y tiempos de operación serán idénticos a los del apartado 4.3.4.4. por lo que se recomienda dirigirse a esta sección para conocer el detalle.

El resultado final es el mostrado en la Figura 4-58.

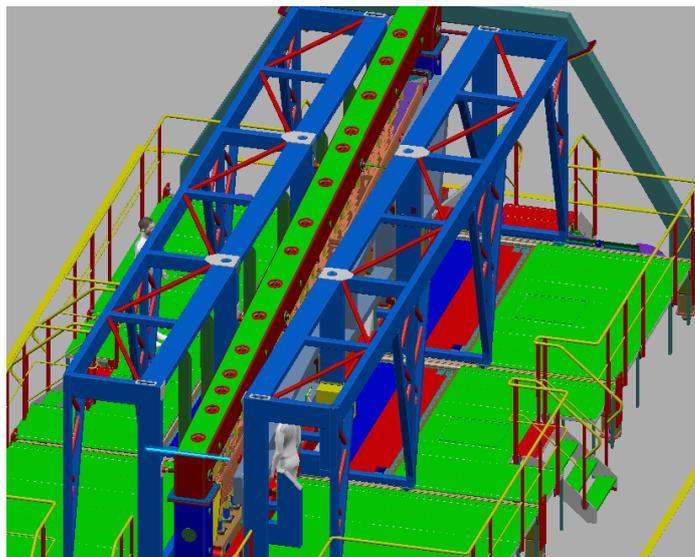


Figura 4-58. Posicionamiento de ambos revestimientos junto al marco central

4.3.4.14 Remachado del revestimiento superior a las costillas y remachado de las celosías

Se procede ahora al remachado del revestimiento superior a las costillas y a las celosías, una vez que este se encuentra junto al marco central y posicionado correctamente.

Antes de remachar de forma definitiva las celosías y costillas, se requiere posicionar las barras de forma alineada con su taladro correspondiente en el revestimiento superior. Una vez que esto se realice y cada celosía esté en su posición óptima, comenzará el remachado definitivo a ambos revestimientos.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Previo a las operaciones de remachado, se requerirá el accionamiento de las plataformas elevadoras para posibilitar el alcance los operarios, así como el aprovisionamiento de los remaches y las herramientas, por lo que, los recursos asignados a este sistema serán los detallados en la Tabla 4–34.

Tabla 4–34. Recursos para el taladrado del ángulo de las costillas

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Remachadora manual 1 	Plataforma elevadora 
	Blue Colar 2 	Remachadora manual 2 	

- Estimación del tiempo:

El tiempo de elevación de la plataforma derecha será 125,2 segundos, según lo calculado en 4.3.4.5, mientras que el tiempo de aprovisionamiento será de 176,4, según lo estimado en 4.3.4.6, por tratarse de una operación similar.

Por último, el tiempo de remachado estará en línea con el número de remaches a realizar, el cual aparece en la Tabla 4–35, con un tiempo de 10 segundos por remache. En cuanto al tiempo de posicionado de las celosías, se va a considerar que se toman 10,8 segundos por barra, según lo definido en el caso del apartado 4.3.4.11 para este tipo de operación. Además, se va a tratar de forma agrupada las barras Inner y Outer, puesto que ambas están en la misma situación y requieren las mismas operaciones.

El número total de taladros y barras es el que aparece en la Tabla 4–35

Tabla 4–35. Número de taladros del revestimiento inferior a las costillas y celosías

Costillas	nº remaches	$t_{remachado}$	Celosía	nº total de barras	$t_{posicionado}$	$t_{remachado}$
1r Rib	42	420 s	1st-3rd Truss	8	86,4 s	80 s
2r Rib	32	320 s	4th-5rd Truss	7	75,6 s	70 s
3r Rib	28	280 s	6th-7rd Truss	6	64,8 s	60 s
4r Rib	16	160 s	8th-11rd Truss	4	43,2 s	40 s
5r Rib	16	160 s	12th Truss	5	54,0 s	50 s
6r Rib	15	150 s	13rd Truss	4	43,2 s	40 s
Wingtip Rib	15					

La forma de proceder será posicionar primeramente todas las barras de celosía para asegurar un correcto ajuste entre ambos revestimientos. De esta forma, se mantiene cierta holgura o tolerancia que no se tendría si se comenzase por remachar las costillas o las celosías una a una y se asegura un correcto posicionamiento. Una vez completada esta operación, comenzarán las operaciones de remachado.

El tiempo total de la operación será de 33,11 minutos, como se puede ver en el diagrama de Gantt de la Figura 4-59. El primer operario trabajará en el remachado de las costillas 1 y 2 y en las celosías 1st hasta la 6th. Mientras que el otro lo hará de la costilla 4 a la de la punta de ala, incluyendo las celosías 7th hasta la 13th. Como se puede ver en dicha figura, el inicio del remachado se ha condicionado a que ambos operarios hayan terminado de posicionar las barras en el revestimiento superior, lo que también se puede ver en la condición temporal mostrada las baldosas del *Process Planning*.

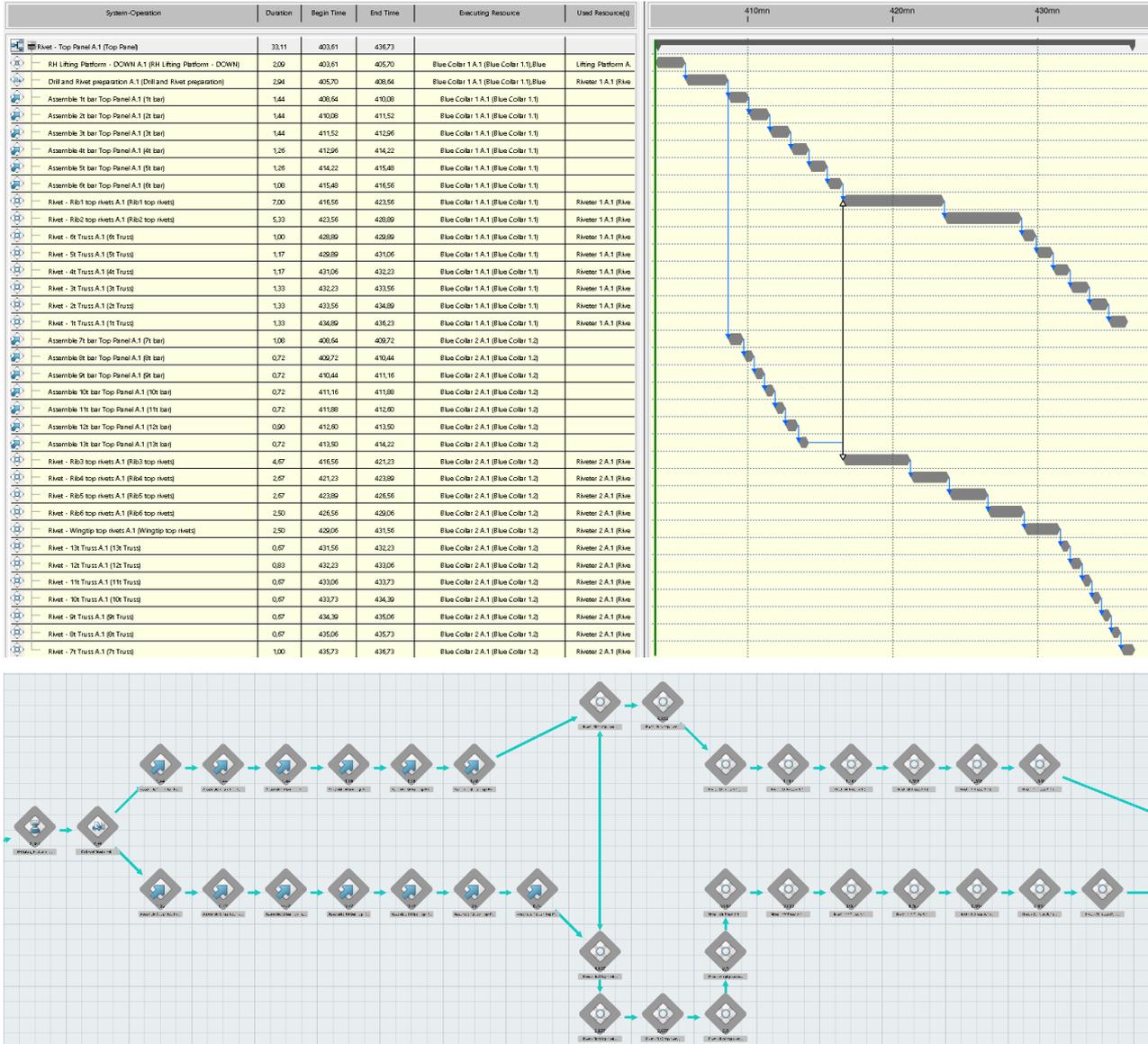


Figura 4-59. Diagrama de Gantt del remachado del revestimiento superior a las costillas

4.3.4.15 Posicionamiento del larguero frontal y remachado al ángulo de las costillas

Se procede ahora a posicionar el larguero frontal sobre el ángulo de las costillas instalado previamente. Se requerirá accionar el puente grúa para su transporte y acondicionar el área retirando la estructura móvil izquierda. Una vez completado el ajuste, se realizará el taladrado y remachado del larguero a las costillas.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Como se ha comentado en la introducción, debido a que la situación que se tiene en la Estación Vertical al inicio de esta operación es la de la Figura 4-58, donde las dos estructuras móviles están junto al marco central, se requiere retirar una de ellas para que el larguero frontal pueda ser posicionado sobre las costillas y entre los dos revestimientos.

Se retirará la estructura móvil izquierda debido a que en la derecha es donde se tiene el marco universal sobre el que se transportará el cajón alar a la Estación Horizontal para comenzar la Fase II.

Los recursos utilizados en esta operación serán los incluidos en la Tabla 4-36.

Tabla 4-36. Recursos para el posicionado del larguero frontal

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Estructura móvil izquierda 	Taladradora 1 
	Blue Colar 2 	Puente grúa 	Remachadora 1 

- Estimación del tiempo:

El tiempo de accionamiento de la plataforma móvil es conocido, siendo de 182,2 segundos según lo detallado en la sección 4.3.4.4.

En cuanto a la estimación de los tiempos de transporte del larguero frontal, se seguirá una lógica similar que para transportar los paneles de los revestimientos. Se necesitará saber el tiempo que se tarda en anclar el larguero en el gancho y posteriormente, conocer la distancia a recorrer en los tres ejes de desplazamiento del puente grúa.

En la Figura 4-60 se ha detallado cual es el recorrido que realizará el larguero: parte de la zona de abastecimiento donde está situado sobre su útil de soporte, y realizará un movimiento de elevación y una traslación hasta el punto más próximo del marco central.

Llegados a este punto, los operarios realizarán el ajuste para el posicionamiento mientras van regulando la altura con el gancho del puente grúa.

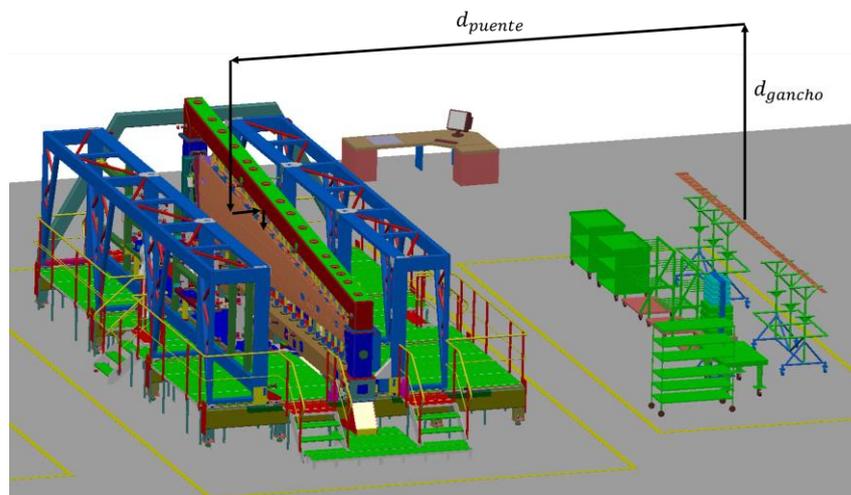


Figura 4-60. Posicionamiento del larguero frontal

El tiempo de ajuste del larguero a la grúa se ha estimado la herramienta *Time Analysis* fijando los siguientes parámetros: A=32, B=16, I=16, lo que arroja un resultado de 203,4 segundos en la opción de *General Move*. Esta estimación tiene en cuenta el traslado de los operarios hasta la posición inicial del larguero y su amarre al gancho de la grúa, lo cual consumirá una gran cantidad de tiempo debido a las dimensiones del larguero.

En cuanto al movimiento de traslación, la distancia del gancho se debe considerar tres veces, puesto que aparte del movimiento de subida y bajada del larguero, el gancho está situado su posición más elevada, por lo que hay que bajarlo hasta la altura del útil. Aplicando lo detallado en la Tabla 4-6, el tiempo total de accionamiento del puente grúa es el que aparece en la Tabla 4-37.

Por último, el tiempo de ajuste al marco será considerado igual que el tiempo de ajuste de la grúa debido a que, aunque no contemplen las mismas operaciones, se requerirá de una ocupación similar de los operarios, ya que deben encajar el larguero en su posición justa sobre los revestimientos y el ángulo de las costillas, lo que tiene una elevada complejidad y requiere precisión.

Tabla 4-37. Tiempos de posicionamiento del larguero frontal

Operación	$t_{ajuste\ a\ la\ grúa}$	d_{gancho}	d_{puente}	t_{crane}	$t_{ajuste\ al\ marco}$
Posicionado del Larguero frontal	230,4 s	6 m · 3	11 m	282 s	230,4 s

Una vez posicionado el larguero, se procede al taladrado y posterior remachado de este. Esto se realizará costilla a costilla y se tendrá que uno de los operarios será el que realiza la acción y el otro hará de soporte, garantizando el éxito de la operación asegurando que la posición y ejecución de los taladros es adecuada. Se comenzará remachando por la costilla más próxima al encastre y avanzando hasta llegar a la de punta de ala.

El número de taladros y remaches a realizar será el detallado en la Tabla 4-38, considerando que cada taladro tomará 20 segundos y cada remache 10 segundos, según lo descrito en la Tabla 4-8.

Tabla 4-38. Número de taladros del larguero frontal a las costillas

Costillas	nº remaches	$t_{taladrado}$	$t_{remachado}$
1r Rib	5	100 s	50 s
2r Rib	5	100 s	50 s
3r Rib	4	80 s	40 s
4r Rib	3	60 s	30 s
5r Rib	6	120 s	60 s
6r Rib	5	100 s	50 s
Wingtip Rib	5	100 s	50 s

En la Figura 4-61 se ha detallado el diagrama de Gantt del posicionamiento del larguero, el cual comienza con la retirada de la estructura móvil izquierda y termina con el remachado de la costilla de punta de ala. El tiempo total del proceso es de 28,88 minutos.

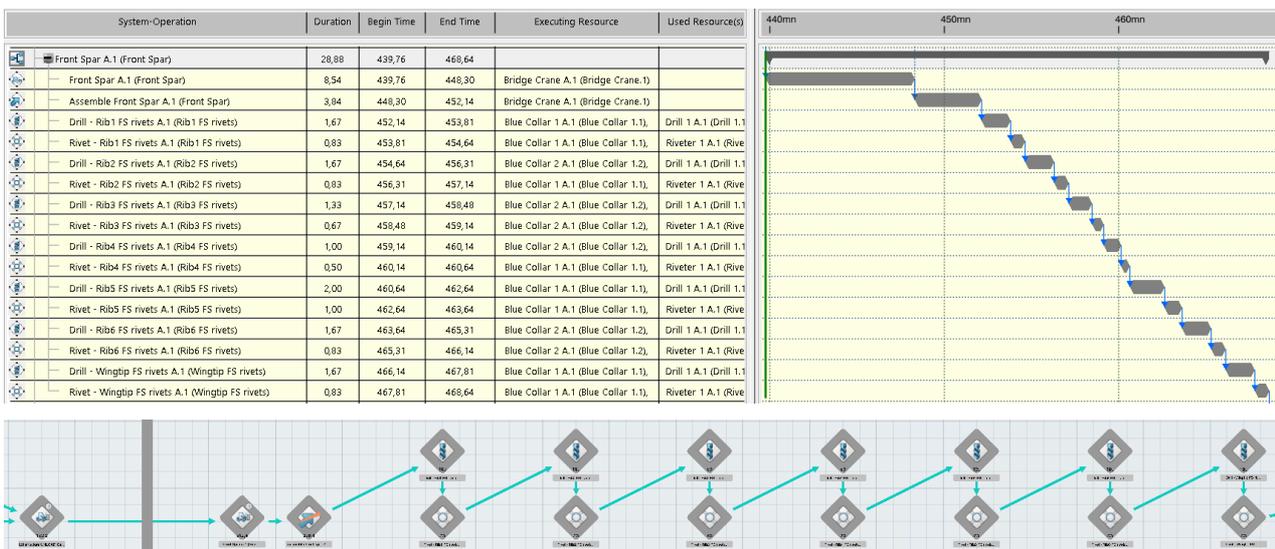


Figura 4-61. Diagrama de Gantt del posicionamiento del larguero frontal

4.3.4.16 Taladrado de las covers de los revestimientos

Por último en la Fase I, se van a taladrar las covers de los revestimientos. Dichas covers son las partes que van a cubrir los manholes y handholes que tienen los revestimientos para posibilitar las operaciones en el interior del cajón alar, como por ejemplo el remachado de las barras de la celosía y las costillas al

revestimiento superior, detallado en el apartado 4.3.4.14.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Puesto que el punto de partida de este sistema de operaciones es el de la sección anterior, se tiene que la estructura móvil izquierda está retirada, mientras que la derecha está sujetando al cajón alar, el cual está también apoyado en los posicionadores inferiores.

Con esta situación, las zonas a taladrar están accesibles para los operarios, puesto que la estructura móvil derecha y el marco universal están diseñados para permitir esa accesibilidad, como se puede ver en la Figura 4-62.

Antes de realizar el taladrado, se deberá realizar el aprovisionamiento de los materiales, así como de un útil que sirva de referencia para los taladros, por lo que el remachado se realizará al par formado por el revestimiento y la cover en cada caso. El operario necesitará posicionar los elementos correctamente antes de proceder.

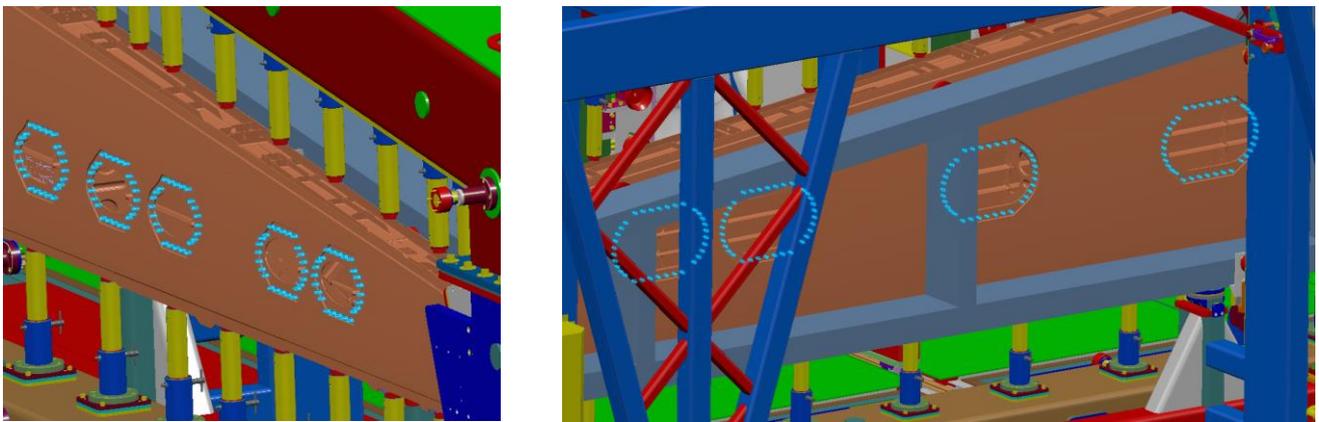


Figura 4-62. Taladros de las covers de los revestimientos (izquierda: inferior, derecha: superior)

Los recursos utilizados serán los detallados en la Tabla 4-39.

Tabla 4-39. Recursos para el taladrado de las covers

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Estructura móvil izquierda 	Taladradora 1 
	Blue Colar 2 	Puente grúa 	Taladradora 2 

- Estimación del tiempo:

El tiempo de aprovisionamiento de las cover, los útiles necesarios para el remachado y las taladradoras es conocido y será de 176,4 según lo estimado en 4.3.4.6. Se deberá reemplazar la Remachadora 1, que se encuentra posicionada en la Estación Vertical de operaciones previas, por la Taladradora 2.

En cuanto al tiempo de posicionamiento de las covers, se va a considerar que es similar al posicionamiento de una barra de celosía, el cual era de 21,6 segundos, según la Figura 4-41. Al finalizar el taladrado, se procederá a la desinstalación de dicha cover y útil, lo que tomará 10,8 segundos por cada una, lo mismo que una barra de celosía.

Por último, el tiempo de taladrado será de nuevo de 20 segundos por taladro y la cantidad de taladros son los definidos en la Tabla 4-40.

Tabla 4-40. Número de covers y taladros de los revestimientos

Top panel covers	nº taladros	$t_{taladrado}$	Bot panel covers	nº taladros	$t_{taladrado}$
Handhole 1	38	760 s	Handhole 1	24	480 s
Handhole 2	36	720 s	Handhole 2	24	480 s
Handhole 3	36	720 s	Handhole 3	24	480 s
Handhole 4	36	720 s	Handhole 4	24	480 s
Handhole 5	34	680 s	Handhole 5	24	480 s
Handhole 6	34	680 s			
Handhole 7	24	480 s			

En la Figura 4-63 se ha incluido el diagrama de Gantt de este sistema, donde se ha definido que un operario realizará las operaciones de los cinco primeros handholes del revestimiento superior y el otro operario trabajará sobre los dos handholes restantes del revestimiento superior y los cinco del revestimiento inferior. Debido al número de taladros de cada uno, ambos operarios finalizarán a la vez y procederán a devolver los útiles, covers y herramientas al área de abastecimiento.

El tiempo total de este sistema es de 68,99 minutos.

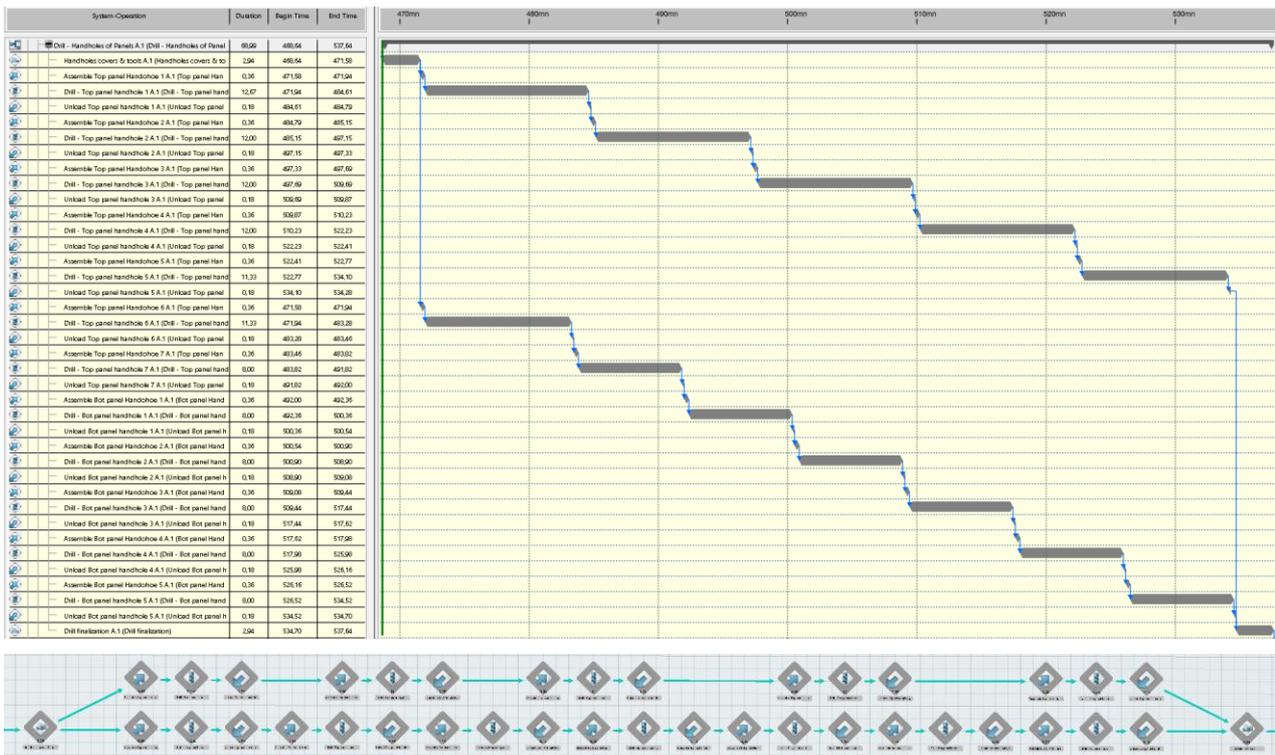


Figura 4-63. Diagrama de Gantt del taladrado de las covers de los revestimientos

4.3.4.17 Finalización de la Fase I

Con este apartado concluye la Fase I del proceso de ensamblaje. El resultado es un cajón alar compuesto por los revestimientos, celosías, costillas y el larguero frontal parcialmente remachado (solo a las costillas).

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Se requiere realizar una serie de operaciones antes de continuar con la Fase II, que comenzará con el transporte del cajón hacia la Estación Horizontal. Estas operaciones serán: bajada de la plataforma

elevadora derecha, desmontar las costillas de los posicionadores inferiores del marco central, desplazar el cajón alar con la estructura móvil derecha y anclar el cajón alar y el marco universal al gancho de la grúa.

Tabla 4-41. Recursos para las operaciones de finalización de la Fase I

Estación Vertical 	Blue Colar 1 	Estructura móvil izquierda 	Taladradora 1 
	Blue Colar 2 	Puente grúa 	Taladradora 2 
			Marco universal 

- Estimación del tiempo:

La plataforma elevadora se bajará en 125,2 segundos, según lo calculado en 4.3.4.5. Para desmontar los posicionadores, se tomará 21,6 segundos por costilla (resultado de fijar P=6 en *Time Analysis*). Mientras que para retirar el cajón alar con la estructura móvil se necesitará 182,2 segundos, según lo detallado en 4.3.4.4. Dichos tiempos se han incluido en una misma operación y se han detallado en la datacard del *Time Analysis* de la operación.

	Description	Code	Frequency	Analyzed...ime(sec)	Value Added
1	Lift Platform RH DOWN	SEC125,2	1	125,2	
2	Bot positioner remove from Ribs	A0B0G0A0B0P6A0	6	129,6	
3	RH structure with WingBox Phase1	SEC182,2	1	182,2	

Figura 4-64. Tiempos de las operaciones de finalización de la Fase I

Por último, se requiere preparar el cajón alar para que pueda ser transportado por el puente grúa. Se considerará que este tiempo es el doble que el calculado para ajustar el larguero frontal, el cual es de 230,4 segundos (según la Tabla 4-37), por lo que se estima que se tardará 460,8 segundos es preparar el anclaje del cajón alar y el marco universal y realizar el anclaje al gancho de la grúa desde la estructura móvil derecha.

En la Figura 4-65 se ha incluido el resultado de la Fase I, la cual tendrá un tiempo efectivo estimado de 552,60 minutos (9 horas 12 minutos 36 segundos).

System-Operation	Duration	Begin Time	End Time
Phase 1 A.1 (Phase 1)	552,60	0,00	552,60
Ribs positioning A.1 (Ribs)	16,20	0,00	16,20
Top Panel joining to RH Structure A.1 (General System00)	23,43	16,20	39,63
Bottom Panel joining to LH Structure A.1 (Bottom Panel)	150,95	39,63	190,58
Top Panel --> Central F - VS A.1 (Top Panel --> Central F)	3,04	190,58	193,62
OUTER Truss Ribs Positioning A.1 (OUTER bars)	27,62	193,62	221,24
Drill - Top Panel A.1 (Top Panel)	36,94	221,24	258,18
INNER T bars from OUTER T bars A.1 (INNER bars)	16,20	256,85	273,05
Drill - Top Panel to Inner T bars A.1 (Drill - Top Panel to In)	19,56	267,18	286,74
Top Panel UNLOAD Central F - VS A.1 (Top Panel UNLOA)	3,04	286,74	289,78
Bot Panel --> Central F - VS A.1 (Bot Panel --> Central F -	3,04	289,78	292,81
Drill - Bot Panel A.1 (Bot Panel)	38,36	292,81	331,17
OUTER T bars from INNER T bars A.1 (OUTER bars)	17,98	324,17	342,15
Drill - Bot Panel to Outer T bars A.1 (Drill - Bot Panel to Ou)	8,76	338,39	347,15
Truss support removing A.1 (Truss support removing)	19,34	345,39	364,73
Rivet - Bot Panel A.1 (Bot Panel)	19,30	364,73	384,03
Drill & Rivet - Rib Angles A.1 (Drill & Rivet - Rib Angles)	18,89	381,69	400,58
Top Panel --> Central F - VS A.1 (Top Panel --> Central F)	3,04	400,58	403,61
Rivet - Top Panel A.1 (Top Panel)	33,11	403,61	436,73
LH structure UNLOAD Central F - VS A.1 (Bot Panel UNL)	3,04	436,73	439,76
Front Spar A.1 (Front Spar)	28,88	439,76	468,64
SetUp - Vertical station A.1 (SetUp - Vertical station.1)	0,00	0,00	0,00
Drill - Handholes of Panels A.1 (Drill - Handholes of Panel)	68,99	468,64	537,64
Phase 1 finalization A.1 (Phase 1 finalization)	7,28	537,64	544,92
L Wing Box Phase 1 preparation for crane A.1 (L Wing B	7,68	544,92	552,60

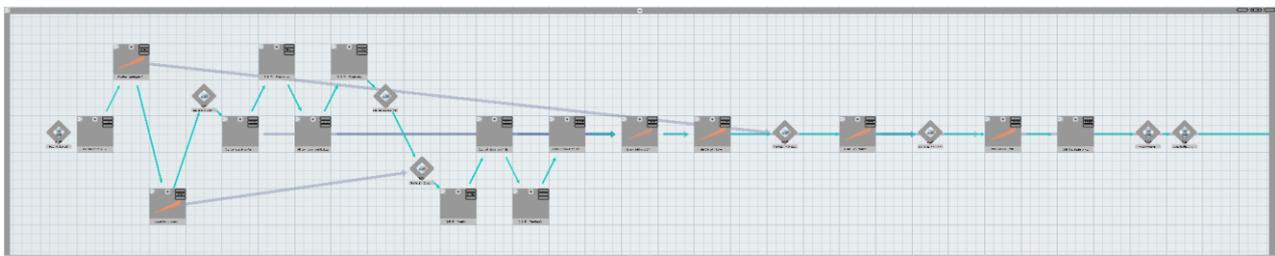


Figura 4-65. Lista de sistemas y tiempos de la Fase I

4.3.5 Operaciones de la Fase II y III

4.3.5.1 Transferencia del cajón alar a la Estación Horizontal y posicionamiento

La Fase II comienza con la realización de la transferencia del cajón alar resultante de la Fase I desde la Estación Vertical a la Estación Horizontal. Esto se realizará mediante el puente grúa y el marco universal, partiendo de la posición de la estructura móvil derecha y se finalizará posicionando el marco universal con el cajón alar sobre la estructura de la Estación Horizontal. El detalla de la operación se ha ilustrado en la Figura 4-66.

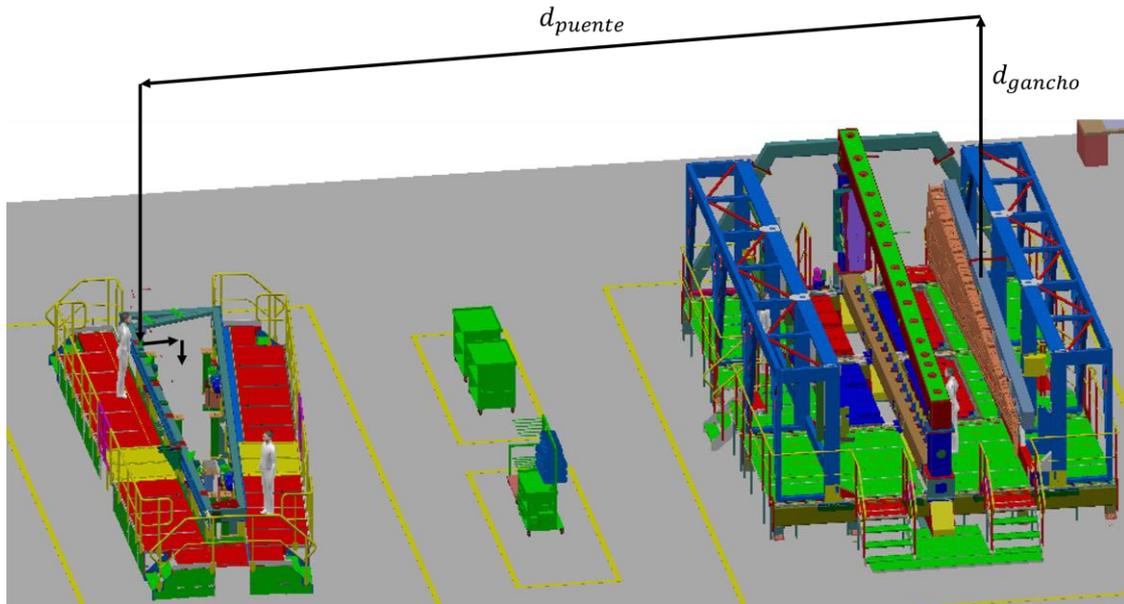


Figura 4-66. Posicionamiento del cajón alar para la Fase II

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Se requerirá de una actuación conjunta de ambas estaciones para asegurar un correcto transporte y posicionamiento de los elementos, por lo que se verán implicados los operarios que están asignados a ambas estaciones. Los recursos necesarios están resumidos en la Tabla 4-42.

Estos operarios deberán coordinarse para asegurar que el marco universal es situado en la posición exacta, siendo la parte más crítica el cambio del plano vertical al horizontal poco antes de salir de la Estación Vertical para minimizar el riesgo de desplazamiento del cajón alar del útil durante el transporte.

Tabla 4-42. Recursos para el posicionamiento del cajón alar en la Estación Horizontal

Estación Horizontal 	Blue Colar 1 	Puente grúa 
	Blue Colar 2 	Marco universal 
	Blue Colar 3 	
	Blue Colar 4 	

- Estimación del tiempo:

En cuanto a los tiempos implicados en esta operación, se recurrirá a estimar el tiempo de transferencia partiendo de la distancia recorrida y de la velocidad de cada eje del puente grúa. Posteriormente, se estimará el tiempo necesario para el correcto posicionamiento con precisión sobre el marco de la Estación Horizontal, lo que incluirá también el tiempo para el desacople del marco universal con el puente grúa. En la Figura 4-67 se puede ver el detalle de la operación.



Figura 4-67. Foto del posicionamiento del cajón alar en la Estación Horizontal [3]

Estos tiempos se pueden ver en la Tabla 4-43, donde las distancias a recorrer son las que aparecen en la primera y según columna. Se elevará el marco universal con el ala 6 metros, se realizará un desplazamiento de 16 metros entre las estaciones y, posteriormente, se descenderá el marco universal 6,5 metros. Utilizando las velocidades de desplazamientos que se definieron en la Tabla 4-6, se tiene que el tiempo total de esta transferencia es de 246 segundos.

Se considerará que el tiempo de ajuste del marco universal al marco de la Estación Horizontal es similar al que se ha necesitado para realizar el anclaje inicial en la grúa para su transporte, el cual se ha definido en el apartado 4.3.4.16, el cual es 460,8 segundos.

Tabla 4-43. Tiempos de posicionamiento del cajón alar para la Fase II

Operación	d_{gancho}	d_{puente}	t_{crane}	$t_{ajuste\ al\ marco}$
Posicionado del cajón alar en la Estación Horizontal	6 m + 6,5 m	16 m	246 s	460,8 s

En la Figura 4-68 se ha representado la vista del *Process Planning* de las operaciones que se incluyen en este apartado. La primera baldosa es el sistema que engloba todas las operaciones de la Fase I, después de esto está la operación de transferencia con el puente grúa y, por último, se encuentra la operación de posicionamiento en la Estación Horizontal, la cual es la primera operación del sistema que engloba al Fase II.

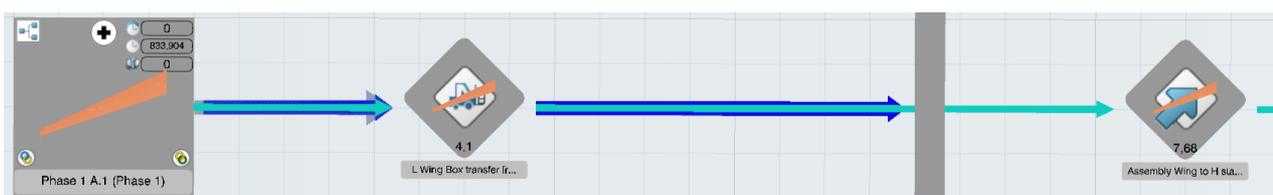


Figura 4-68. Operaciones para el posicionamiento del cajón alar en la Estación Horizontal

4.3.5.2 Posicionamiento del larguero anterior y remachado a las costillas

La primera operación efectiva de la Fase II consiste en el posicionamiento del larguero anterior, para su posterior taladrado y remachado a las costillas.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

La operación de posicionamiento será similar a la descrita en el apartado 4.3.4.15 para el larguero frontal, donde el larguero partirá del mismo punto y deberá ser transferido hasta la Estación Horizontal utilizando el puente grúa. Se considera remarcar que el puente grúa parte en este punto desde la Estación Horizontal, ya que su operación anterior ha sido la situación del cajón alar y el marco universal, por lo que se debe tener en cuenta el tiempo hasta llegar a la posición inicial del larguero.

Una vez posicionado el larguero, se procederá a su taladrado y remachado a las costillas, lo que se

realizará con una sola máquina manual utilizada por un operario mientras el otro está de soporte y control del proceso.

Los recursos utilizados en este sistema serán los incluidos en la Tabla 4-44.

Tabla 4-44. Recursos para el posicionado del larguero anterior

Estación Horizontal 	Blue Colar 3 	Puente grúa 
	Blue Colar 4 	Taladradora 3 
		Remachadora 3 

- Estimación del tiempo:

Los tiempos de transporte del larguero anterior serán definidos de forma similar al otro, pero se tendrá que recalcularse la distancia recorrida con el puente grúa debido a que ahora se interacciona con la Estación Horizontal. El tiempo total será de 276 segundos, a realizar dos veces debido a que la situación de la grúa al iniciar este sistema de operaciones.

En cuanto al tiempo de ajuste, se considerará el mismo que en el anterior larguero, el cual es 230,4 segundos según lo definido en el apartado 4.3.4.15, el cual será incluido antes y después del movimiento de transferencia. En la Tabla 4-45 se puede encontrar el detalle de los tiempos.

Tabla 4-45. Tiempos de posicionamiento del larguero anterior

Operación	$t_{ajuste\ a\ la\ grúa}$	d_{gancho}	d_{puente}	t_{crane}	$t_{ajuste\ al\ marco}$
Posicionado del Larguero anterior	230,4 s	$(6\ m + 6,5\ m) \cdot 2$	$21\ m \cdot 2$	$276\ s \cdot 2$	230,4 s

Una vez posicionado el larguero, se procede al taladrado y posterior remachado de este. Esta operación se realizará costilla a costilla y se comenzará remachando la costilla más próxima al encastrado y avanzando hasta llegar a la costilla de punta de ala.

El número de taladros y remaches a realizar será el detallado en la Tabla 4-38, considerando que cada taladro tomará 20 segundos y cada remache 10 segundos, según lo descrito en la Tabla 4-8.

Tabla 4-46. Número de taladros del larguero anterior a las costillas

Costillas	nº remaches	$t_{taladrado}$	$t_{remachado}$
1r Rib	5	100 s	50 s
2r Rib	5	100 s	50 s
3r Rib	4	80 s	40 s
4r Rib	3	60 s	30 s
5r Rib	6	120 s	60 s
6r Rib	5	100 s	50 s
Wingtip Rib	5	100 s	50 s

En la Figura 4-69 se ha representado el diagrama de Gantt de este proceso, el cual tomará 32,48 minutos, un tiempo algo superior a lo detallado en la Figura 4-61 para el larguero frontal, debido principalmente al incremento de la distancia de transferencia entre la posición de abastecimiento y la Estación Horizontal.

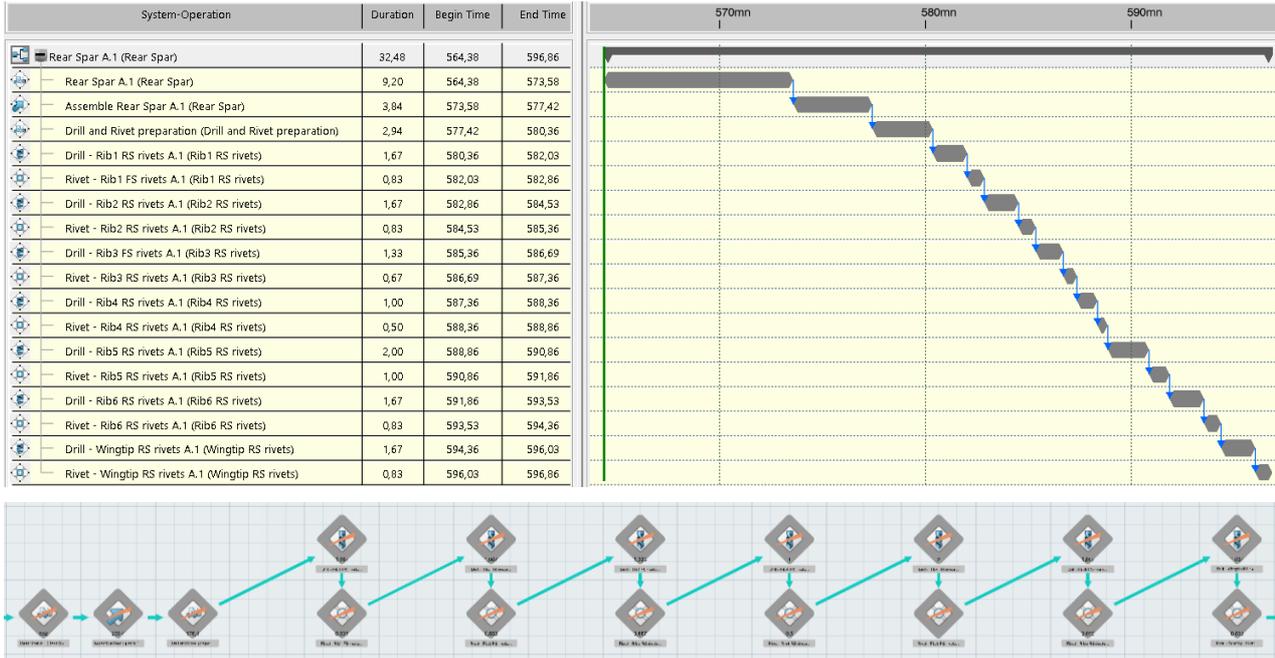


Figura 4-69. Diagrama de Gantt del posicionado del larguero anterior y remachado a las costillas

4.3.5.3 Taladrado de los largueros a los revestimientos por CN y remachado

Una vez se tiene el larguero anterior posicionado y parcialmente remachado, se procede a realizar el taladrado y el remachado de ambos largueros a los revestimientos. Gracias al sistema de taladrado automático por Control Numérico del que dispone la Estación Horizontal, según lo detallado en 4.3.2.7, es posible realizar el taladrado de ambos largueros a la vez y de forma autónoma. El remachado se realizará de forma manual por los operarios.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

Según lo ilustrado en la Figura 4-70, la operación consistirá en realizar el taladrado de las filas de taladros remarcadas, las cuales se encuentran en la superficie de unión entre los largueros y los revestimientos.

Primeramente, los operarios necesitarán realizar el ajuste e inicialización del sistema por Control Numérico, que una vez iniciado, realizará el taladrado avanzando de forma paralela a los bordes de ataque y de salida del cajón alar.

Posteriormente, se procederá a realizar el remachado por parte de ambos operarios, donde cada uno de ellos trabajará en un larguero en paralelo y utilizando las remachadoras neumáticas manuales.

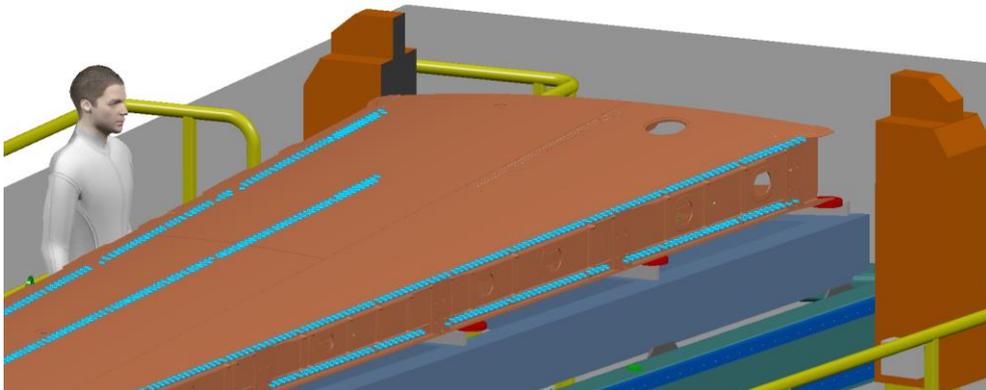


Figura 4-70. Taladrado automático de los largueros a los revestimientos

Tabla 4-47. Recursos para el taladrado y remachado de los largueros a los revestimientos

Estación Horizontal	 Blue Colar 3	Sistema de taladrado automático por CN 	 Remachadora 3
	 Blue Colar 4		 Remachadora 4

- Estimación del tiempo:

El tiempo de taladrado depende del número de taladros a realizar y del tiempo medio definido en la sección 4.3.3.4, la cual establece que el sistema de taladrado automático por Control Numérico tomará de media 15 segundos por taladro y el remachado manual requerirá de 10 segundos por remache. En la Tabla 4-48 se puede encontrar el número total de taladros y remaches y su tiempo asociado.

Tabla 4-48. Número de taladros y remaches de los largueros y los revestimientos

Largueros	n° taladros	$t_{taladrado}$	$t_{remachado}$
Front Spar	964	14.460 s	9.640 s
Rear Spar	923	13.895 s	9.230 s

Como se puede observar en la Tabla 4-48, el tiempo requerido para este sistema es alto en comparación con el resto. Aunque el larguero frontal tenga 41 taladros más que el anterior, al funcionar el sistema de taladrado automático de forma paralela, ambos avanzarán a la misma velocidad, por lo que el tiempo total de la operación será el que establece el larguero frontal, 14.460 segundos, es decir, 4 horas y 1 minuto. La taladradora automática para el larguero anterior tendrá por tanto 10 minutos y 15 segundos de tiempo de inactividad.

Antes de esto, se requerirá preparar y ajustar el sistema por Control Numérico para que la operación se realice correctamente. Esta preparación requerirá la revisión y puesta a punto de la maquinaria del sistema y el reglaje de los largueros junto con la trayectoria que seguirá el mecanismo a través de los raíles de del marco de la Estación Horizontal. Se va a considerar que el tiempo necesario para esto es de 30 minutos y que requerirá de ambos operarios.

Por último, se procederá al remachado sobre los taladros recién realizados. Esto requerirá una preparación previa para disponer de los remaches y las herramientas en la Estación Horizontal que tomará 176,4 segundos, según se estimó utilizando la herramienta *Time Analysis* en secciones anteriores como 4.3.4.6. Acto seguido, cada operario trabajará en paralelo y sobre uno de los largueros durante el tiempo total que se ha definido en la Tabla 4-48.

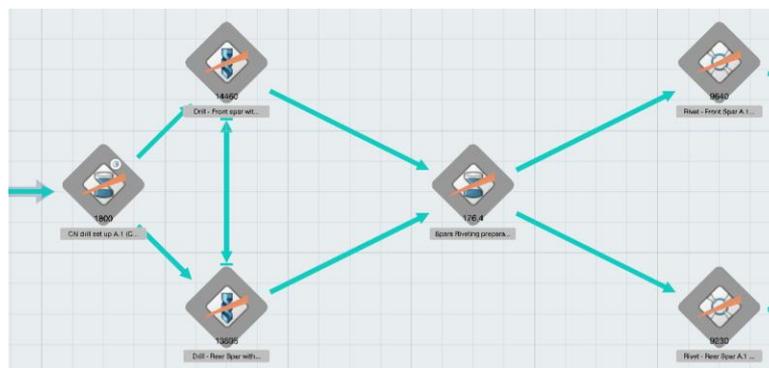


Figura 4-71. Diagrama de Gantt del taladrado y remachado de los largueros a los revestimientos

En la Figura 4-71 se ha incluido el diagrama de Gantt resultante y las baldosas de operaciones de este sistema. En el diagrama, a diferencia de los anteriores, se muestra los tiempos en horas, donde se puede ver que la duración total es de 7,24 horas, siendo aproximadamente 4 horas de taladrado y casi 3 horas de remachado. Se puede apreciar que la operación de taladrado del larguero anterior se representa que comienza tiempo después que la del larguero frontal, pero realmente empiezan a la vez, como se ha detallado antes. Debido a la restricción *End-End* incluida y al menor tiempo de actividad de esta operación, el diagrama de Gantt se calcula como tal.

En el caso del remachado, como era esperable, el operario que trabaja sobre el larguero anterior terminará antes debido a que realizará 41 remaches menos que el operario que trabaje en el larguero frontal.

4.3.5.4 Posicionamiento, taladrado y remachado del fairing

A continuación se realizará el posicionamiento, taladrado y remachado del fairing. Esta estructura menor tiene una cantidad y variabilidad elevada de partes, como se detalló en la sección 3.2.9.

Esta será la última operación de la Fase II, según lo definido en 4.3.3.1.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

La forma de proceder será montar primero las partes más grandes, taladrarlas y remacharlas entre sí para asegurar rigidez estructural al conjunto. Se utilizará el útil definido en la sección 4.3.2.8 como soporte para el proceso de montaje del fairing.

El detalle del proceso se ha definido en la Figura 4-72. El útil se retirará una vez se remachen las partes laterales y la inferior del fairing, mientras que una vez que se tenga completamente montado, se incluirá la pieza del montante del alerón (en gris en dicha imagen).

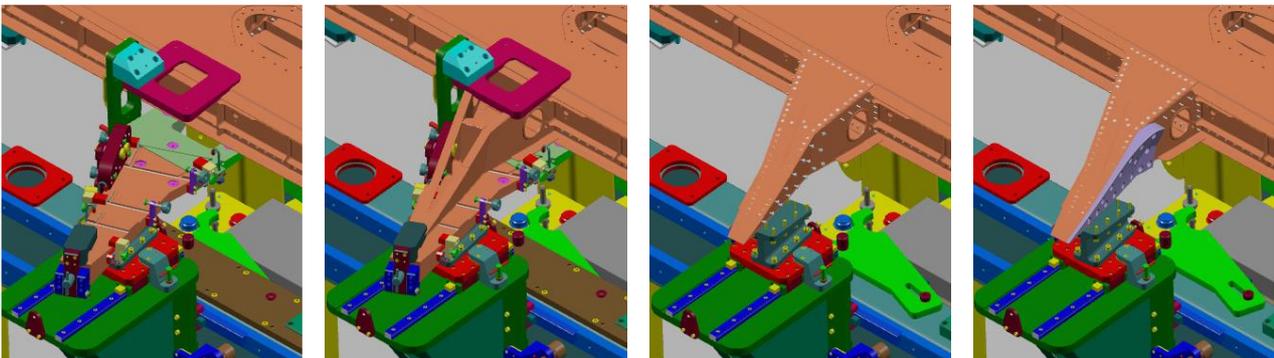


Figura 4-72. Posicionamiento, taladrado y remachado del fairing

Los recursos utilizados en este sistema serán por tanto los incluidos en la Tabla 4-49.

Tabla 4-49. Recursos para el posicionado, taladrado y remachado del fairing

Estación Horizontal		Blue Colar 3		Posicionador para el fairing	
		Blue Colar 4		Taladradora 3	
				Remachadora 3	

El orden de las piezas que serán ensambladas, así como los taladros y remaches que se realizarán para cada par de partes son los definidos en la Tabla 4-50.

Tabla 4–50. Secuencia de ensamblaje del fairing

Secuencia	Provided Parts	n° de taladros y remaches
1º	Fairing Top spar	73 (*)
2º	Fairing Left Spar	4
3º	Fairing Rib	5
4º	Fairing Right Spar	9
5º	Fairing Rib Fastener	3
6º	Fairing Right Fastener	5
7º	Fairing Left Fastener	6
8º	Fairing Bottom Fastener	-
9º	Tip Fairing Fastener	-
10º	Fairing Bottom Spar	73
11º	Fairing Aileron Mount	16

(*) el Fairing Top spar será la primera pieza posicionada, pero no será taladrada y remachada hasta el punto 4º. En el punto 10º, se remachará las piezas del Bottom Fastener y el Tip Fastener.

- Estimación del tiempo:

El tiempo para el aprovisionamiento del útil, las partes del fairing y las herramientas de taladrado y remachado tomará 176,4 segundos, según el resultado arrojado por el *Time Analysis* para la Estación Horizontal y el área de aprovisionamiento que se encuentra junto a ella.

En cuanto al tiempo de posicionamiento de las piezas, se estimará fijando el parámetro $P = 6$, lo que significará que se realiza un *Adjustment with Precision*, siendo este tiempo de 21,6 segundos.

Los tiempos de taladrado y remachado son los incluidos en la sección 4.3.3.4, siendo de 20 segundos y 10 segundos por taladro y remache, respectivamente.

Por último, el tiempo de desmontaje del útil y devolución al área de abastecimiento será el mismo que se ha tomado para su transferencia inicial, esto es, 176,4 segundos.

El diagrama de Gantt del montaje del fairing se ha incluido en la Figura 4-73, donde se puede ver que la duración total es de 106,84 minutos y las operaciones que más tiempo toman son las de taladrado y remachado de las partes inferiores y superior del fairing: Top y Bot Spars. A partir del remachado del Top Spar, ya no es necesario el útil de soporte debido a que se ha alcanzado cierta rigidez estructural, por lo que se procede a su desmontaje en ese punto.

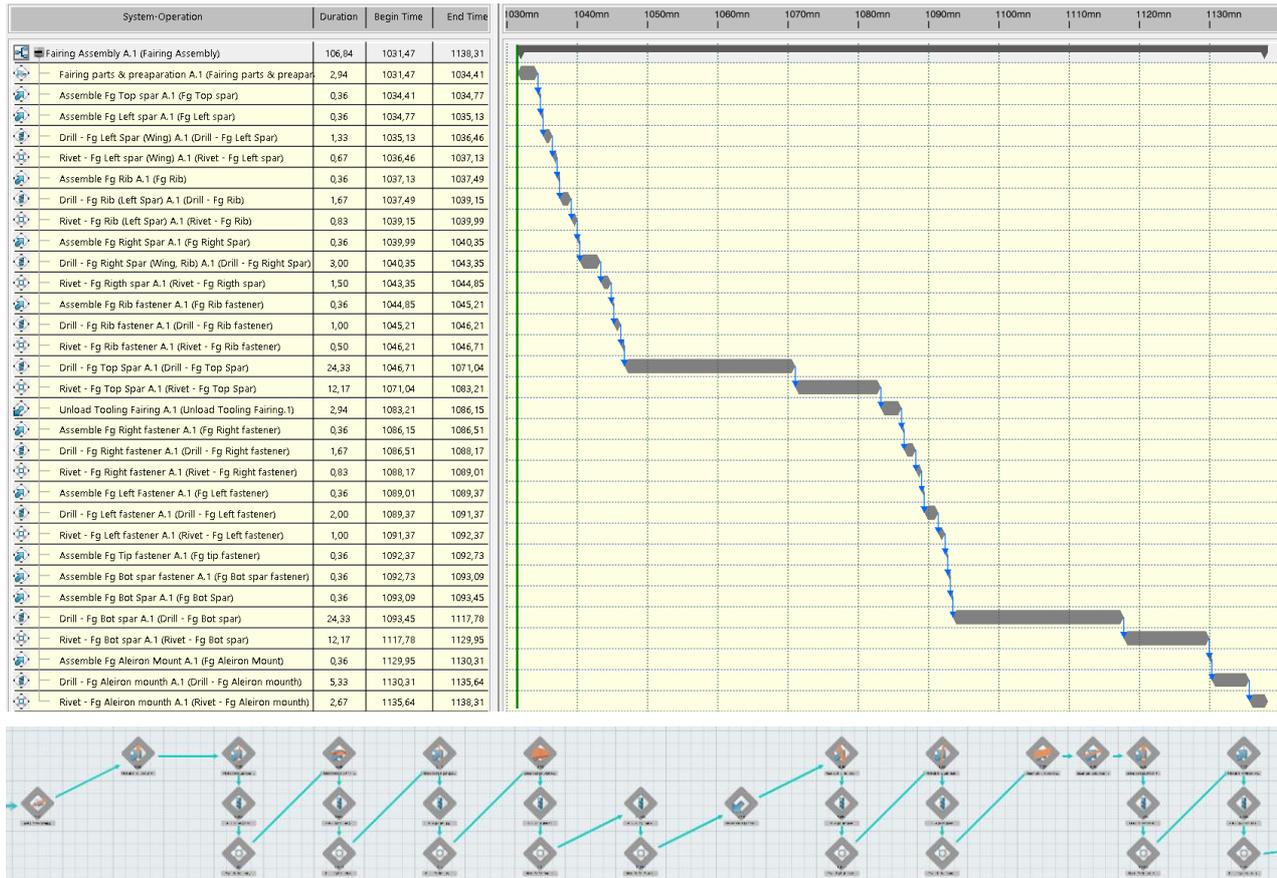


Figura 4-73. Diagrama de Gantt para montaje del fairing

4.3.5.5 Taladrado y remachado del montante del alerón en el Wingtip

Esta será la primera de las operaciones de la Fase III. El cambio de Fase no significará un cambio de estación puesto que las operaciones que se van a realizar en la Fase III son factibles de ser realizadas en la misma Estación Horizontal.

El montante del alerón que se sitúa en la costilla de punta de ala y será la pieza complementaria a la que se ha remachado en la última de las operaciones del montaje del fairing, definido en 4.3.5.4. Además de esta pieza, se taladrará y remachará un pequeño ángulo situado en la costilla de punta de ala.

- Descripción de la operación y recursos utilizados:

La forma de comenzar las operaciones será realizando en primer lugar el desmontaje del útil de punta de ala, el cual se utilizó durante el posicionamiento del cajón alar después su transferencia desde la Estación Vertical. Posteriormente, se procederá ensamblar el montante del alerón, y en último lugar el ángulo de la costilla de punta de ala. El detalle de esta secuencia se ha representado en la Figura 4-74.

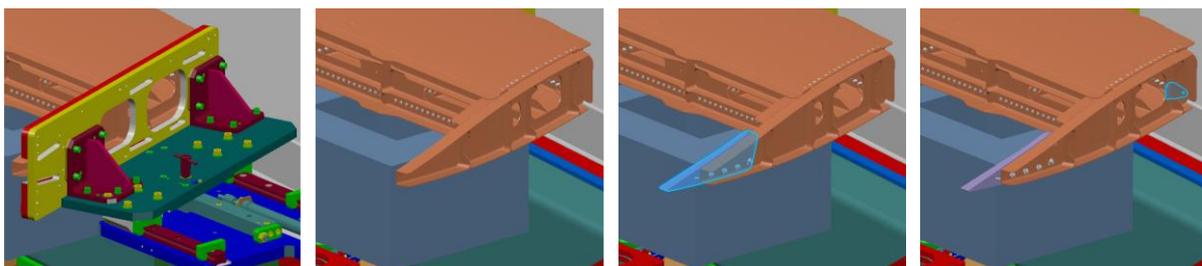


Figura 4-74. Posicionamiento, taladrado y remachado del fairing

Los recursos disponibles son los detallados en la Tabla 4–51, donde la taladradora y remachadora manuales son las que se utilizaron la operación anterior.

Tabla 4–51. Recursos para el montante del alerón de punta de ala

Estación Horizontal	 Blue Colar 3	 Soporte de punta de ala
	 Blue Colar 4	 Taladradora 3
		 Remachadora 3

• Estimación del tiempo:

Los tiempos utilizados en este sistema de operaciones serán similares a los empleados en la sección anterior, 4.3.5.4:

- 176,4 segundos para el desmontaje del útil de punta de ala y aprovisionamiento de las partes a ensamblar (en dos operaciones consecutivas).
- 21,6 segundos para el montaje de las partes, 20 segundos para el taladrado de cada taladro y 10 segundos para el remachado por remache. El montante del alerón tiene 9 taladros y el ángulo de la costilla de punta de ala tiene 2 taladros.

El resultado de este sistema se muestra en la Figura 4-75, requiriendo un total de 12,10 minutos.

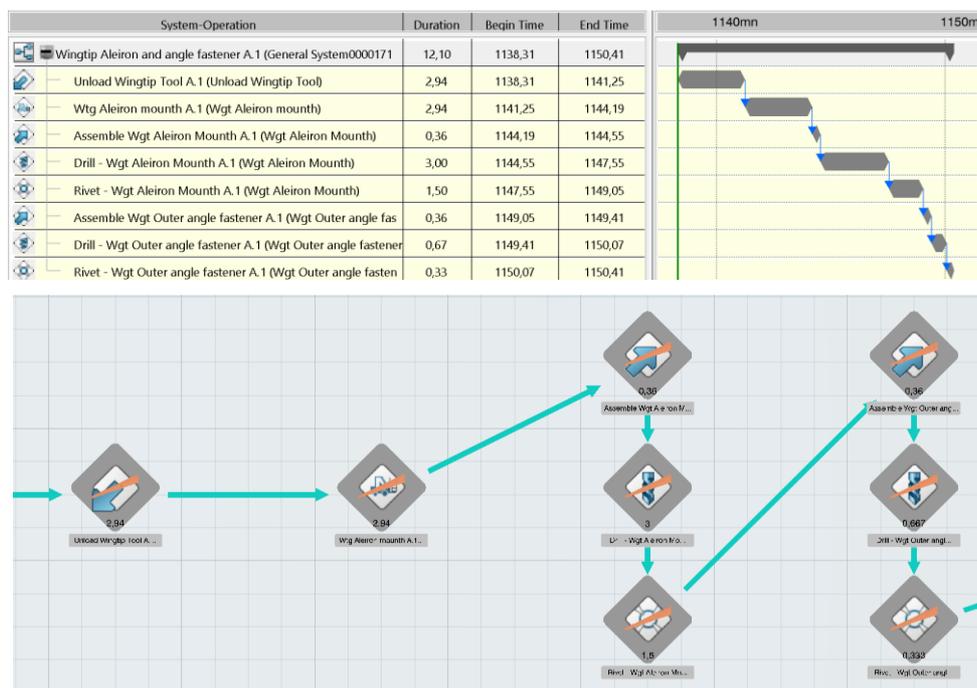


Figura 4-75. Diagrama de Gantt para el montante del alerón en el Wingtip

4.3.5.6 Taladrado y remachado de las covers de los largueros

Esta será la última operación del modelo del proceso de ensamblaje que se ha incluido en el alcance de este trabajo. Consistirá en el taladrado de las covers de los handholes de ambos largueros. El procedimiento será similar al caso de las covers de los revestimientos, detallado en el apartado 4.3.4.16.

• Descripción de la operación y recursos utilizados:

Las partes implicadas son las que se han remarcado en la Figura 4-76, donde la mayoría de ellas están sobre el larguero frontal. Cada operario trabajará en una cover cada vez, lo que permite que se realicen las operaciones en paralelo, requiriendo también una remachadora y una taladradora cada uno.

Antes de comenzar la operación, se llevará a cabo el aprovisionamiento de las covers, las herramientas faltantes y los remaches.

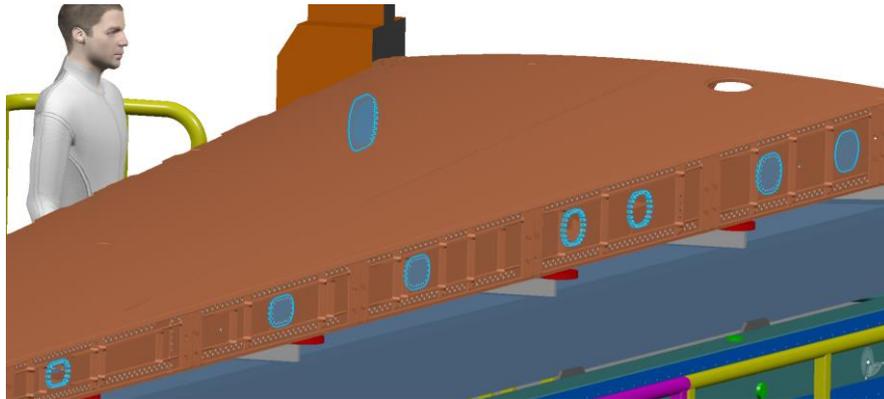


Figura 4-76. Covers y handholes de los revestimientos

Los recursos utilizados serán los detallados en la Tabla 4-53.

Tabla 4-52. Recursos para el taladrado y remachado de las covers de los largueros

Estación Horizontal	 Blue Colar 3		Taladradora 3 	Remachadora 3 
	Blue Colar 4		Taladradora 4 	Remachadora 4 

- Estimación del tiempo:

El tiempo de aprovisionamiento de las cover, sus remaches, los útiles necesarios para el remachado y las taladradoras es conocido y será de 176,4 según lo estimado en 4.3.4.6. La taladradora 3 y la remachadora 3 se encuentran ya en la Estación Horizontal, por lo que no se requerirá su aprovisionamiento.

En cuanto al tiempo de posicionamiento de las covers para el taladrado, se va a considerar que es similar al posicionamiento de una barra de celosía, el cual era de 21,6 segundos, según la Figura 4-41. Posteriormente, se tomará 20 segundos por taladrado y 10 segundos por remache. La cantidad de partes, taladros y remaches a realizar en este sistema son los incluidos en la Tabla 4-53.

Tabla 4-53. Número de covers de los largueros

Larguero	Covers	n° taladros	$t_{taladrado}$	$t_{remachado}$
Front Spar	Cover 1	24	480 s	240 s
Front Spar	Cover 2	24	480 s	240 s
Front Spar	Cover 3	23	460 s	230 s
Front Spar	Cover 4	22	440 s	220 s
Front Spar	Handhole 1	24	480 s	240 s
Front Spar	Handhole 2	24	480 s	240 s
Front Spar	Handhole 3	22	440 s	220 s
Rear Spar	Cover 1	37	740 s	370 s

En la Figura 4-77 se ha incluido el diagrama de Gantt de este sistema de operaciones, el cual tendrá una duración de 61,82 minutos y será el último de los sistemas de operaciones de la Fase III incluidos en este modelo de ensamblaje para el cajón alar izquierdo.

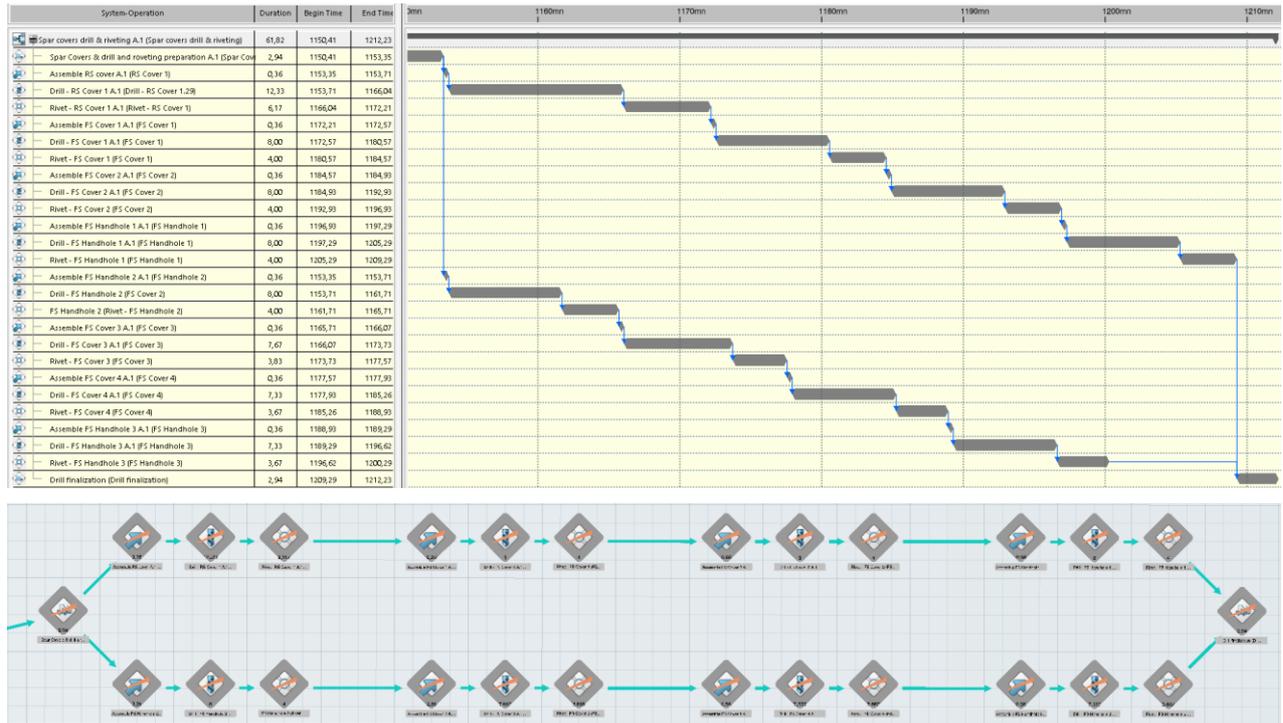


Figura 4-77. Diagrama de Gantt del taladrado de las covers de los revestimientos

Concluye así por tanto las Fases II y III del proceso. La lista de sistemas totales de estas fases, así como el que engloba la Fase I se ha incluido en la Figura 4-78, donde se puede ver que el proceso total toma 1212,23 minutos (20 horas 13 minutos 14 segundos), siendo la Fase II la que más tiempo toma.

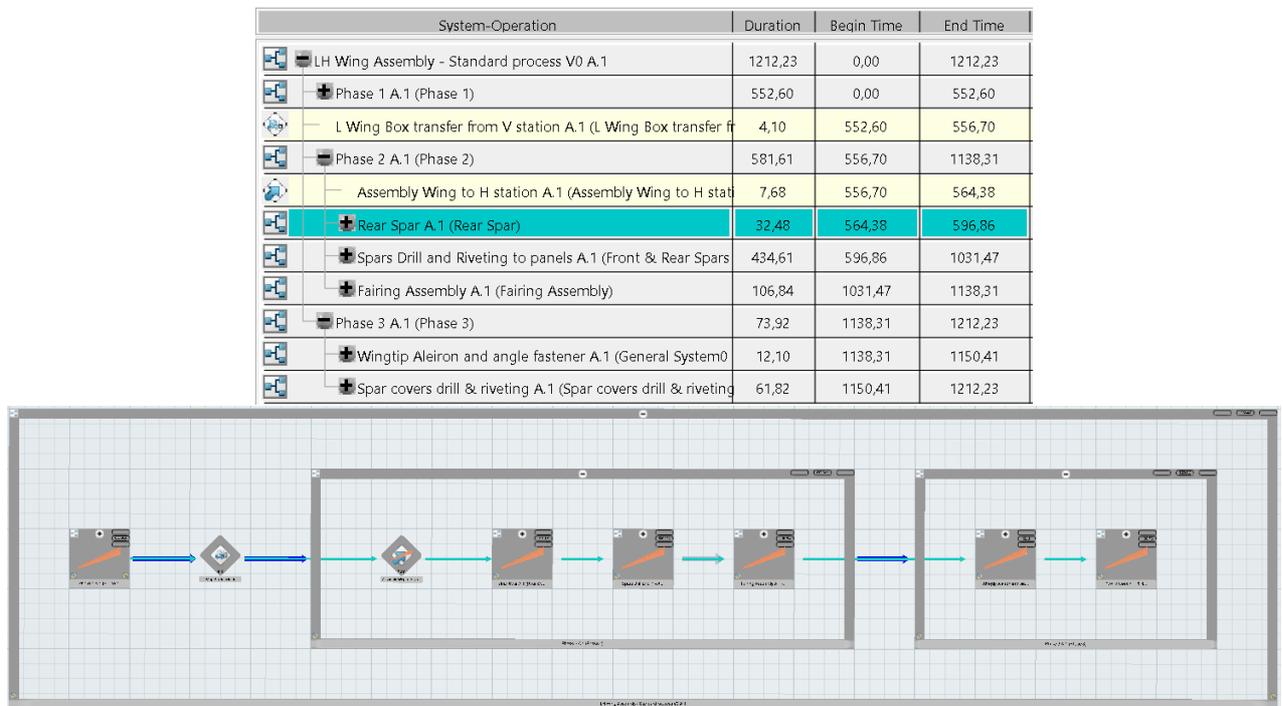


Figura 4-78. Sistemas de la Fase II y Fase III

El análisis detallado y la evaluación de los resultados se ha incluido en el 6.

5 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE ENSAMBLAJE

*No one wants to learn by mistakes,
but we cannot learn enough from successes to go beyond the state of the art.*

Henry Petroski

En el presente capítulo se procede a detallar cómo se ha realizado la simulación del proceso de ensamblaje utilizando para ello la aplicación específica *Assembly Evaluation*. La forma de hacerlo ha sido mediante la definición de las trayectorias y movimientos que han de realizar las partes, conjuntos y recursos para llevar a cabo las operaciones definidas en el Capítulo 4.

Assembly Evaluation cuenta con varias herramientas para evaluar si las trayectorias definidas son realizables, como, por ejemplo, analizando si se produce alguna interferencia entre las otras partes y recursos. De este modo se puede validar si las hipótesis, las operaciones y la secuencia de ensamblaje son correctas.

Por último, esta aplicación permite generar un vídeo de la simulación de las trayectorias, el cual se ha incluido como anexo a este documento describiendo el proceso de ensamblaje de este modelo.

5.1 Introducción a la aplicación *Assembly Evaluation*

La aplicación *Assembly Evaluation* es la que en 3DEXperience se utiliza para evaluar un proceso de ensamblaje o fabricación, esto se consigue mediante la definición de las trayectorias que siguen las partes del conjunto, dichas trayectorias se pueden definir como *Tracks*. [9]

Estos *tracks* se pueden definir sobre cualquiera de los objetos que cuelgan del árbol del *PPR context*: un producto físico o parte, un conjunto ensamblado, un recurso o una operación. Esto hace posible que se puedan definir las trayectorias en cualquiera de los niveles, sin embargo, la aplicación está principalmente enfocada para que sean definidas sobre las operaciones. Será en estas donde ya estén asociadas las partes, conjuntos o recursos necesarios para que se lleve a cabo.

La forma de definir cada una de las trayectorias es usando el robot como soporte. Después de seleccionar una operación y asignar las partes y recursos que van a realizar la trayectoria, se irán definiendo los puntos utilizando dicho robot. Posteriormente, *Assembly Evaluation* calculará la trayectoria en base a esos puntos de forma lineal o mediante un spline, según lo que defina el usuario. Un ejemplo de ello se puede ver en la Figura 5-1, donde la línea azul es la trayectoria que recorre los diferentes puntos definidos representado por las cruces.

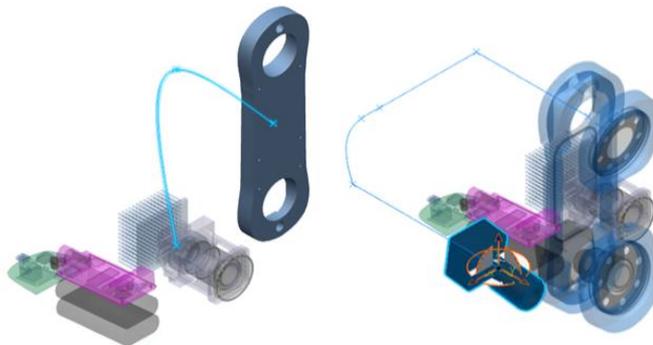


Figura 5-1. Trayectorias en *Assembly Evaluation*

Una vez se tengan definidas todas las trayectorias, se puede utilizar la funcionalidad *Experience Player* para reproducirlas. Esta funcionalidad se activa pulsando el botón central del *compass*, como se puede ver en la Figura 5-2, lo que dará acceso a los botones de simulación para reproducir, avanzar, retroceder y ajustar la velocidad.

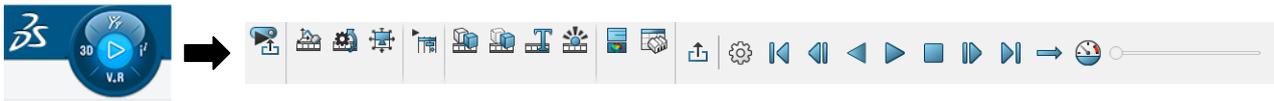


Figura 5-2. *Experience Player*

Aparte de la definición y simulación de las trayectorias, *Assembly Evaluation* ofrece otras opciones de evaluación que se pueden utilizar en cualquier proceso de fabricación ya definido. Estas opciones son:

- *Swept Volume*: permite generar el volumen que requiere la operación. Esto se computa a través del volumen de la pieza o recurso y la trayectoria que este recorre.
- *Dynamic Clash*: esta herramienta permite analizar si existe interferencias en la trayectoria.
- *Measure Between Probe*: realiza el cálculo de la distancia entre el elemento seleccionado y los subyacentes.
- *Section Probe*: calcula la sección del elemento o elementos.

En resumen, *Assembly Evaluation* es una aplicación que permite validar el proceso de ensamblaje que se ha definido con anterioridad, así como simular el montaje o desmontaje de todas las partes teniendo en cuenta los recursos asignados. Esto puede ser de gran ayuda a la hora de realizar el estudio de viabilidad de un proyecto de fabricación y permite detectar y eliminar problemas que se pueden presentar durante al diseño del proceso o en etapas posteriores.

5.2 Simulación del ensamblaje del cajón alar

A continuación se describirá la simulación que se ha realizado mediante *Assembly Evaluation* para el caso concreto del ensamblaje del cajón alar.

Durante el desarrollo de este trabajo, esta simulación ha permitido detectar incongruencias en cuanto a las trayectorias que siguen las partes, la secuencian en la que se ensamblan las mismas o la interacción con los recursos. Después de varias iteraciones en el proceso de montaje, se consigue llegar a un proceso depurado y óptimo, siendo este el que ha documentado en el Capítulo 4.

Las trayectorias principales que se han definido son con relación al movimiento de las partes desde el área de abastecimiento hasta la estación de montaje correspondiente, así como las interacciones de las principales estructuras móviles y recursos más representativos.

Cabe destacar que no se han incluido simulaciones sobre ergonómica del movimiento, mecanismos o procesos de taladrado o remachado manual debido a que no está dentro del alcance de esta evaluación.

En los siguientes apartados se ha resumido las trayectorias más representativas que se han definido.

5.2.1 Trayectorias del posicionamiento de las costillas y celosías

Como se detalla en la sección 4.3.4.1, las costillas y celosías se posicionan después de ser transportadas de forma manual por los operarios, es por esto por lo que se han representado el recorrido que estas partes siguen en la Figura 5-3. Como se puede ver, se define que el recorrido se haga por la parte superior e inferior de la Estación Vertical y desde el útil situado en el área de abastecimiento. Después de situar cada costilla en su posicionador correspondiente, es necesario realizar la trayectoria inversa para proceder con la siguiente costilla.

En el caso de las costillas 1º y 2º, se requiere de ambos operarios para su posicionamiento, sin embargo, para el resto cada operario trabajará de forma independiente y en paralelo al otro, accediendo uno por la parte superior

y otro por la inferior de la Estación Vertical.

Al principio se consideró la trayectoria definida a través de la escalera situada en el lateral de la estación, pero luego se dio como no factible al considerarse que el marco universal está posicionado desde el inicio de las operaciones, lo que impedía el paso hacia el marco central.

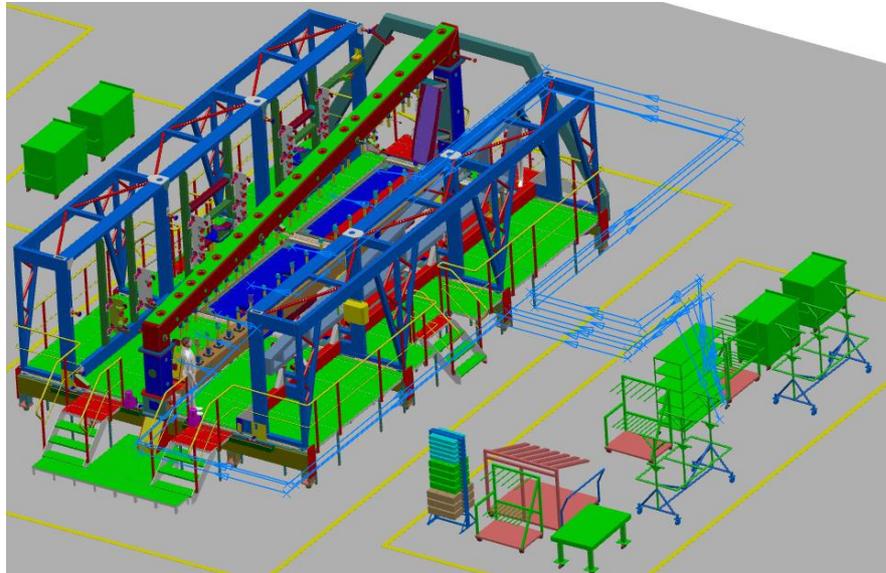


Figura 5-3. Trayectorias de las costillas y barras de celosía

5.2.2 Trayectorias del posicionamiento de los revestimientos

En las operaciones correspondientes al posicionamiento de los revestimientos (4.3.4.2 y 4.3.4.3), se describió que esto se realiza mediante el puente grúa, donde los diferentes paneles parten desde el útil en el que están situados hasta sus diferentes posiciones en las estructuras móviles. En la Figura 5-4 se detallan dichas trayectorias, donde se puede ver que, durante el inicio de estas, se requiere pasar cada panel desde su posición vertical hasta su horizontal.

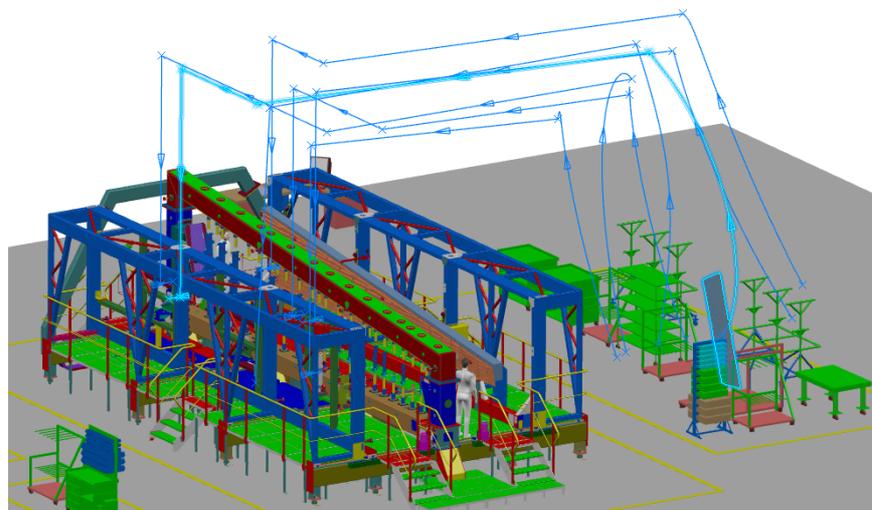


Figura 5-4. Trayectorias de los paneles de los revestimientos

Este cambio de ángulo es necesario debido al útil que se ha utilizado, el cual era el que estaba disponible en el catálogo y más se ajustaba a las necesidades de la operación. En caso de disponerse de un útil que permita

despachar los paneles en su posición horizontal, no será necesario dicho giro, simplificando la trayectoria y la operación.

5.2.3 Trayectorias de las estructuras móviles

Otra de las trayectorias más representativas de las operaciones en la Estación Vertical son los movimientos de las estructuras móviles. Dichos movimientos serán en un solo eje y se utilizarán para acercar y alejar los revestimientos del marco central. Cabe destacar, que el movimiento de la estructura móvil derecha, la situada a la izquierda de la Figura 5-5, incluirá también el movimiento del marco universal.

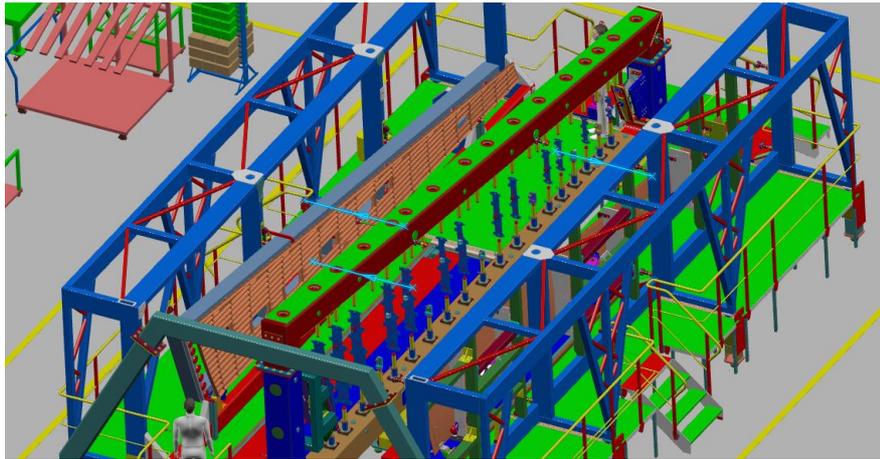


Figura 5-5. Trayectoria de las estructuras móviles

5.2.4 Trayectorias del cajón alar de la Fase I a la Fase II

Esta trayectoria consiste en situar el cajón alar y el marco universal en la Estación Horizontal, partiendo de la estructura lateral derecha de la Estación Vertical, tal y como se ha detallado en la sección 4.3.5.1.

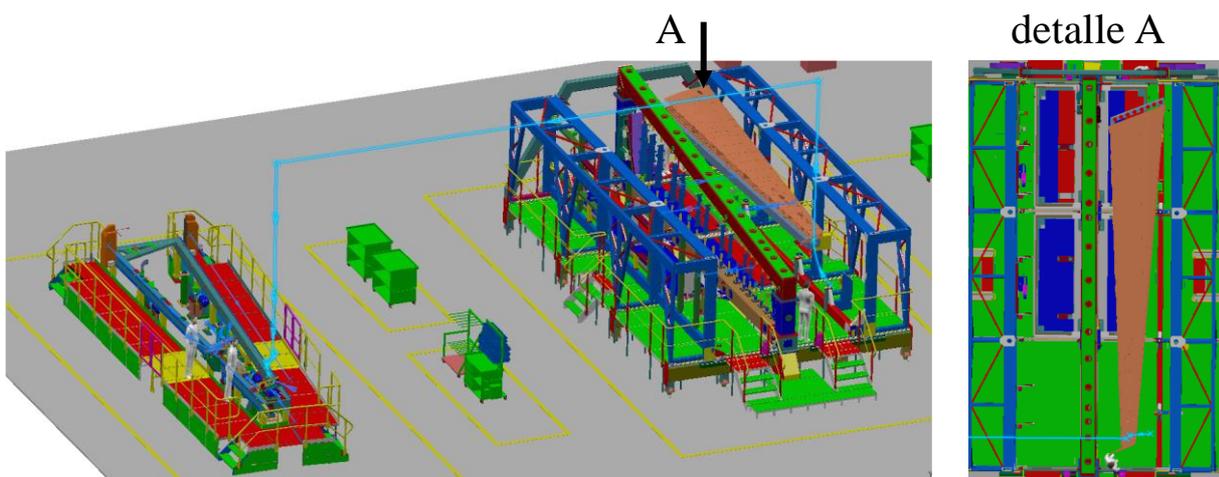


Figura 5-6. Trayectoria del cajón alar desde la Fase I hasta la Fase II

Instantes posteriores después de desprenderse de la estructura, se realizará un cambio de plano del ala, pasando de su vertical a la horizontal. Se ha considerado que esto se hace con la ayuda de este útil que eleva el marco universal y el cajón alar, el cual no se incluye en el modelo. A su vez, los operarios tendrán que accionarlo para

poder realizar el giro. Se realizó un análisis de interferencias para validar que esta trayectoria es posible. Como se puede apreciar Figura 5-6, se concluyó que es factible, pero requiere una precisión elevada debido al poco margen de maniobra que se tiene, como se puede ver en el detalle A.

Otra opción sería elevar totalmente el marco en su posición vertical, y transportarlo así hasta la otra estación, pero esto supondrá tener cierto riesgo de desprendimiento del ala con respecto al útil, si no se consigue una fijación adecuada, lo cual es difícil debido al tamaño de esta. Es por esto, que se ha supuesto este caso para incrementar la seguridad del proceso y en base a las imágenes de [3], aunque el otro también sería factible.

El recorrido posterior es lineal, hasta la llegada a la Estación Horizontal, donde se requerirá el ajuste del marco universal en la posición correcta con la ayuda de los operarios de esta estación y el utillaje que dicha estación dispone para ello.

5.2.5 Trayectorias de los largueros

Los largueros tienen una trayectoria similar a los paneles, partiendo desde sus útiles correspondientes en la zona de abastecimiento. Realizan una trayectoria lineal dirigida por el puente grúa, hasta terminar en su posición final junto a los revestimientos.

El larguero frontal es posicionado sobre los ángulos de las costillas, siendo transportado hasta las proximidades de la parte superior del marco central con el movimiento del gancho y del puente, sin requerir accionamiento del carro. Desde ahí, los operarios lo acercan hasta su posición correcta.

El larguero anterior sigue un procedimiento similar, sin embargo, la distancia es mayor debido a tiene que llegar hasta la Estación Horizontal partiendo desde la misma área de aprovisionamiento. Esta trayectoria es la que se ha representado en la Figura 5-7.

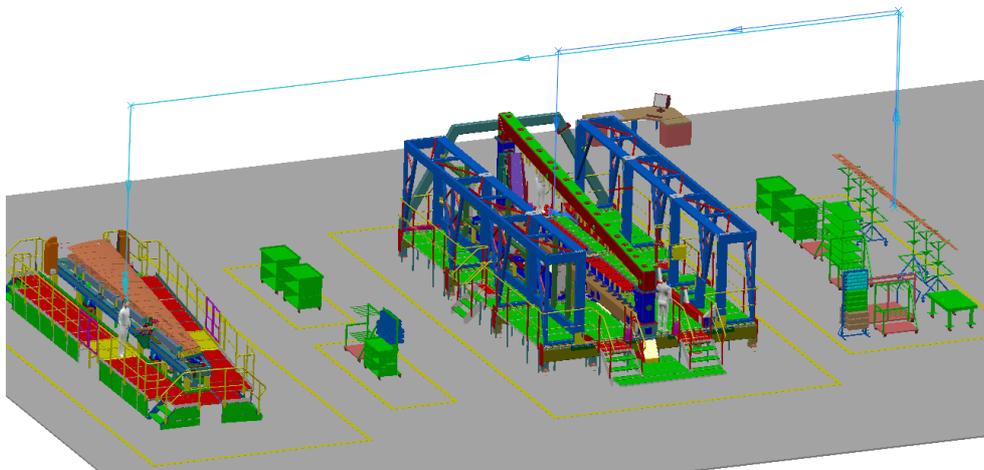


Figura 5-7. Trayectoria de los largueros

5.2.6 Trayectorias del sistema de taladrado por CN

Como se definió en la sección 4.3.2.7, la Estación Horizontal cuenta con un sistema automático de taladrado por Control Numérico para los largueros. Este sistema está acoplado sobre unos railes que recorren todo el largo del ala. En la Figura 5-8 se ha detallado la trayectoria que se sigue, la cual es paralela a dichos railes, además de a los largueros. El instante representado es un punto medio y se ha considerado que el taladrado comienza en el encastre.

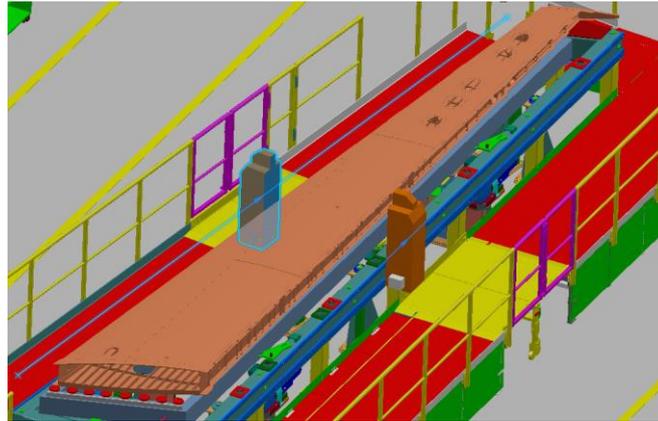


Figura 5-8. Trayectoria del sistema de taladrado por CN

5.2.7 Trayectorias del montaje del fairing

Por último, en la Figura 5-9 se puede ver cómo se han definido las trayectorias de ensamblaje del fairing. Únicamente se ha considerado el movimiento desde de posición cercana al marco universal hasta su posicionamiento sobre el ala, siendo lo más interesante de estas trayectorias el análisis de la secuencia de ensamblaje.

Gracias a esta simulación, se ha podido definir el orden en el que las piezas son acopladas, taladradas y remachadas, siendo necesario en un punto intermedio del proceso, la retirada del útil que se puede ver en la Figura 5-9 para incorporar las partes superiores del fairing.

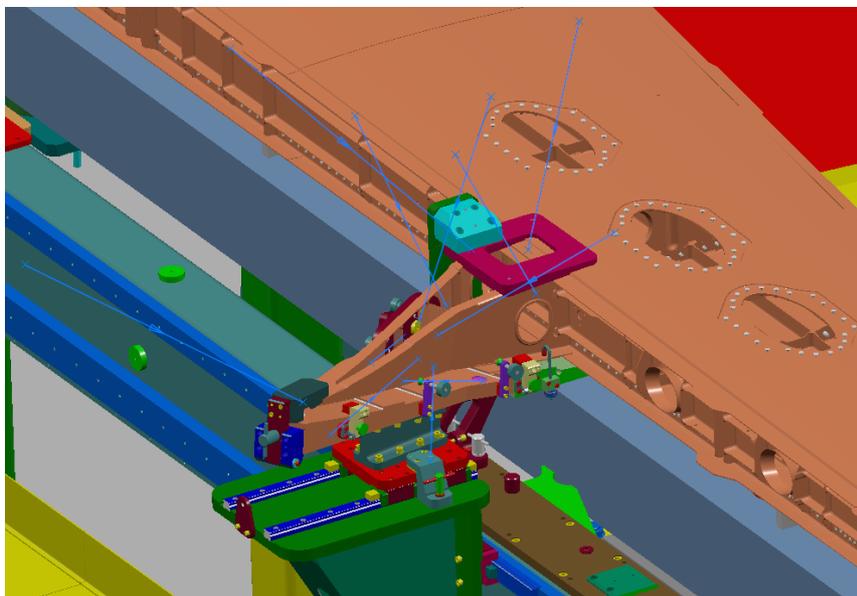


Figura 5-9. Trayectoria del montaje del fairing

Después de implementar todas estas trayectorias y validar que el proceso de ensamblaje es factible, se procedió a secuenciar y grabar la simulación en video, el cual podrá encontrarse anexo a esta memoria escrita e incluirá todos los detalles del proceso de ensamblaje.

6 EVALUACIÓN DEL PROCESO Y LOS RESULTADOS

Engineering is the professional and systematic application of science to the efficient utilization of natural resources to produce wealth.

Theodore Jesse Hoover

Como punto final del trabajo, se incluye este capítulo en el que se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el modelo del proceso de ensamblaje. Dicho análisis se centrará en el estudio de los tiempos de las operaciones de los sistemas en los que está dividido el proceso, así como de la duración de cada uno de ellos. Además, se detallará en qué proporción están repartidos esos tiempos de trabajo entre los diferentes recursos asignados.

Para su realización se utilizará la funcionalidad *Workload Balancing* y *Resource Balancing* de las aplicaciones *Process Planning* y *Equipment Allocation*. Estas funcionalidades permiten analizar lo antes descrito de una forma visual y ágil, lo que permitirá obtener una serie de conclusiones sobre los sistemas y el modelo.

Por último, se plantearán dos escenarios de producción o demanda para el caso del cajón alar que se describe en este documento. Para cumplir con estos escenarios, sugerirá una serie de modificaciones en el modelo o en las variables de entrada para así alcanzar una solución óptima.

6.1 Análisis de los tiempos de los sistemas

En esta sección se realizará un análisis detallado de los tiempos totales obtenidos en el modelo para cada sistema y fase en la que está dividida el proceso completo. Se utilizará para ello la funcionalidad *Workload Balancing* y el Diagrama de Gantt, ambas en la aplicación *Process Planning*.

Workload Balancing está diseñada para realizar un análisis de distribución de la carga de trabajo entre los diferentes subsistemas de un sistema superior. Esta herramienta muestra, utilizando un diagrama de barras y una tabla, el tiempo que toma cada operación del sistema, de modo que se pueda detectar con facilidad si alguno está sobre cargado, en cuanto a tiempo de trabajo se refiere, y ayuda a realizar un balance de dicha carga entre los otros sistemas. Más información puede encontrarse en la plataforma didáctica 3DExperience Edu Space [9].

Se comenzará representando el resultado que se obtiene de procesar el *Workload Balancing* del proceso completo en Figura 6-1. Aquí se tiene una columna por cada uno de los sistemas de las tres fases, las cuales se han separado por una línea vertical en azul. No se pretende utilizar esta imagen para mostrar los tiempos totales en cada sistema ya que no es factible debido a las dimensiones de la misma, sino que se considera relevante utilizar la gráfica que ofrece esta funcionalidad para resaltar de manera visual cómo están distribuidos los tiempos totales del proceso.

Cada bloque en azul de cada columna representa una operación dentro de ese sistema. A mayor tiempo de operación, de mayor tamaño será dicho bloque. Esto significa que la altura de la columna es el tiempo total de las operaciones, pero debido a que estas operaciones pueden realizarse de forma paralela, la duración total del sistema podrá ser menor. Solo para aquellos sistemas en que todas las operaciones se realicen de forma totalmente secuencial y comenzando en el mismo instante que termina la anterior, el tiempo total del sistema será igual a su duración.

Se ha utilizado la definición del *Cycle Time*, o Tiempo de Ciclo, de cada sistema para incluir su duración. Esto significa que se ha supuesto que en cada sistema se realiza un ciclo que dura exactamente el tiempo obtenido después de definir el tiempo de cada operación y la secuencia entre ellas. Esta duración se representa mediante



Figura 6-2. Workload Balancing de la Fase I

En cuanto a los sistemas de las Fases II y III, se puede ver en la Figura 6-3 y la Figura 6-4. En estas fases, la cantidad de sistemas es mucho menor debido a dos razones:

- En la Fase II, la actividad central es el remachado y taladrado de los largueros, estando la grada Horizontal donde se realiza totalmente diseñada para esta actividad, incluyendo incluso un sistema de taladrado automático por Control Numérico que permite reducir los tiempos de operación. Aun así, el tiempo de la operación de taladrado es elevado, por lo que esta grada está mayormente dedicada a realizar estas operaciones, no dando lugar a realizarse otras.
- La Fase III de este modelo seguramente esté incompleta. Puesto que solo se han incluido las operaciones asociadas al modelo del cajón alar del que se parte en este trabajo detallado en 1.3. Si se tuviera el ala al completo y no solo el cajón, en esta Fase III se realizarían otras operaciones como por ejemplo el montaje de las costillas del borde de ataque, como se define en la documentación de referencia [3]. Además, en dicha documentación se incluye que el remachado del larguero posterior se realiza en esta fase, sin embargo, debido a que la operación es posible secuenciarla con el remachado del larguero anterior y guarda una alta similitud, se han incluido ambas en la Fase II.

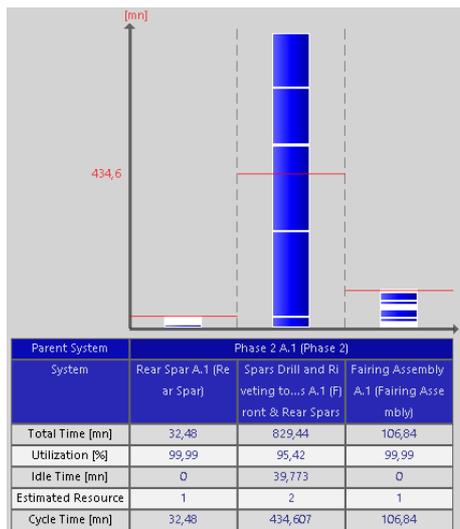


Figura 6-3. Workload Balancing de la Fase II

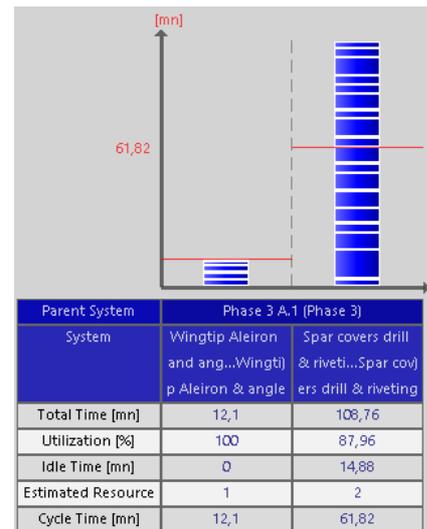


Figura 6-4. Workload Balancing de la Fase III

Complementario a estos resultados, se pueden obtener conclusiones similares del diagrama de Gantt del proceso completo, el cual se ha incluido en la Figura 6-5, habiéndose resaltado las cabeceras de cada fase. Las líneas en amarillo representan operaciones que no están incluidas dentro de sistemas y se refieren generalmente a las de

transporte de los conjuntos, finalización o posicionamiento del cajón alar. Esto no supone un impacto a las conclusiones antes obtenidas debido a que los tiempos de dichas operaciones son bajos en comparación con el de los sistemas.



Figura 6-5. Diagrama de Gantt del proceso completo

Adicionalmente, en el diagrama de la Figura 6-5, se puede ver claramente la duración total de cada fase y de sus sistemas asociados. Comparando la Fase I y II, se aprecia que ambas tienen una duración similar: 552,6 minutos la Fase I y 581,61 minutos la Fase II. Esto supone que se pueda concluir y confirmar que ambos procesos están diseñados para que trabajen de forma secuencial y a la vez en una línea de montaje, es decir, que el proceso que una vez se finalice la Fase I y se transporte el resultante a la Fase II, se reinicie el proceso en la Fase I de nuevo. Posteriormente, ambas estaciones terminarán en tiempos similares, lo que permitirá comenzar a fabricar otro próximo cajón alar.

En cuanto a la Fase III, como se ha comentado antes, no es posible realizar una comparativa debido a que el modelo del proceso no incluye todas las operaciones que se deberían realizar en esta fase.

A modo de resumen en la Tabla 6-1 Tabla 6-2 se incluye que el tiempo total del sistema, así como el de cada una de las fases.

Tabla 6-1. Duración y tiempo total del proceso

	Duración	Tiempo efectivo de trabajo
Fase I	552,60 min	803,76 min
Fase II	581,60 min	968,76 min
Fase III	73,92 min	120,86 min
Total	1.212,23 min (20,20 h)	1.897,48 min (31,62 h)

6.2 Análisis de la carga de trabajo de los recursos

De una forma similar a lo detallado en la sección 6.1 para los diferentes sistemas de operaciones, se puede realizar un análisis para los recursos utilizados utilizando la función *Resource Balancing* en la aplicación *Resource Allocation*. La cual tiene un funcionamiento similar a la *Workload Balancing*.

En la Figura 6-6 se ha incluido el resultado los recursos asociados a la Estación Vertical y aquellos que son propios de ella, como las estructuras móviles y elevadoras y el soporte para las celosías, como se puede ver al final de la imagen.

Las conclusiones principales que se pueden sacar de la Figura 6-6 son:

- Ambos operarios tienen una carga de trabajo similar. Por lo que el modelo tiene un correcto balanceado en esta estación gracias a una correcta distribución de las operaciones que se realizan de forma paralela o por un solo operario.
- Las herramientas de taladrado son las más utilizadas y el tiempo de taladrado de la Fase I será la suma del tiempo de funcionamiento de la taladradora 1 y la 2, siendo este: $223,69 + 238,3 = 462,59$ minutos.
- El tiempo que las remachadoras manuales están en uso es de $83,59 + 78,15 = 161,74$ minutos.
- Sabiendo que me la media de tiempo de trabajo de ambos operarios es de 539,68 minutos, se concluye que la carga de trabajo de un operario tiene la siguiente proporción aproximada:
 - Un 43% del tiempo realizará operaciones de taladrado.
 - Un 15% del tiempo realizará operaciones de remachado.
 - El tiempo restante, 42% del tiempo, realizará operaciones de transporte, posicionamiento o accionamiento de la maquinaria (estructuras móviles, plataforma elevadora o puente grúa).

La estructura móvil izquierda tiene un mayor tiempo de actividad en comparación con la derecha debido a que el posicionamiento del revestimiento inferior es más elevado que el superior.

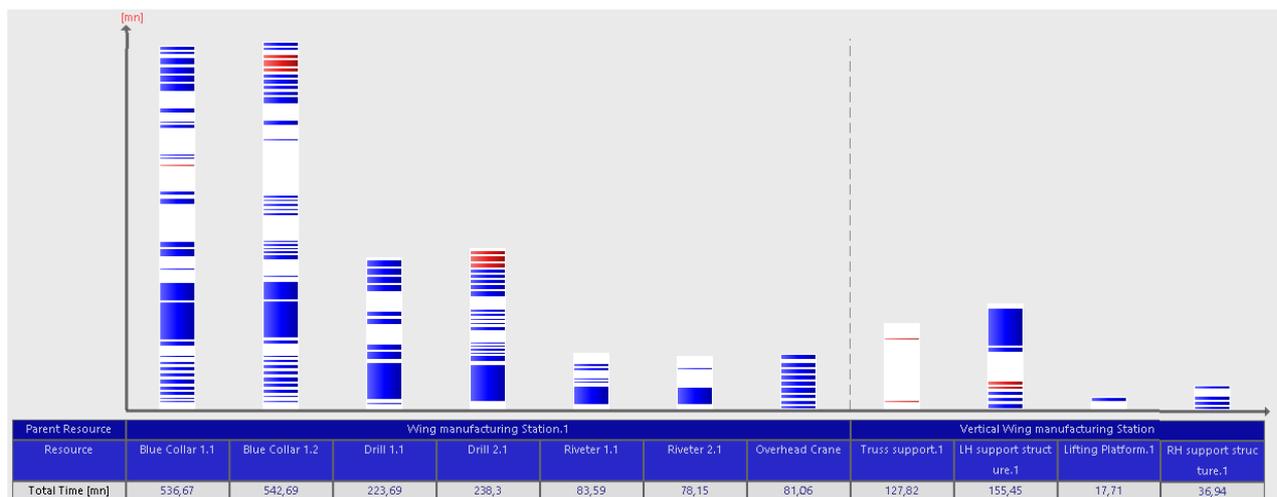


Figura 6-6. *Workload Balancing* de los recursos de la Estación Vertical (Fase I)

En cuanto a los recursos de la Estación Horizontal, representados en el *Resource Balancing* de la Figura 6-7, se puede apreciar las siguientes conclusiones:

- Los operarios tienen una menor carga de trabajo, a pesar de que la duración y tiempos que se desarrollan en esta estación son más elevados que en la Vertical, como se puede ver en la Figura 6-5. Esto es debido a que parte del trabajo está automatizado por el sistema de taladrado automático por Control Numérico, el cual tiene una ocupación de 271 minutos por cada larguero, de los que 241 minutos no requieren de un operario asignado.
- El tiempo de taladrado manual es de 128,30 minutos y el de remachado 443,40 minutos. Suponiendo

que cada operario trabaja de media 410,71 minutos:

- Un 54% del tiempo asignado estará realizando operaciones de remachado.
- Un 17% del tiempo será dedicado a operaciones de taladrado manual.
- El resto del tiempo restante que estará activo será un 29% y realizará operaciones compartidas con el otro operario como pueden ser las de posicionamiento o de preparación del sistema de taladrado.

Como el tiempo total del sistema es de 581,61 minutos, como se ve en el diagrama de la Figura 6-5 y la carga de trabajo media que tiene cada operario es de 410,71 min, significa que se tendrán 170,9 min en los que los operarios no tendrán carga de trabajo asignada (un 29% del total de la duración del sistema). Durante este tiempo, se pueden realizar tareas de mantenimiento, control de calidad o supervisión, las cuales no están incluidas en el modelo.

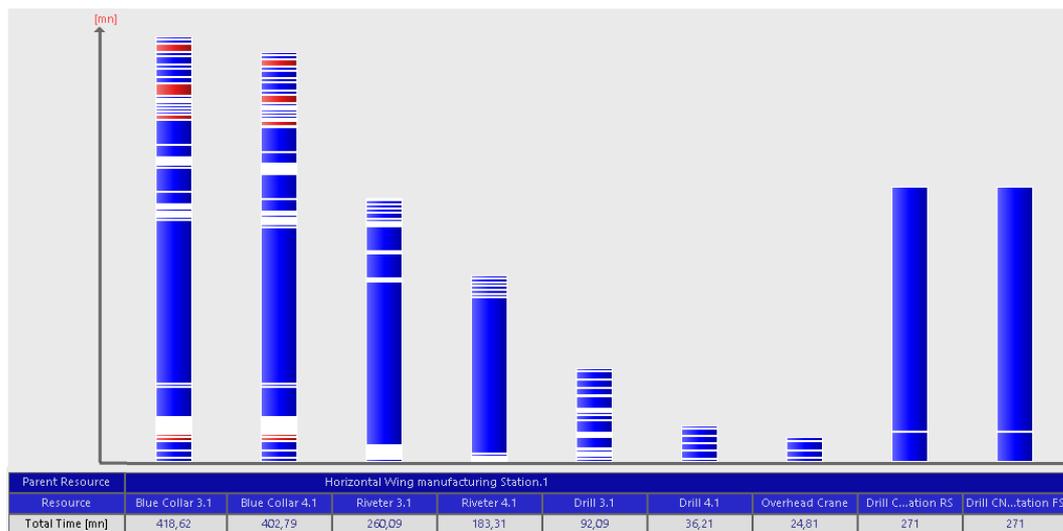


Figura 6-7. *Workload Balancing* de los recursos de la Estación Horizontal (Fase II y III)

6.3 Planteamiento de posibles escenarios de producción

A continuación se plantearán posibles escenarios que se pueden dar en el caso de la demanda del cajón alar, donde se requerirá que se realicen ajustes en el modelo o en las variables de entrada para alcanzar una solución óptima en cada caso.

6.3.1 Escenario de alta demanda: máximo rate de producción

En este escenario se plantea una situación en la que es necesario aumentar la capacidad productiva de la fábrica y sus estaciones para cumplir con la demanda que se tiene. Debido a esto, se debe conseguir un rate de producción maximizado, pero cumpliendo con la restricción de que la fábrica no puede albergar más gradas Verticales y Horizontales que las que ya se tienen.

En este caso, la única posibilidad de aumentar el rate es reduciendo los tiempos de producción totales o bien, siendo más eficientes en las operaciones, o bien, llevando a cabo más tareas de forma simultánea. Para que se pueda seguir la línea productiva entre la Estación Vertical y la Estación Horizontal, sin que existan cuellos de botella, se debe de cumplir que ambas mantengan una duración similar de los procesos que realizan.

Para buscar una posible solución a lo planteado en este escenario, se puede partir de las conclusiones e información de la 6.1 y plantear posibles opciones que tienen un gran impacto en el resultado:

- En el caso de la Fase I: según se puede ver en la Figura 6-2, los sistemas con un tiempo de producción

y duración más elevados son:

- Posicionamiento del revestimiento inferior, siendo la parte correspondiente al taladrado de los paneles y los brackets entre sí:

Duración: ~ 114 min / Tiempo de trabajo: ~ 141 min

- Taladrado de las covers a los revestimientos:

Duración: ~ 67 min / Tiempo de trabajo: ~ 132 min

En ambos sistemas se llevan a cabo operaciones sobre los revestimientos que no requieren de otras partes del cajón alar para realizarse, como puede ser el caso del taladrado del revestimiento a las costillas o a los largueros, donde es necesario disponer de estas partes también. Además, estas operaciones se pueden realizar en un momento temporal diferente al que se plantea en el modelo.

Esto significa que dichas operaciones pueden ser separadas de la Estación Vertical y realizadas de forma separada o en paralelo a las operaciones que en esta estación se realizan, por lo que, si esto se consigue, se podría reducir el tiempo total de la Fase I. Para llevarlo a cabo, se pueden plantear las siguientes opciones:

- Realizar la operación en otro centro de producción: con esto se conseguiría que los revestimientos llegasen a la Estación Vertical en un estado de terminación mayor. Se tendría que realizar el taladrado de las covers y handholes, así como el taladrado y remachado de los paneles interiores y el central junto con sus brackets. La opción de conseguir esto es pedir que este paquete de trabajo lo realizase el centro que ha producido los paneles (que puede haber sido un centro interno de la empresa o un proveedor), o bien, un subcontratista. Esto implicaría un cambio en el coste del producto que tendría que ser analizado.
- Realizar la operación fuera de la Estación Vertical: es decir, en una etapa previa o en paralelo. Si se dispone de una zona o grada auxiliar donde realizar estas operaciones, podrían ser llevadas a cabo sin impactar al tiempo de la Fase I. Esto requeriría sin duda, un aumento de recursos, tanto de operarios como de utillaje.

En caso de conseguir lo antes propuesto, el tiempo total de la Fase I se reduciría en la duración de estas operaciones, 181 min, por lo que el tiempo total sería de 371,6 min, en vez de 552,6 min, un 32% menos.

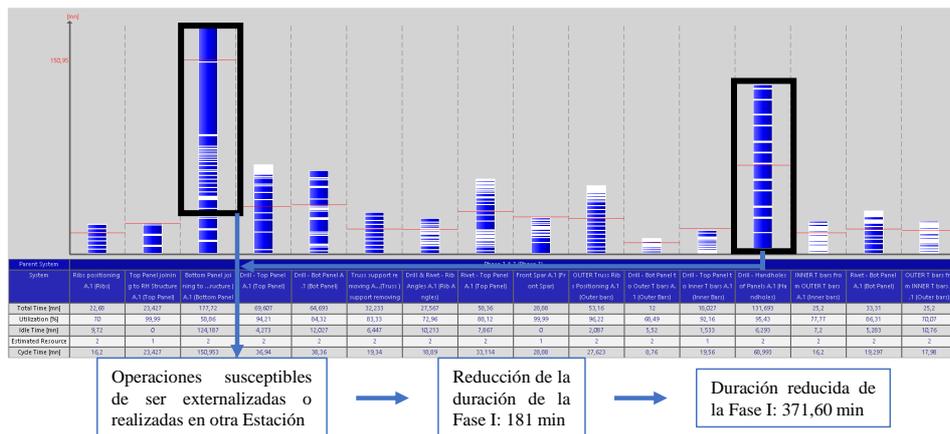


Figura 6-8. Reducción de tiempos en la Fase I en caso de máximo rate

- En el caso de la Fase II: existe menos opciones de externalizar o realizar las operaciones en otras estaciones diferentes a la Horizontal, por lo que se plantea el caso de reducir los tiempos de las operaciones, a costa de aumentar los recursos. Observando la Figura 6-3, destacan las operaciones de taladrado realizadas por el sistema de CN y las de remachado de los largueros realizadas por los operarios. Para llevar a cabo la reducción de los tiempos, se propone:
 - Aumentar los sistemas automáticos de taladrado: de uno por larguero, a dos por larguero, haciendo que ambos taladren medio larguero (uno recorrería desde el encastre hasta la mitad

del cajón, el otro al mismo tiempo taladraría desde la mitad del cajón a la punta del ala). Esto permitiría reducir el tiempo total a la mitad. Ver la Figura 5-8 para mayor detalle gráfico.

- Aumentar la cantidad de operarios que realizan el remachado o automatizar el proceso: en el caso de los operarios, se pasaría de dos a cuatro operarios remachando los largueros al mismo tiempo. Otra opción es incluir un sistema de remachado automático similar al de taladrado que permita realizar la operación en la mitad del tiempo.

Realizando estos cambios en las variables iniciales del modelo, los tiempos de la Fase II se reducirían 120,5 min para el taladrado y 80,3 min para el remachado (un 50% menos), por lo que dicha fase pasaría a tener una duración de 380,8 min, un 34% menos con respecto a los 581,6 min.

En la Tabla 3–1, se ha resumido los posibles cambios que serían posible realizar y el impacto que tendría en los tiempos totales del sistema, lo que permitiría aumentar el rate de producción entorno a un 33% a costa de aumentar los recursos. Se descarta el riesgo de que alguna de las estaciones se convierta en un cuello de botella crítico que ralente el proceso completo, puesto que los tiempos totales de ambas son más similares incluso que antes.

Tabla 6–2. Duración del proceso para el escenario de máximo rate

	Duración inicial	Duración reducida (max. rate)	Cambios en el modelo
Fase I	552,60 min	371,60 min	Externalizar las actividades o realizarlas en una estación auxiliar
Fase II	581,60 min	380,80 min	Aumento de los recursos: duplicar el sistema de taladrado y los operarios
Fase III	-	-	-
Total	1.212,23 min (20,20 h)	830,42 min (13,84 h)	

6.3.2 Escenario de baja demanda: reducción de capacidad productiva

En caso de que exista un escenario de baja demanda, en la que sea necesario reducir la capacidad productiva y no crear sobreproducción, a la vez que se asegura la viabilidad financiera de las operaciones, se deberá realizar una serie de ajustes en el modelo.

Uno de los ajustes más inmediatos es la reducción de recursos dedicados a esta actividad, siendo el que más impacto tiene, el número de operarios.

En el modelo planteado en este trabajo, se supuso que se tendría dos operarios por estación para realizar operaciones que así lo requieren, pero a su vez, para realizar varias tareas en paralelo y así reducir el tiempo total del sistema. En un escenario de este tipo, no será necesario realizar esto pero si optimizar los recursos, es por esto por lo que se plantea eliminar del modelo la realización de tareas en paralelo en el *Process Plan* del proceso.

Esto significaría que la duración total del sistema se incrementaría hasta igualarse al tiempo total de trabajo de este, excepto por el tiempo de taladrado de los largueros a los revestimientos, el cual se seguiría realizando de forma secuencial por el sistema de taladrado, tomando 241 min. El incremento de tiempo sería por tanto de 444,25min, significando un incremento del 27% de la duración total, mostrado en la Tabla 6–3.

Tabla 6–3. Duración del proceso para el escenario de baja demanda

	Duración inicial	Duración extendida (baja demanda)
Total	1.212,23 min (20,20 h)	1.656, 48 min (27,6 h)

7 CONCLUSIONES

*Your assumptions are your windows on the world.
Scrub them off every once in a while, or the light won't come in.*

Isaac Asimov

A continuación se detallarán las conclusiones más relevantes del trabajo a la vez que se resumen los objetivos cumplidos durante el desarrollo de este. Se incluirá además una reflexión sobre el proyecto y la plataforma 3DExperience, destacando la relevancia que esta tiene en la industria presente y futura gracias a las funcionalidades que la hacen destacar.

Por último, se listan una serie de propuestas de mejoras y continuaciones futuras que pueden ser llevadas a cabo utilizando el presente estudio como punto de partida.

7.1 Consecución de objetivos

Siendo el objetivo del proyecto definir y simular con 3DExperience la maqueta digital industrial para el ensamblaje de un ala de avión, se considera que se ha alcanzado y superado el mismo. Como prueba de ello se tiene en este documento los diferentes capítulos que documentan con un alto nivel de detalle la solución alcanzada.

Es relevante comentar que en el Capítulo 4, donde se describen las diferentes operaciones y los recursos necesarios para llevar a cabo el proceso, se ha conseguido ofrecer un detalle lo más elevado posible, haciendo uso de todas las funcionalidades que la herramienta 3DExperience ofrece para estas tareas en las aplicaciones *Process Planning* y *Equipment Allocation*. Como fruto de esto, se tiene un conjunto de sistemas y operaciones bastante completo, habiéndose aplicado una designación de cada tipo de operación lo más realista posible en base a la maqueta digital de la que se disponía.

Otro aspecto recalable del modelo realizado es la lógica seguida para definir los tiempos de cada una de las operaciones. Partiendo de la base en la que no se tenía ningún tipo de hipótesis o restricción sobre los mismos, se ha pretendido aplicar un racional que permitiese conseguir unos tiempos para cada tipo de operación lo más realistas posibles. Gracias a las acertadas estimaciones que se han utilizado, así como al empleo de las funciones que la herramienta *Time Analysis* ofrece, se ha podido conseguir lo propuesto, obteniéndose unos tiempos efectivos de trabajo que son realista y en línea con las hipótesis de partida que se definieron.

En cuanto a la validez y viabilidad de la solución alcanzada, queda comprobada gracias al análisis de trayectorias de operaciones y recursos que se ha realizado en el Capítulo 5, donde se descarta que se haya podido definir alguna operación no factible con el ensamblaje del conjunto, así como con los diferentes recursos que se emplean. Por otra parte, se utiliza este análisis de trayectorias para producir un vídeo descriptivo sobre el proceso, el cual se ofrece como soporte a lo detallado en este documento y que permite entender rápidamente la solución alcanzada.

Por último, se completa el modelo definido con un análisis de los resultados bastante detallado, que he permitido que se pueda entender la totalidad de la solución obtenida y detectar cuales son los procesos con una mayor carga de trabajo, así como los recursos en los que se requiere disponer de una mayor capacidad productiva. Para finalizar, se ha propuesto dos situaciones que se pueden dar en la industria y que están relacionadas con la demanda del producto fabricado, incluyéndose las modificaciones pertinentes en el modelo que darían lugar a una posible solución óptima para esas situaciones, lo que se puede llevar a cabo fácilmente gracias a la forma de funcionamiento de 3DExperience, la cual ofrece una alta flexibilidad y agilidad para realizar ajustes, cambios y versiones en los modelos.

7.2 Conclusiones sobre el proyecto y la herramienta

Ha sido una gran oportunidad haber podido realizar este proyecto principalmente por haber tenido la posibilidad de definir y simular un proceso industrial aeronáutico, lo que ha dado lugar a enfrentarse a retos y situaciones que se dan en una situación real, en la que partiendo de una serie de variables de entrada y un objetivo final, se requiere diseñar una solución válida que permita alcanzarlo de forma óptima.

Un punto interesante del proyecto ha sido el haberlo realizado utilizando la plataforma 3DEXperience, debido a que, aparte de haber sido enriquecedora y llevadera, ha permitido que desarrollare mis conocimientos en el campo del diseño y fabricación asistidos por ordenador, así como en el ámbito del diseño de procesos y planificación. Aun partiendo de un conocimiento alto de modelado en 3D gracias al uso de herramientas como CATIA V5, esta oportunidad ha hecho que mi conjunto de habilidades haya alcanzado un nivel superior y más completo, lo que es un punto interesante para mi desarrollo profesional.

Esto último se debe en gran parte a que, aun siendo la herramienta 3DEXperience un producto desarrollado hace años, es actualmente una apuesta de futuro para la industria, en especial la aeronáutica. La mayoría de las empresas aún no tienen completamente implementada la herramienta 3DEXperience como evolución de las que Dassault Systèmes ofrecía anteriormente, como CATIA o DELMIA, pero ya tienen definido que el futuro está con esta novedosa plataforma.

Gracias a las principales características de 3DEXperience como son la de ser una solución única, conectada con un entorno en la nube, así como que permite la colaboración entre diferentes usuarios o entidades, la convierten en una opción más que viable para los retos que las industrias y la economía se enfrentan hoy día o en un futuro próximo, como pueden ser los que definen la Industria 4.0. Esta nueva revolución requiere de técnicas avanzadas de producción y operaciones tecnológicas inteligentes que se integren digitalmente en las organizaciones, personas y activos.

De la mano de la Industria 4.0, existe también el auge de la economía de servicios, así como la tendencia a una larga cadena de suministro y deslocalizada. Es por esto por lo que 3DEXperience representa una solución para estos retos, permitiendo incrementar la conectividad y transparencia entre diseñadores, ingenieros, fabricantes, proveedores y clientes, a la vez que brinda a sus usuarios una experiencia completa, accesible y funcional con una rápida adaptabilidad.

7.3 Propuestas de mejora y continuaciones futuras

El alcance del presente estudio es extendido, pero aun así da lugar a futuros desarrollos o continuaciones que pueden ser interesantes. Es por esto por lo que se ha querido sugerir a modo de propuestas de mejora y continuaciones futuras una serie de casos:

- Completar la maqueta industrial y el proceso de ensamblaje con las partes restantes del ala, como pueden ser los sistemas eléctricos e hidráulicos de dentro del cajón, así como los últimos elementos estructurales y mandos de control de esta.
- Desarrollar de forma colaborativa la simulación completa del proceso de ensamblaje del avión en su totalidad.
- Desarrollar los escenarios planteados en el apartado 6.3, incluyendo análisis de viabilidad económica, así como estudios del tipo *Make/Buy* para decidir si es posible y beneficioso subcontratar o externalizar una serie de paquetes de trabajo del proceso de ensamblaje.
- Incluir en las operaciones consideradas en el modelo de este trabajo el resto de las operaciones industriales como pueden ser: operaciones de verificación y de control de calidad, aplicación de elementos sellantes o químicos, así como otros procesos que se puedan dar durante la fabricación.
- Realizar un análisis y diseño detallado del layout de las estaciones y zonas de abastecimiento y almacenaje con la aplicación *Process Flow Simulation*.
- Producir las órdenes de trabajo del proceso mediante la herramienta *Work Instructions*.
- Ampliar el presente modelo con estudios sobre la ergonomía de las operaciones realizadas.

REFERENCIAS

- [1] R. Nogales Del Valle, «Definición con 3DExperience de la secuencia de montaje del cajón del ala de una aeronave», Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, 2020.
- [2] J. Rendón Rodríguez de Molina, «Definición y simulación con 3DExperience de la maqueta digital industrial para el ensamblaje del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R», Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, 2021.
- [3] S. Benasuly Labuz, «Ustillaje de montaje», ETSI & COIAE, Universidad de Sevilla, 2017.
- [4] Altran, «Informe Técnico de Activides. Smart Robotics», 2019.
- [5] D. Systèmes, «3ds/history», <https://www.3ds.com/about-3ds/what-we-are/history> [último acceso: 30/11/2021].
- [6] D. Systèmes, «3DExperience», <https://www.3ds.com/3dexperience> [último acceso: 30/11/2021].
- [7] Cenit, «3DEXPERIENCE Platform for Digital Continuity of Product Lifecycle Management (PLM)», https://www.cenit.com/en_EN/products-solutions/plm/dassault-systemes/plm-software/3dexperience.html [último acceso: 30/11/2021].
- [8] D. Systèmes, «3DExperience/marketplace», <https://www.3ds.com/3dexperience/marketplace> [último acceso: 30/11/2021].
- [9] 3DEXPERIENCE, «Edu SPACE Platform», <https://edu.3ds.com/> [último acceso: 30/11/2021].
- [10] Dassault Systèmes, «Asistencia al usuario R2021x. Process Engineering», <https://help.3ds.com/2021x/Spanish/DSDoc/FrontmatterMap/dsdoc-r-del-processeng.htm?ContextScope=cloud&id=76778540d9784285ada26caedbd2069f> [último acceso: 30/11/2021].
- [11] PortalAereo.com, «Remachado de un ala de avión», <https://youtu.be/CYbxaahD5TI> [último acceso: 30/11/2021].
- [12] Mediateca EducaMadrid, «Remachadora neumática de remaches rígidos», <https://mediateca.educa.madrid.org/imagen/wpdhx4gsiu28dh19> [último acceso: 30/11/2021].
- [13] Electricidad Baranda, «Puentes grúa», <https://www.electricidadbaranda.com/gama-de-productos-y-servicios/puentes-gr%C3%BAa/> [último acceso: 30/11/2021].
- [14] DirectionUK, «Wing Construction», <https://youtu.be/60CmDTly8Dg> [último acceso: 30/11/2021].
- [15] InventingTheWorld, «Planes - Wing Assembly», <https://youtu.be/qbBhg8xISug> [último acceso: 30/11/2021].