

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Aeronáutica

Definición y simulación con 3DExperience de la maqueta digital industrial para el ensamblaje del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R

Autor: Javier Rendón Rodríguez de Molina

Tutores: Domingo Morales Palma

María Gloria del Río Cidoncha

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Dpto. Ingeniería Gráfica
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Aeronáutica

Definición y simulación con 3DExperience de la maqueta digital industrial para el ensamblaje del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R

Autor:

Javier Rendón Rodríguez de Molina

Tutores:

Domingo Morales Palma - Profesor Contratado Doctor

María Gloria del Río Cidoncha - Profesora Titular

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación

Dpto. Ingeniería Gráfica

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 del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R

Autor: Javier Rendón Rodríguez de Molina

Tutores: Domingo Morales Palma
María Gloria del Río Cidoncha

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto 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 todo el que me ayudó a llegar
aún más lejos*

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutores Domingo Morales Palma y María Gloria del Río Cidoncha por la oportunidad que me han brindado de realizar el presente trabajo, siendo mi objetivo el comprender y utilizar la plataforma 3DExperience desde el momento en que finalicé mi anterior Trabajo Fin de Grado, experimentando el salto tecnológico existente entre el, un poco obsoleto pero no por ello menos útil ni eficiente software CATIA V5, a la innovadora y colaborativa plataforma 3DExperience.

Asimismo, señalar que ello no hubiese sido posible sin la inestimable generosidad del tutor Domingo Morales al cedermne el uso en remoto de un potente equipo situado en las instalaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, con el software 3DExperience instalado y disponible en todo momento, ya que las necesidades en capacidad gráfica y de computación que el desempeño del proyecto requiere excedían las que mi ordenador personal era capaz de ofrecer.

Al igual que se hizo en el Trabajo Fin de Grado, del que el presente trabajo puede considerarse una continuación, me gustaría mostrar de nuevo mi agradecimiento al Instituto Tecnológico Superior ADA, sin ayuda del cual no hubiese sido factible la realización ni del anterior Trabajo Fin de Grado ni del presente Trabajo Fin de Máster. En las personas de su director D. Javier Fernández Montes y del profesor del mismo, D. José Antonio Rodríguez que, de una manera espléndida, pusieron a mi disposición todos los medios necesarios durante los meses que duró la toma de medidas del despiece del motor y esas facilidades que me han brindado han convertido la frecuentemente tediosa etapa de modelado en un periodo disfrutado y agradable, pudiendo trabajar con un motor aeronáutico en Sevilla, con el añadido extraordinario de la ayuda de los alumnos de taller, a cuyo trabajo de desmontaje debo el haber podido medir en detalle las piezas internas del mismo. Gracias a todos.

Resumen

La implementación y posterior aplicación práctica de la innovadora plataforma colaborativa 3DExperience en la definición y simulación de la maqueta digital industrial para el ensamblaje del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R, puede resultar de enorme interés por la facilidad de visualización y comprensión del proceso que ofrece, pudiendo gestionar mediante ingeniería concurrente el complicado proceso que supone el ensamblaje de un motor aeronáutico y ofrecer simulaciones del proceso de alto valor académico e industrial.

En el presente Trabajo de Fin de Máster se continuará el anterior trabajo de mi propia autoría ‘Modelado del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R mediante CATIA V5’, experimentando el salto tecnológico existente entre la plataforma en la que el modelo fue generado y la actual plataforma 3DExperience.

En este se incluirá, a modo de guía; una breve investigación tanto histórica como tecnológica acerca del motor y el software 3DExperience empleado, una posterior descripción y definición del proceso de ensamblaje del motor con las etapas que este proceso conlleva y la recreación del proceso mediante simulaciones con la mayor exactitud posible.

Abstract

The implementation and subsequent practical application of the innovative collaborative platform 3DExperience in the definition and simulation of the industrial digital model for the assembly of the Garrett TPE 331-10R turboprop engine can be of great interest due to the ease of visualization and understanding of the process it offers, being able to manage through concurrent engineering, the complicated process involved in the assembly of an aeronautical engine and offer simulations of the process of high academic and industrial value.

In this Master's Thesis, my previous work 'Modelado del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R mediante CATIA V5' will be continued, experiencing the technological leap between the platform on which the model was generated and the current 3DExperience platform.

This work will include, as a guide; a brief historical and technological investigation about the engine and the 3DExperience software used, a subsequent description and definition of the engine assembly process with the stages that this process entails and the recreation of the process through simulations with the greatest possible accuracy.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xix
Índice de Figuras	xxii
1 Introducción	1
1.1. <i>Objetivos</i>	1
1.2. <i>Motivación y utilidad</i>	2
1.3. <i>Antecedentes</i>	2
1.4. <i>Hipótesis de partida y simplificaciones relevantes</i>	3
1.5. <i>Estructura</i>	5
2 Motor Garrett TPE 331-10R	7
2.1 <i>Breve reseña histórica</i>	7
2.2 <i>Tipología del motor</i>	8
2.3 <i>Especificaciones técnicas</i>	9
2.4 <i>Listado de piezas (BOM) del modelo del motor</i>	11
3 Introducción a 3DExperience	17
3.1 <i>Breve reseña histórica</i>	18
3.2 <i>Plataforma colaborativa 3DExperience</i>	19
3.3 <i>Aplicaciones 3DExperience usadas en este trabajo</i>	20
3.3.1 <i>Manufactured Item Definition</i>	20
3.3.2 <i>Process Planning</i>	20
3.3.3 <i>Equipment Allocation</i>	21
3.3.4 <i>Assembly Evaluation</i>	22
3.3.5 <i>Herramientas secundarias de utilidad</i>	22
4 Listado de piezas de fabricación (MBOM) y secuencia de ensamblaje	25
4.1 <i>Aplicación “Manufactured Item Definition”</i>	25
4.2 <i>Tutoriales en la plataforma Eduspace</i>	27
4.3 <i>Definición del MBOM del motor</i>	29
4.3.1 <i>Instalación de la Segunda etapa del compresor</i>	35
4.3.2 <i>Instalación del Enlace de transición</i>	36
4.3.3 <i>Ensamblaje de la Primera etapa de rotor centrífugo del compresor</i>	36
4.3.4 <i>Instalación del Difusor y el conjunto rotativo parcialmente ensamblado</i>	37
4.3.5 <i>Instalación de la Cámara de combustión y el Anillo redirector de flujo</i>	37
4.3.6 <i>Ensamblaje de la Cubierta de la primera etapa de rotor de la turbina</i>	38
4.3.7 <i>Ensamblaje de la Primera etapa de estátor de la turbina</i>	38
4.3.8 <i>Ensamblaje de las Primeras etapas de la turbina</i>	39
4.3.9 <i>Instalación del Soporte de la turbina</i>	39
4.3.10 <i>Instalación de la Segunda etapa de estátor de la turbina</i>	40

4.3.11	Instalación de las Últimas etapas de la turbina	40
4.3.12	Instalación de Turbina y el <i>Plenum</i>	41
4.3.13	Instalación del Soporte del cojinete montado en el eje principal	41
4.3.14	Instalación de la segunda etapa del Compresor	42
4.3.15	Instalación de la Carcasa de la unidad de accesorios y Gearbox	42
4.3.16	Instalación del Soporte del cojinete delantero, el Cojinete del compresor y el Cierre	43
4.3.17	Instalación de la Tuerca del eje principal	44
4.3.18	Instalación del Conjunto de soporte del cojinete trasero	44
4.3.19	Ensamblado del Soporte del cojinete trasero	45
4.3.20	Instalación del Conjunto de soporte y el Cierre	45
4.3.21	Instalación de los Termopares	46
4.3.22	Instalación del Conjunto de tobera de salida	46
4.3.23	Instalación del Eje de torsión	47
4.3.24	Instalación del Eje acoplador y su engranaje	47
4.3.25	Ensamblado parcial del Mecanismo planetario	48
4.3.26	Instalación del conjunto de engranajes ' <i>Bull and Sun</i> ' en el diafragma	48
4.3.27	Instalación del Mecanismo planetario	49
4.3.28	Instalación del conjunto Diafragma	49
4.3.29	Ensamblaje del <i>Nose Cone</i> o morro.	50
4.3.30	Instalación del conjunto <i>Nose Cone</i> o morro	50
4.3.31	Instalación de la Bomba de recuperación de aceite	51
4.3.32	Instalación del Cono de cola	51
4.3.33	Ensamblaje del Conjunto de mangueras de combustible y sus Inyectores asociados	52
4.3.34	Instalación del Conjunto de mangueras de combustible y sus Inyectores asociados	52
5	Planificación del proceso de ensamblaje	55
5.1	<i>Aplicación "Process Planning"</i>	55
5.2	<i>Tutoriales en la plataforma Eduspace</i>	57
5.3	<i>Planificación del ensamblaje del motor</i>	59
5.3.1	Estación principal	64
5.3.2	Estación secundaria 1 [Eje]	71
5.3.3	Estación Secundaria 2 [Turbina]	72
5.3.4	Estación Secundaria 3 [Diafragma y <i>Nose Cone</i>]	73
5.3.5	Estación extra de Motor completo [Enviar a línea de empaquetado]	74
5.4	<i>Análisis de la carga de trabajo en las estaciones</i>	75
6	Recursos y distribución en planta	79
6.1	<i>Aplicación "Equipment Allocation"</i>	79
6.2	<i>Tutoriales en la plataforma Eduspace</i>	82
6.3	<i>Definición de recursos para el motor</i>	84
6.3.1	Taller de trabajo y estructuración del árbol de recursos	85
6.3.2	<i>Maintenance Stand Assembly</i> (Banco de trabajo de la Estación Principal)	88
6.3.3	<i>Rotating Assembly Holder</i> (Banco de trabajo de la Estación secundaria dedicada al Eje)	89
6.3.4	<i>Stairs</i> (Pequeña escalera)	89
6.3.5	<i>Bearing Press Holder Assembly</i> (Herramienta para apretar y ensamblar el cojinete trasero)	90
6.3.6	<i>Shaft Stetching Fixture</i> (Herramienta para apretar las tuercas del Eje principal)	90
6.3.7	Herramienta genérica <i>Retaining Ring Guide</i> (Guía de los cierres anulares)	91
6.3.8	Herramienta genérica <i>Torque Wrench</i> (Llave dinamométrica)	92
6.3.9	Herramienta genérica <i>ToolBox</i> (Caja de herramientas con cabezales y accesorios)	92
6.4	<i>Análisis de la carga de trabajo de los operarios</i>	94
7	Simulación y evaluación del ensamblaje	97
7.1	<i>Aplicación "Assembly Evaluation"</i>	97
7.2	<i>Tutoriales en la plataforma Eduspace</i>	99
7.3	<i>Simulación y evaluación de la línea de ensamblaje del Garrett TPE 331-10R</i>	101
7.3.1	Principal Station	102

7.3.2	Secondary Station 1 [Shaft]	103
7.3.3	Secondary Station 2 [Turbine]	103
7.3.4	Secondary Station 3 [Diaphragm and Nose Cone]	104
8	Conclusiones	107
8.1	<i>Opinión personal</i>	108
8.2	<i>Propuestas de mejora y continuación futuras</i>	108
	Referencias	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Desglose de los elementos del modelo y sus cantidades.	15
Tabla 4-1. Desglose de ‘ <i>Install Compressor Second Stage</i> ’ y sus cantidades.	35
Tabla 4-2. Desglose de ‘ <i>Install Transition Liner</i> ’ y sus cantidades.	36
Tabla 4-3. Desglose de ‘ <i>Assemble First Stage Compressor Impeller</i> ’ y sus cantidades.	36
Tabla 4-4. Desglose de ‘ <i>Install Diffuser and Partially Assembled Rotating Group</i> ’ y sus cantidades.	37
Tabla 4-5. Desglose de ‘ <i>Install Combustion Chamber and Flow Director</i> ’ y sus cantidades.	37
Tabla 4-6. Desglose de ‘ <i>Assemble First Stage Turbine Wheel Shroud</i> ’ y sus cantidades.	38
Tabla 4-7. Desglose de ‘ <i>Assemble First Stage Turbine Stator</i> ’ y sus cantidades.	38
Tabla 4-8. Desglose de ‘ <i>Assemble Turbine First Stage</i> ’ y sus cantidades.	39
Tabla 4-9. Desglose de ‘ <i>Install Turbine Support</i> ’ y sus cantidades.	39
Tabla 4-10. Desglose de ‘ <i>Install Second Stage Turbine Stator</i> ’ y sus cantidades.	40
Tabla 4-11. Desglose de ‘ <i>Install Turbine Last Stages</i> ’ y sus cantidades.	40
Tabla 4-12. Desglose de ‘ <i>Install Turbine and Turbine Plenum</i> ’ y sus cantidades.	41
Tabla 4-13. Desglose de ‘ <i>Install Main Shaft Mounted Bearing Support</i> ’ y sus cantidades.	41
Tabla 4-14. Desglose de ‘ <i>Install First Stage Compressor Impeller Shroud</i> ’ y sus cantidades.	42
Tabla 4-15. Desglose de ‘ <i>Install Accessory Drive Housing</i> ’ y sus cantidades.	43
Tabla 4-16. Desglose de ‘ <i>Install Bearing Carrier, Compressor Bearing and Retainer</i> ’ y sus cantidades.	43
Tabla 4-17. Desglose de ‘ <i>Install Main Shaft Nut</i> ’ y sus cantidades.	44
Tabla 4-18. Desglose de ‘ <i>Install Turbine Bearing Support Assembly</i> ’ y sus cantidades.	44
Tabla 4-19. Desglose de ‘ <i>Assemble Bearing Carrier</i> ’ y sus cantidades.	45
Tabla 4-20. Desglose de ‘ <i>Install Support Assembly and Retainer</i> ’ y sus cantidades.	45
Tabla 4-21. Desglose de ‘ <i>Install Temperature Sensor</i> ’ y sus cantidades.	46
Tabla 4-22. Desglose de ‘ <i>Install Exhaust Pipe Assembly</i> ’ y sus cantidades.	46
Tabla 4-23. Desglose de ‘ <i>Install Torsion Shaft</i> ’ y sus cantidades.	47
Tabla 4-24. Desglose de ‘ <i>Install Coupling Shaft and Gear</i> ’ y sus cantidades.	47
Tabla 4-25. Desglose de ‘ <i>Assemble Planet Carrier and Gear Assembly</i> ’ y sus cantidades.	48
Tabla 4-26. Desglose de ‘ <i>Install Bull and Sun Gear Assembly</i> ’ y sus cantidades.	48
Tabla 4-27. Desglose de ‘ <i>Install Planet Carrier and Gear Assembly</i> ’ y sus cantidades.	49
Tabla 4-28. Desglose de ‘ <i>Install Diaphragm Assembly</i> ’ y sus cantidades.	49
Tabla 4-29. Desglose de ‘ <i>Assemble Nose Cone</i> ’ y sus cantidades.	50
Tabla 4-30. Desglose de ‘ <i>Install Nose Cone Assembly</i> ’ y sus cantidades.	50
Tabla 4-31. Desglose de ‘ <i>Install Turbine Scavenge Pump and Spur Gearshaft</i> ’ y sus cantidades.	51
Tabla 4-32. Desglose de ‘ <i>Install Tail Cone</i> ’ y sus cantidades.	51

Tabla 4-33. Desglose de ‘ <i>Assemble Fuel Manifolds and Nozzles</i> ’ y sus cantidades.	52
Tabla 4-34. Desglose de ‘ <i>Install Fuel Manifold and Nozzle Assembly</i> ’ y sus cantidades.	52
Tabla 5-1. Tabla resumen del sistema completo.	64
Tabla 5-2. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Principal Station: Phase I</i> ’.	65
Tabla 5-3. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Principal Station: Phase II</i> ’.	65
Tabla 5-4. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Principal Station: Phase III</i> ’.	66
Tabla 5-5. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Principal Station: Phase IV</i> ’.	67
Tabla 5-6. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Principal Station: Phase V</i> ’.	68
Tabla 5-7. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Principal Station: Phase VI</i> ’.	69
Tabla 5-8. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Principal Station: Phase VII</i> ’.	70
Tabla 5-9. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Secondary Station 1 [Shaft]</i> ’.	71
Tabla 5-10. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Secondary Station 2 [Turbine]</i> ’.	72
Tabla 5-11. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Substation A [Diaphragm 1]</i> ’.	73
Tabla 5-12. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Substation B [Diaphragm 2]</i> ’.	73
Tabla 5-13. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Substation C [Nose Cone]</i> ’.	74
Tabla 5-14. Tabla resumen del sistema ‘ <i>Complete Engine [Send to Packing Line]</i> ’.	74
Tabla 6-1. Tipos de recursos que pueden definirse en la app <i>Equipment Allocation</i> [7].	80
Tabla 6-2. Resumen del recurso <i>Maintenance Stand Assembly</i> .	88
Tabla 6-3. Resumen del recurso <i>Rotating Assembly Holder</i> .	89
Tabla 6-4. Resumen del recurso <i>Stairs</i> .	90
Tabla 6-5. Resumen del recurso <i>Bearing Press Holder Assembly</i> .	90
Tabla 6-6. Resumen del recurso <i>Shaft Stetching Fixture</i> .	91
Tabla 6-7. Resumen del recurso <i>Retaining Ring Guide</i> .	91
Tabla 6-8. Resumen del recurso <i>Torque Wrench</i> .	92
Tabla 6-9. Resumen del recurso <i>ToolBox</i> .	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Instalación para pruebas del TPE 331 [8].	8
Figura 2-2. Esquema general del motor.	8
Figura 2-3. Sección lateral del motor turbohélice TPE 331 [9].	9
Figura 2-4. Tabla de datos técnicos (Izquierda) y gráfico Potencia-Velocidad verdadera-Flujo de combustible a distintas alturas, ambos ofrecidos por la web del fabricante Honeywell [10].	10
Figura 2-5. Distribución espacial de las piezas modeladas en el conjunto Carcasa principal.	11
Figura 2-6. Distribución espacial de las piezas modeladas en el Conjunto de sujeción inicial.	11
Figura 2-7. Distribución espacial de las piezas modeladas en el Conjunto motor.	12
Figura 2-8. Distribución espacial de las piezas modeladas en el Conjunto de sujeción final.	12
Figura 3-1. Ciclo simplificado del producto en una aplicación CAD/CAM [11].	17
Figura 3-2. Logo del software CATIA [12].	18
Figura 3-3. Brújula de la plataforma 3DExperience e imagen representativa de la marca [13].	19
Figura 3-4. Icono de la aplicación <i>Manufactured Item Definition</i> .	20
Figura 3-5. Icono de la aplicación <i>Process Planning</i> .	21
Figura 3-6. Icono de la aplicación <i>Equipment Allocation</i> .	21
Figura 3-7. Icono de la aplicación <i>Assembly Evaluation</i> .	22
Figura 3-8. Icono de los accesos a <i>3DEspace</i> y <i>3DDrive</i> , asignados en la sección de favoritos.	22
Figura 4-1. MBOM simplificado de una motocicleta y su tipología de objeto asociada [7].	25
Figura 4-2. Definición de vínculos entre los ítems del MBOM y el modelo [7].	26
Figura 4-3. Clasificación por colores del estado de asignación del producto mediante <i>B.I. Essentials</i> [7].	27
Figura 4-4. Casos prácticos propuestos ‘ <i>3.5HP_Engine</i> ’ (izquierda) y ‘ <i>Cordless_Drill</i> ’ (derecha).	28
Figura 4-5. Ejemplos de uso del comando <i>F5 List</i> (izquierda) y de creación y gestión de grupos (derecha).	28
Figura 4-6. Modelo del motor Garrett TPE 331-10R importado en la plataforma.	29
Figura 4-7. Uso de la herramienta 3D View para identificar la Cámara de combustión.	31
Figura 4-8. Vista de la estructura MBOM con todas las piezas individuales ocultas.	32
Figura 4-9. Estructura completa del MBOM definido (Parte superior).	33
Figura 4-10. Estructura completa del MBOM definido (Parte intermedia).	34
Figura 4-11. Estructura completa del MBOM definido (Parte inferior).	35
Figura 4-12. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Compressor Second Stage</i> ’.	35
Figura 4-13. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Transition Liner</i> ’.	36
Figura 4-14. Componentes del conjunto ‘ <i>Assemble First Stage Compressor Impeller</i> ’.	36

Figura 4-15. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Diffuser and Partially Assembled Rotating Group</i> ’.	37
Figura 4-16. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Combustion Chamber and Flow Director</i> ’.	37
Figura 4-17. Componentes del conjunto ‘ <i>Assemble First Stage Turbine Wheel Shroud</i> ’.	38
Figura 4-18. Componentes del conjunto ‘ <i>Assemble First Stage Turbine Stator</i> ’.	38
Figura 4-19. Componentes del conjunto ‘ <i>Assemble Turbine First Stages</i> ’.	39
Figura 4-20. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Turbine Support</i> ’.	39
Figura 4-21. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Second Stage Turbine Stator</i> ’.	40
Figura 4-22. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Turbine Last Stages</i> ’.	40
Figura 4-23. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Turbine and Turbine Plenum</i> ’.	41
Figura 4-24. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Main Shaft Mounted Bearing Support</i> ’.	41
Figura 4-25. Componentes del conjunto ‘ <i>Install First Stage Compressor Impeller Shroud</i> ’.	42
Figura 4-26. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Accessory Drive Housing</i> ’.	42
Figura 4-27. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Bearing Carrier, Compressor Bearing and Retainer</i> ’.	43
Figura 4-28. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Main Shaft Nut</i> ’.	44
Figura 4-29. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Turbine Bearing Support Assembly</i> ’.	44
Figura 4-30. Componentes del conjunto ‘ <i>Assemble Bearing Carrier</i> ’.	45
Figura 4-31. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Support Assembly and Retainer</i> ’.	45
Figura 4-32. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Temperature Sensor</i> ’.	46
Figura 4-33. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Exhaust Pipe Assembly</i> ’.	46
Figura 4-34. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Torsion Shaft</i> ’.	47
Figura 4-35. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Coupling Shaft and Gear</i> ’.	47
Figura 4-36. Componentes del conjunto ‘ <i>Assemble Planet Carrier and Gear Assembly</i> ’.	48
Figura 4-37. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Bull and Sun Gear Assembly</i> ’.	48
Figura 4-38. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Planet Carrier and Gear Assembly</i> ’.	49
Figura 4-39. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Diaphragm Assembly</i> ’.	49
Figura 4-40. Componentes del conjunto ‘ <i>Assemble Nose Cone</i> ’.	50
Figura 4-41. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Nose Cone Assembly</i> ’.	50
Figura 4-42. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Turbine Scavenge Pump and Spur Gearshaft</i> ’.	51
Figura 4-43. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Tail Cone</i> ’.	51
Figura 4-44. Componentes del conjunto ‘ <i>Assemble Fuel Manifolds and Nozzles</i> ’.	52
Figura 4-45. Componentes del conjunto ‘ <i>Install Fuel Manifold and Nozzle Assembly</i> ’.	52
Figura 4-46. Ejemplo de comprobación de que las piezas están asignadas a la estructura MBOM.	53
Figura 5-1. Segunda etapa del proyecto, correspondiente a la aplicación Process Planning [7].	55
Figura 5-2. Ejemplo de estructuración de un plan de fabricación [7].	56
Figura 5-3. Ejemplo <i>Cordless_Drill</i> con su sistema (izquierda) y su diagrama de Gantt asociado (derecha).	58
Figura 5-4. Balance de carga de trabajo de ejemplo (izquierda) y utilización del sistema (derecha).	58
Figura 5-5. Tipología de <i>layout</i> en función de la variedad y el volumen de producción [15].	59

Figura 5-6. Distribución de las operaciones en estaciones de trabajo mediante <i>General Systems</i> .	60
Figura 5-7 Distribución completa de las operaciones en estaciones de trabajo y fases.	61
Figura 5-8. Diagrama de Gantt del proceso total	63
Figura 5-9. Operaciones del sistema ' <i>Principal Station: Phase I</i> '.	64
Figura 5-10. Operaciones del sistema ' <i>Principal Station: Phase II</i> '.	65
Figura 5-11. Operaciones del sistema ' <i>Principal Station: Phase III</i> '.	66
Figura 5-12. Operaciones del sistema ' <i>Principal Station: Phase IV</i> '.	67
Figura 5-13. Operaciones del sistema ' <i>Principal Station: Phase V</i> '.	68
Figura 5-14. Operaciones del sistema ' <i>Principal Station: Phase VI</i> '.	69
Figura 5-15. Operaciones del sistema ' <i>Principal Station: Phase VII</i> '.	70
Figura 5-16. Operaciones del sistema ' <i>Secondary Station 1 [Shaft]</i> '.	71
Figura 5-17. Operaciones del sistema ' <i>Secondary Station 2 [Turbine]</i> '.	72
Figura 5-18. Operaciones del sistema ' <i>Substation A [Diaphragm 1]</i> '.	73
Figura 5-19. Operaciones del sistema ' <i>Substation B [Diaphragm 2]</i> '.	73
Figura 5-20. Operaciones del sistema ' <i>Substation C [Nose Cone]</i> '.	74
Figura 5-21. Operaciones del sistema ' <i>Complete Engine [Send to Packing Line]</i> '.	74
Figura 5-22. Comprobación mediante <i>B. I. Essentials</i> de que las asignaciones están actualizadas.	75
Figura 5-23. Carga de trabajo de todos los sistemas definidos.	76
Figura 5-24. Carga de trabajo de <i>Principal Station</i> y sus distintas Fases.	76
Figura 5-25. Carga de trabajo de <i>Secondary Station 1 [Shaft]</i> (izquierda) y <i>Secondary Station 2 [Turbine]</i> (derecha).	77
Figura 5-26. Carga de trabajo de <i>Secondary Station 3 [Diaphragm and Nose Cone]</i> .	77
Figura 6-1. Imagen explicativa de la utilidad de los recursos en <i>Equipment Allocation</i> [7].	79
Figura 6-2. Ejemplo de estructuración de un plan de fabricación [7].	81
Figura 6-3. Tutorial de ejemplo para la definición de recursos, vinculación y posicionamiento.	82
Figura 6-4. Chequeo de la utilización de cada recurso mediante <i>B. I. Essentials</i> .	83
Figura 6-5. Opciones directas de simulación.	83
Figura 6-6. Taller y recursos totales definidos para el desarrollo de las operaciones.	85
Figura 6-7. Estación principal.	86
Figura 6-8. Estación secundaria 1 [Eje].	86
Figura 6-9. Estación secundaria 2 [Turbina].	87
Figura 6-10. Estación secundaria 3 [Diafragma y <i>Nose Cone</i>].	87
Figura 6-11. Comparación de los agarres en vista simplificada (izquierda) y modelo generado (derecha).	88
Figura 6-12. Comparación del soporte simplificado (izquierda) y modelo <i>Maintenance Stand Assembly</i> generado con los agarres ensamblados (derecha)	88
Figura 6-13. Comparación del <i>Rotating Assembly Holder</i> simplificado (izquierda) y modelo generado (derecha)	89
Figura 6-14. Modelo generado <i>Stairs</i> .	89
Figura 6-15. Comparación del <i>Bearing Press Holder Assembly</i> simplificado (izquierda) y modelo generado (derecha)	90

Figura 6-16. Comparación del <i>Shaft Stetching Fixture</i> simplificado (izquierda) y modelo generado (derecha)	91
Figura 6-17. Comparación del <i>Retaining Ring Guide</i> simplificado (izquierda) y modelo generado (derecha)	91
Figura 6-18. Modelo de la herramienta <i>Torque Wrench</i> importado de [18].	92
Figura 6-19. Modelo de la herramienta <i>ToolBox</i> importado de [19].	92
Figura 6-20. Uso de las herramientas <i>B. I. Essentials</i> (izquierda) y <i>Relations</i> (derecha).	93
Figura 6-21. Realización de simulaciones en la app <i>Equipment Allocation</i> .	93
Figura 6-22. Carga de trabajo de cada uno de los operarios.	94
Figura 7-1. Imagen explicativa de la utilidad de la aplicación <i>Assembly Evaluation</i> [7].	98
Figura 7-2. Tutorial de ejemplo para la definición de una simulación (izquierda) y las trayectorias asociadas a cada una de las operaciones de montaje (derecha).	99
Figura 7-3. Caso práctico de la operación <i>Swept Volume</i> aplicado sobre un pequeño motor (derecha), obteniendo el resultado mostrado a la izquierda para un desplazamiento vertical del mismo.	100
Figura 7-4. Caso práctico de detección de inclusiones mediante <i>Dynamic Clash Probe</i> .	100
Figura 7-5. Vista general de todas las trayectorias definidas en la factoría.	101
Figura 7-6. Trayectorias definidas en la <i>Principal Station</i> .	102
Figura 7-7. Trayectorias definidas en la <i>Secondary Station 1 [Shaft]</i> .	103
Figura 7-8. Trayectorias definidas en la <i>Secondary Station 2 [Turbine]</i> .	103
Figura 7-9. Trayectorias definidas en la <i>Secondary Station 3 [Diaphragm and Nose Cone]</i> .	104
Figura 7-10. Distintas opciones con las que configurar las simulaciones	104
Figura 7-11. Capturas realizadas en distintos instantes de simulación de las distintas estaciones.	105

1 INTRODUCCIÓN

Es un hecho que la tecnología en el ámbito de la fabricación avanza y que los softwares de diseño y fabricación asistidos por ordenador buscan ser cada vez más completos, apuntando la tendencia que estos muestran hacia plataformas colaborativas, multidisciplinares e intuitivas en las que se practica la denominada ingeniería concurrente.

Esta tendencia viene motivada por la facilidades que este tipo de plataformas pone a disposición del usuario, ofreciéndole la capacidad de definir un sistema completo de fabricación en el que incluir cada vez más etapas de distinto ámbito, pudiendo observar la interrelación de todas ellas y las consecuencias que la modificación de un elemento pueda ocasionar sobre los demás, pudiendo finalmente extraer una serie de análisis del sistema, en la búsqueda de un proceso optimizado con el que ahorrar tiempo, recursos y por ende generar los máximos beneficios posibles.

En la actualidad 3DExperience se ha convertido en el máximo referente de este tipo de plataformas, siendo capaz de ofrecer casi ilimitadas posibilidades y ofreciendo al usuario, en el caso concreto del presente proyecto, la capacidad de observar, comprender e incluso instruirse en el complicado proceso de ensamblaje del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R.

1.1. Objetivos

Contemplando esta idea, el objetivo principal del presente Trabajo Fin de Máster es la definición y simulación de la maqueta digital industrial para el ensamblaje del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R mediante el novedoso software 3DExperience.

Con este objetivo se realizará un modelado iterativo del proceso, haciendo uso de las distintas herramientas que la plataforma 3DExperience ofrece, estando cada una de ellas asociada a objetivo en particular. Algunas de estas han sido:

- Definir la estructura de montaje y su MBOM asociado mediante *Manufactured Item Definition*.
- Secuenciar y dividir el montaje en distintas fases y/o estaciones de montaje haciendo uso de *Process Planning*.
- Definir los recursos necesarios para desempeñar correctamente el proceso, distribuir las operaciones espacialmente en la planta de montaje y realizar la asignación de las mismas a los distintos recursos definidos haciendo uso de *Equipment Allocation*.
- Generar trayectorias asociadas a las distintas operaciones, de cara la verificación de la viabilidad del proceso de ensamblaje y a una posterior simulación del mismo, mediante *Assembly Evaluation*.

Para ello se empleará el modelo de dicho motor generado en ‘Modelado del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R mediante CATIA V5’ [1], realizado también por el autor del presente trabajo. Dicho modelo está centrado en la turbomáquina, habiéndose modelado la *Gearbox* o Caja de engranajes reductora de forma simplificada y con finalidad puramente académica y de representación visual de la transmisión del movimiento entre ejes.

En cuanto al proceso de montaje que se pretende simular, este está basado en el montaje tras *Overhaul* o Revisión general descrito en el ‘Manual de Revisión general TPE 331-5-252C’ [2] por lo que se recomienda acudir al documento para comprender mejor el objetivo o justificación de las distintas operaciones generadas en el presente trabajo.

Por lo tanto, previo al modelado y simulación del proceso de montaje, se va a realizar una investigación tanto del motor como del manual y secuencia de operaciones, al objeto de contextualizar y comprender la secuencia de montaje, de forma que esta termine siendo lo más fiel posible a la real.

1.2. Motivación y utilidad

El presente proyecto, al igual que el anteriormente realizado como Trabajo Fin de Grado ‘Modelado del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R mediante CATIA V5’ [1] viene motivado por el interés y la curiosidad que he tenido siempre por los motores de aeronaves y por la explicación de su funcionamiento, así como por la tendencia cada vez mayor de utilizar plataformas colaborativas como es 3DExperience.

Este interés viene nuevamente secundado por la facilidad de uso que encuentro en los softwares de diseño y fabricación como pueden ser CATIA o DELMIA, así como el autoaprendizaje que mantengo de los mismos desde que cursé la asignatura *Diseño y Fabricación asistidos por Ordenador* en mis estudios de grado.

El presente Trabajo Fin de Máster puede considerarse por lo tanto una continuación del anteriormente citado Trabajo Fin de Grado. O más bien una evolución del mismo, ya que se ha empleado el modelo generado en la un poco obsoleta, aunque no por ello menos efectiva, herramienta CATIA V5R19 en la moderna e innovadora plataforma 3DExperience y la multitud de herramientas que esta ofrece.

Es por ello que se harán continuas alusiones al citado trabajo previo de mi propia autoría, incluyéndose en la presente memoria algunas explicaciones realizadas en el mismo para facilitar la comprensión al lector e intentar que este documento sea autocontenido, sin este tener que consultar continuamente y de forma paralela ambos documentos.

En cuanto a la utilidad del presente trabajo, se pretende que este sirva de modelo para comprender el proceso de montaje de motores aeronáuticos, en concreto del motor Garrett TPE 331-10R, de forma que se pueda visualizar, comprender y analizar el citado proceso.

De la misma forma, se espera que el presente proyecto sirva para ejemplificar la gran utilidad que tiene la plataforma 3DExperience y sus herramientas integradas en el ámbito del diseño y la planificación aeronáutica al más alto nivel.

Finalmente, se persigue la adquisición de conocimientos y un continuo aprendizaje personal acerca de la plataforma 3DExperience, dada su utilidad y gran aceptación en el ámbito laboral aeronáutico al que pretendo dedicarme en un futuro cercano.

1.3. Antecedentes

Al comienzo de la realización del presente trabajo, se ha realizado una búsqueda de información acerca de los proyectos similares que se han realizado previamente. Esto se ha realizado con el objetivo de comprender el alcance de las herramientas que se pretendían utilizar, así como de realizar un correcto enfoque y estructuración, tanto del modelado como de la presente memoria.

Algunos de estos proyectos académicos anteriores que se han consultado, enfocados también al ámbito aeronáutico han sido ‘Planificación con 3DExperience del proceso de ensamblaje de las compuertas del tren de aterrizaje del Airbus A380’ [3] de Guillermo Álvarez Murcia, ‘Definición con 3DExperience de la

secuencia de montaje del cajón del ala de una aeronave' [4] cuya autora es Rosario Nogales Valle o 'Modelado y simulación con 3DExperience del proceso de montaje del tren de aterrizaje del Airbus A380' [5] de Santiago Serrano Aranda, entre otros.

De ellos se ha extraído una visión general del proceso a seguir, así como una comprensión de posibles soluciones a problemas que les fueron surgiendo a los distintos autores. Esto ha permitido en algunas ocasiones un ahorro sustancial de tiempo, optimizando el presente trabajo.

1.4. Hipótesis de partida y simplificaciones relevantes

En el presente apartado se expondrán una serie de hipótesis de partida y simplificaciones relevantes tanto del modelo del motor en sí, como del proceso y secuencia de montaje del mismo, gracias a las cuales ha sido viable abordar este proyecto.

En cuanto al modelo del motor Garrett TPE 331-10R cabe recordar que es un modelo centrado en la turbomáquina, del que no fue posible conseguir planos o medidas que definieran de forma exacta cada una de las distintas geometrías complejas que lo conforman. Es por ello que dicho modelo se generó a partir de la medición manual con las herramientas disponibles, de cada una de las piezas a las que se pudo tener acceso.

Es por tanto comprensible que dicho modelo presente una serie de simplificaciones, justificadas por la falta de disponibilidad de instrumental específico de medida y por las limitaciones tanto físicas como de disponibilidad temporal, a la hora de desmontar y medir los distintos conjuntos que conforman la totalidad del motor. Algunas de estas simplificaciones en el modelo de partida fueron:

- Simplificación de algunas de las geometrías curvas por su complejidad de medida con las herramientas disponibles.
- Modelado como sólido único todo aquel subconjunto que no se haya podido desmontar en sus elementales, lo cual afectará a algunas de las operaciones definidas sobre los mismos.
- Modelado de algunas de las geometrías internas de piezas elementales cerradas usando como guía el perfil de sección aproximado de la misma, sacado de los manuales IPC [6] y Revisión General [2], ambos referentes al modelo Garrett TPE 331-5 que, sin ser el mismo modelo objetivo de este trabajo, se ha llegado a la conclusión tras análisis visual y comparación del despiece disponible del TPE 331-5 y TPE 331-10R en el taller, que las piezas en las que se pretendía realizar la simplificación mencionada eran prácticamente idénticas o presentaban pequeñas diferencias achacadas al desgaste de algunas de ellas.
- Simplificación en la geometría de álabes debidas a la falta de herramientas CMM (medición por coordenadas) y al poco espacio entre los mismos, no siendo posible tomar las suficientes medidas y, siendo por tanto aproximados por perfiles NACA de 4 dígitos, aplicándoles posteriores operaciones en CATIA V5 para lograr un álabe con torsión, ya sea de perfil uniforme o variable.
- Ante la imposibilidad de encontrar algunos elementos de sujeción como tornillos y tuercas se han escalado los que se han podido medir al tamaño de los agujeros. Además, ante la imposibilidad de medir con exactitud la profundidad de las roscas, estas se han aproximado.
- Modelado simplificado del interior de la Caja de engranajes reductores, así como de los soportes de multitud de accesorios que se encuentran en la cara trasera de la Carcasa principal. En algunos casos se ha modelado estos mediante dibujo sobre soporte gráfico en CATIA, modificando posteriormente las cotas con las medidas tomadas.
- Montaje de algunos conjuntos haciendo uso de los manuales IPC [6] y Revisión general [2], debido a que estos no se encontraban ensamblados en el taller y no se conocía, a priori, el orden lógico de montaje de los mismos.

Por otra parte y atendiendo ahora al presente trabajo, se han tomado una serie de simplificaciones asociadas a la estructura de montaje, su planificación y la distribución en planta de las operaciones y sus recursos asociadas. Las más relevantes han sido:

- Estructura y secuencia de montaje del motor basados la secuencia de montaje tras *Overhaul* o revisión general del Garrett TPE 331-10R, descritos en el manual de Revisión general [2]. Cabe destacar nuevamente que dicho manual es de una versión anterior del motor modelado por lo que algunos elementos y conjuntos, como puede ser la Turbina, no se corresponden en su totalidad con los descritos. Esto aplica también a las operaciones de montaje de los mismos y a su secuencia temporal.
- La estructura y secuencia de montaje de cada pieza o conjunto que no se correspondía con el manual, debido a la distinta versión del motor, se ha establecido de forma lógica e iterativa. Es decir, cuando las piezas han sido lo suficientemente distintas como para alterar las operaciones necesarias o el orden de montaje descrito en el manual, se ha optado por definir unas operaciones y secuencia alternativas, las cuales se han definido de forma iterativa, ya que conforme se ha avanzado se ha visto que eran irrealizables o se podían optimizar, hasta conformar el proceso descrito en el presente documento.
- Distribución de “lotes de montaje” o conjuntos siguiendo el manual de Revisión general, de forma que cada vez que en el manual se hacía distinción entre una secuencia de operaciones y otra distinta, se ha definido un conjunto distinto en el árbol de montaje con su secuencia posteriormente asociada.
- Los pequeños montajes que a su vez se instalan en la Estación principal, se suponen instalados directamente sobre la misma, sin definir una posición adicional sobre la operación para no generar demasiadas estaciones de trabajo, posiciones de operación y trayectorias. En la realidad el operador los podría ensamblar en una zona distinta.
- Inclusión simplificada de las operaciones referentes a las piezas modeladas, omitiendo aquellas que hacen alusión a conjuntos de piezas que han sido modelados como pieza única o aquellas referentes a piezas que no están recogidas en el modelo.
- Asignación de la duración de las distintas operaciones atendiendo a una serie de criterios simplificados como el tipo de operación, el tamaño de pieza o la dificultad de acceso a la zona de instalación de la misma.
- Modelado simplificado del utillaje más importante, necesario en el citado proceso de montaje recogido en el manual. Este modelaje simplificado viene justificado por la ausencia de planos o medidas de dichos recursos en el manual, ofreciendo este únicamente vistas generales y exteriores de los mismos. Es por ello que se ha usado como criterio de modelado el correcto ajuste de las mismas a las zonas del motor indicadas en el manual, de forma que estas puedan cumplir su función.
- No han sido objetivo del presente trabajo el modelado del resto de herramientas secundarias, *dummies* y utillaje temporal de menor relevancia. Estas quedarán planteadas como posible trabajo futuro.
- Distribución en planta y asignación de operarios modelada bajo el criterio de producción a pequeña escala y con pocos operarios, con conocimiento avanzado sobre gran parte del montaje, ya que tras la experiencia propia de ver los mantenimientos y posteriores montajes del motor Garrett TPE 331-10R en la Maestranza Aérea de Sevilla, donde estuve de prácticas en mis estudios de grado; constaté el hecho de que todo el proceso de mantenimiento y montaje se llevaba a cabo con una plantilla reducida de 3-4 operarios con bastante experiencia, premiando la seguridad y la garantía de que las operaciones se llevaban a cabo correctamente al tiempo empleado en el proceso. Esto se debe en parte al muy alto coste de los motores aeronáuticos, que pueden llegar a significar un alto porcentaje dentro del coste total de la aeronave.

Cabe por tanto destacar que, aunque por un lado la viabilidad del presente proyecto ha sido posible gracias a esta serie de simplificaciones tanto en el modelo como en el propio proceso de ensamblaje que se busca definir, estas mismas hacen que tanto el proceso como la secuencia final y los resultados exportados de la misma, difieran en parte de los ofrecidos por el fabricante, dándole un objetivo académico al proyecto.

1.5. Estructura

En cuanto a la estructura del presente documento, se pretende que esta siga el orden más natural y lógico posible. Se busca que el lector comprenda de dónde partimos y bajo qué simplificaciones e hipótesis y pueda seguir correctamente el procedimiento, así como comprender y analizar con criterio los resultados obtenidos.

Se ha comenzado por lo tanto, en el presente capítulo, con una introducción al trabajo realizado. Esta intenta responder de forma concisa al porqué del trabajo.

En los siguientes dos capítulos, se hará una introducción y contextualización teórica tanto del motor Garrett TPE 331-10R, cuyo modelo se va a emplear, como de la plataforma 3DExperience y los módulos de la misma, empleados a lo largo del proyecto. De esta forma quedan definidos tanto el modelo de partida como las herramientas de trabajo.

A continuación se presentarán las distintas etapas del trabajo, desde la definición de la estructura de montaje mediante *Manufactured Item Definition* hasta la generación de trayectorias asociadas a cada operación con el objetivo de exportar simulaciones, haciendo uso del módulo *Assembly Evaluation*; además de todas aquellas operaciones intermedias detalladas en sus correspondientes capítulos.

Cabe destacar que todos estos capítulos en los que se describe cada una de las etapas seguidas a la hora de desarrollar el modelo, comenzarán con la descripción resumida de cada uno de los tutoriales seguidos, referentes a esa etapa en concreto. Estos tutoriales, presentes en la web Eduspace de 3DExperience [7], han sido clave a la hora de identificar y comprender cada una de las herramientas disponibles dentro de cada módulo de la plataforma, siendo indispensables a la hora de obtener una visión general y ser capaces de diseñar estrategias que permitiesen desarrollar operaciones o secuencias complejas.

En cada capítulo se va a incluir de forma resumida las soluciones que se ha dado a problemas concretos que han ido surgiendo a lo largo del trabajo, de forma que si el lector está interesado en realizar un proyecto similar y se encuentra con alguno de estos obstáculos, pueda solventarlo optimizando su tiempo.

Tras esto, se explicará el proceso seguido a la hora de generar y exportar simulaciones del proceso de montaje, reflejando una vez más la potencia que ofrece el software empleado a la hora de mostrar el producto final de forma profesional.

Por último, se redactarán las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del proyecto, así como una opinión personal acerca del software empleado y una serie de propuestas de continuación futuras.

2 MOTOR GARRETT TPE 331-10R

En el presente capítulo se va a introducir de forma teórica el motor cuyo modelo vamos a utilizar durante todo el trabajo, dicho motor turbohélice es el conocido Garrett TPE 331, en concreto la versión 10R del mismo. Este motor ha sido catalogado como exitoso dentro de la industria aeronáutica, continuando instalado y operativo en aeronaves como el CASA C-212 Aviocar.

La familia de motores Garrett AiResearch TPE 331, más conocido como Garrett TPE 331 ha evolucionado desde sus orígenes hasta presentar en la actualidad 18 modelos, 106 configuraciones y más de 13.000 motores vendidos. Hablamos por tanto de un motor emblemático para la industria aeronáutica [8].

La presente contextualización histórica y tecnológica del motor no es otra cosa que un extracto de la contextualización realizada en [1], de forma que el lector pueda tener una visión general del motor modelado sin tener que consultar bibliografía externa. Por este motivo se recomienda acudir a [1] en caso de desear más información.

2.1 Breve reseña histórica

En cuanto a la historia inherente a la familia de motores Garrett TPE 331, estos fueron diseñados con objetivo claramente militar por la compañía Garrett AiResearch en 1959, compañía que más adelante pasó a llamarse AlliedSignal y, tras absorber en 1999 a la compañía Honeywell adoptó finalmente su nombre. Es por este motivo por el que también se conoce al motor cuyo modelo es el elemento de partida del presente proyecto como Honeywell TPE 331-10R [8].

El TPE 331, primer motor turbohélice de la compañía, fue probado por primera vez en vuelo en el año 1964 a bordo de un Beech C-45, ganando ese mismo año la fama de ser el motor turbohélice más rápido del momento además del renombre entre los fabricantes de aeronaves por ser un motor que permite las operaciones de aterrizaje y despegue en pistas relativamente cortas, motivo por el que fue el candidato perfecto para el CASA C-212 años más tarde.

En 1965 el motor consigue el certificado de tipo por parte de la FAA, siendo este un hito para los ingenieros de la compañía, que empezaba a posicionarse entre los grandes fabricantes de motores del momento.

Otro hito importante fue la venta de 1000 unidades de la variante T76 del motor para el OV-10, que se empleó desde 1976 hasta 1992 incluyendo su despliegue durante el conflicto bélico de Vietnam.

Hoy en día la compañía Honeywell sigue teniendo contratos de venta que garantizan la continuidad de los últimos modelos de TPE 331 durante los próximos 50 años con proyectos como el reacondicionamiento de una flota de obsoletos Antonov An-2 o el impulso del prototipo indio de instrucción militar HTT-40 de Hindustan Aeronautics Limited [8].



Figura 2-1. Instalación para pruebas del TPE 331 [8].

Conociendo ya la evolución histórica y el impacto que ha tenido y sigue teniendo hoy en día, sabemos que, cuando hablamos del motor turbohélice TPE 331, hablamos de un motor de respuesta rápida y capaz todavía en la actualidad de permitir competitividad en aviones destinados a operaciones de adversas condiciones de despegue y aterrizaje, o de complejas maniobras como las del Short Tucano, avión acrobático de entrenamiento militar que sigue usando el TPE 331 bajo el mando de la Royal Air Force de Reino Unido [8].

2.2 Tipología del motor

El motor Garrett TPE 331-10R en cuestión es un motor turbohélice de eje único. Esto significa que todo el eje del motor gira a la misma velocidad, transmitiendo el movimiento a través de una caja de engranajes reductores hasta el eje de la hélice con una reducción aproximada de 20,8:1.

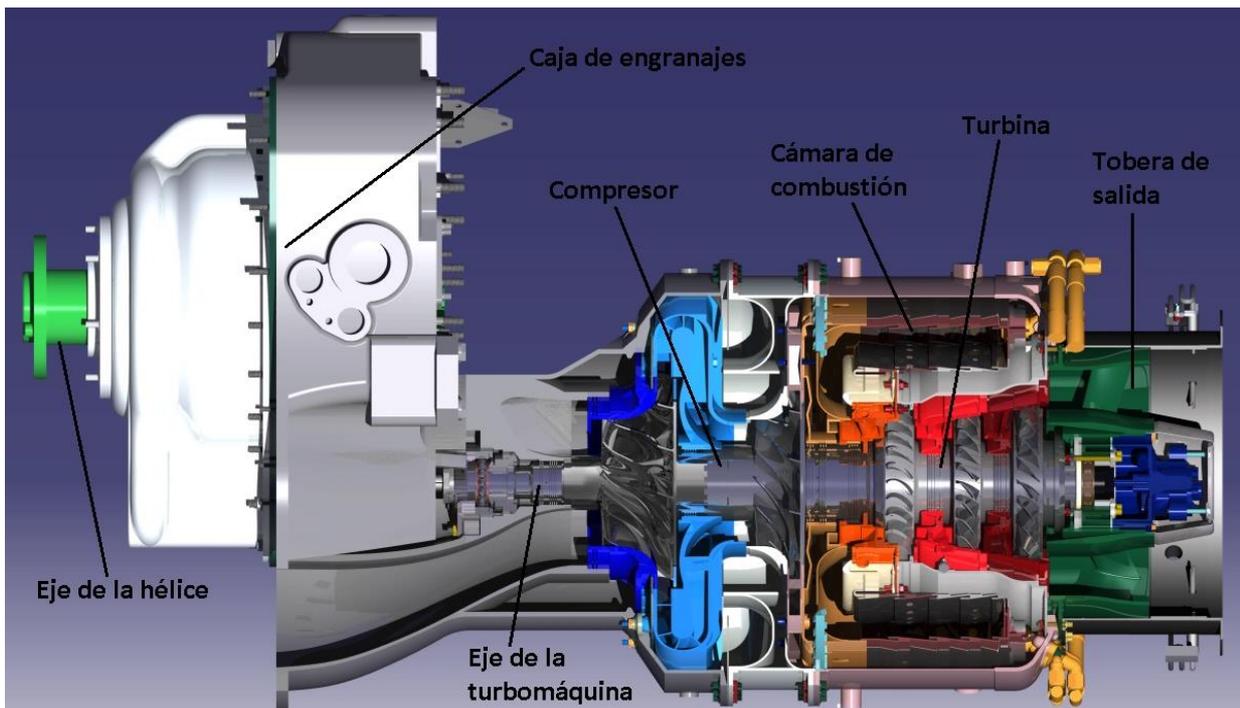


Figura 2-2. Esquema general del motor.

En un turbohélice el empuje total viene dado por la suma del generado por el movimiento de la hélice más el generado por los gases de escape, siendo mayor el primero de ellos.

Este tipo de motores puede llegar a ser muy eficiente a altitudes moderadas en vuelos subsónicos por lo que en muchos casos, como el del C-212, la opción del turbohélice se impone a la del motor alternativo o al turboreactor. A esto se añade la rápida respuesta del motor ante variaciones de potencia y el consumo moderado en las condiciones citadas, lo que indica que se ajusta nuevamente a la necesidad del C-212 de poder despegar y aterrizar en pistas cortas y condiciones adversas, suponiendo bajo coste de operación y mantenimiento.

El funcionamiento de este tipo de motor puede explicarse de forma general en los siguientes pasos:

- El aire entra por la toma de aire o difusor de admisión situada en este caso en la parte delantera del motor, bajo el eje de giro de la hélice, cuya función proporcionar el gasto necesario al motor y asegurar que este llega en niveles aerodinámicamente compatibles.
- Tras avanzar a través de la zona fría o conjunto compresor, el flujo se comprime aumentando su presión y temperatura mediante trabajo mecánico.
- Posterior a la zona fría se encuentra la cámara de combustión donde se produce un quemado de combustible que aumenta aún más la temperatura y la energía del flujo.
- A continuación, el flujo pasa por la turbina de expansión donde libera gran parte de la energía acumulada, convirtiéndose en energía mecánica y haciendo girar el eje de la turbomáquina. Parte de esta energía liberada se reinvierte en el giro del conjunto compresor.
- Por último, el flujo pasa a través de la tobera de salida, la cual modifica el campo de velocidades del flujo de gases.
- La energía mecánica restante se transmite en forma de movimiento a través de la caja de engranajes reductores hacia el eje de la hélice, la cual produce gran parte del empuje. Las funciones de control y reducción de la velocidad de giro por parte de la caja de engranajes reductores son fundamentales.

2.3 Especificaciones técnicas

En cuanto a las especificaciones técnicas propias del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R, se hará una recapitulación de los componentes internos, así como una exposición de los datos técnicos ofrecidos por el fabricante en la Web de Honeywell del modelo TPE 331-10.

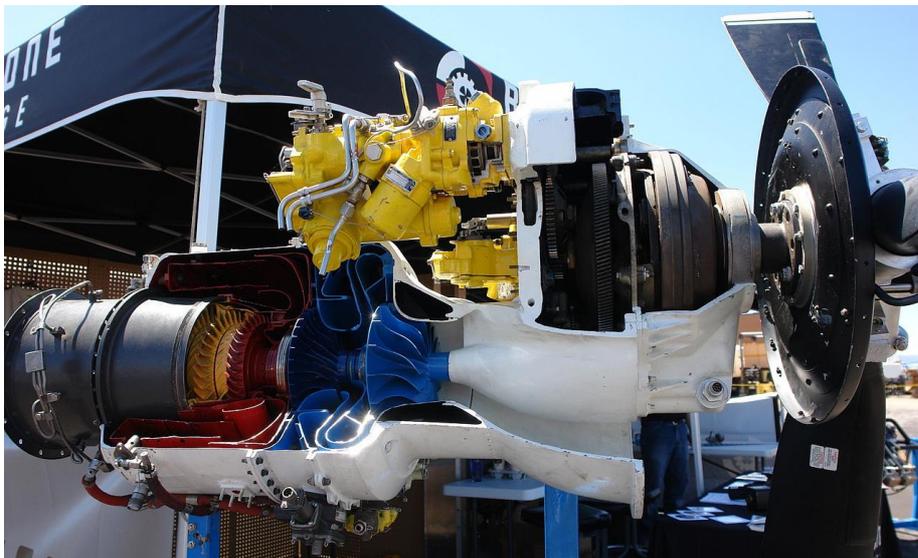


Figura 2-3. Sección lateral del motor turbohélice TPE 331 [9].

De forma muy resumida, el motor posee las siguientes características

- Turbohélice de eje único.
- Compresor de 2 etapas, ambas centrífugas.
- Cámara de combustión anular de 10 inyectores.
- Turbina de expansión de 3 etapas de rotor y 3 de estátor con las primeras de cada tipo refrigeradas.
- Tobera de salida de geometría fija con sensores termopares acoplados.

En cuanto a los datos técnicos del motor TPE 331-10 ofrecidos por el fabricante, a nivel del mar y en condiciones estándar tenemos el siguiente extracto del folleto informativo ofrecido por el fabricante, donde se ha preferido realizar una representación visual, en forma de tabla y gráfica, a una enumeración redactada debido a la facilidad que esta primera ofrece a la hora de buscar datos de un vistazo.

Donde se puede resaltar la labor, ya mencionada teóricamente, de la caja de engranajes reductores, que reducen la velocidad de giro que llega a la hélice.

Podemos comprobar que, para las condiciones de vuelo subsónico y altitud moderada, el motor responde con buenas prestaciones y un consumo moderado, elementos necesarios para el correcto desempeño de las operaciones del CASA C-212.

Power output:	shp shp (thermo) eshp eshp (thermo)	940 1,000 944 1,045
ESFC:	0.534	lb/(hp-h)
RPM:	gas gen shatft output	41,730 2,000 (cw from rear) 1,591 (ccw from rear)
Weight:	385 lb	
Pressure ratio:	10.55	
Airflow:	7.7lb/sec	
Fuel:	Jet A, Jet B, Jet A-1, JP-8, JP-1, JP-4, JP-5, JP8+100	
Oil:	Mil-L-23699B, Mil-L-7808, Type I/Type II	
Electrical:	24 vdc, 16.2 amp (max)	
(Demonstrated) Start capability:	SL-30,000 ft. No minimum O.A.T. to +55°C	
(Demonstrated) Operational limits:	SL-45,000 ft. No minimum O.A.T to +55°C	
Compressor bleed:	high pressure 10% (max)	

*Available in cw and ccw

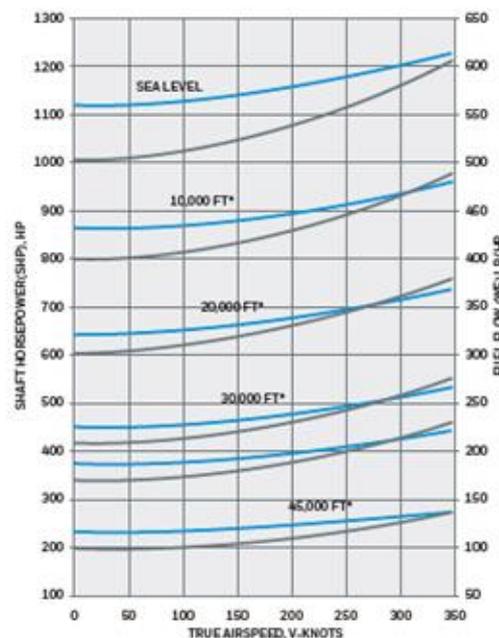
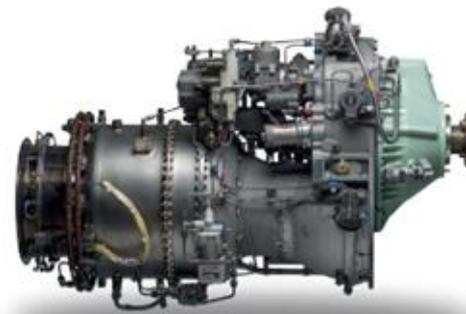


Figura 2-4. Tabla de datos técnicos (Izquierda) y gráfico Potencia-Velocidad verdadera-Flujo de combustible a distintas alturas, ambos ofrecidos por la web del fabricante Honeywell [10].

2.4 Listado de piezas (BOM) del modelo del motor

Tras realizar la introducción teórica del motor Garrett TPE 331-10R, se procede a describir el modelo del mismo, así como su lista de componentes o BOM (*Bill of Material*). El modelo empleado lo conforman:

- 81 piezas distintas, modeladas en archivos independientes con la extensión *CATPart*.
- 573 piezas que componen el montaje final del Garrett TPE 331-10R, siendo estas una repetición de las anteriores y agrupándose en distintos conjuntos a modo de árbol. Dicho desglose es el siguiente:

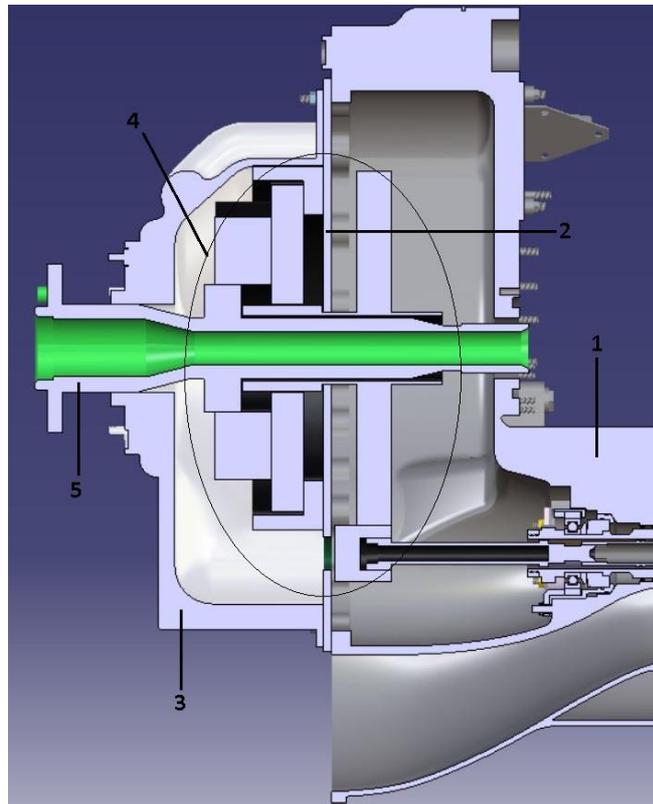


Figura 2-5. Distribución espacial de las piezas modeladas en el conjunto Carcasa principal.

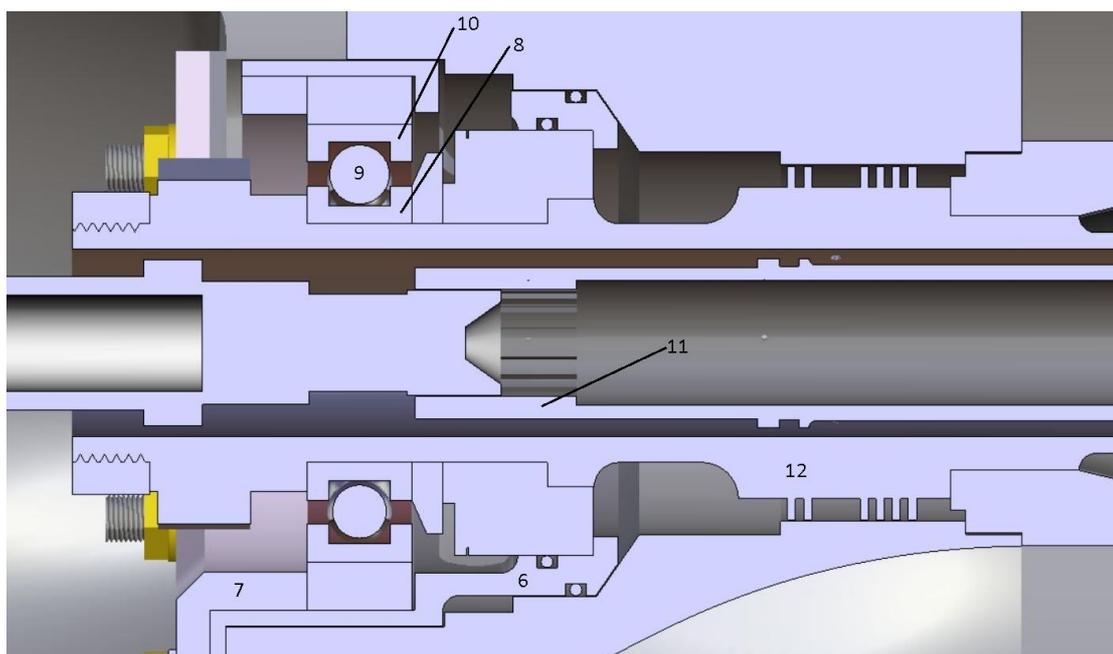


Figura 2-6. Distribución espacial de las piezas modeladas en el Conjunto de sujeción inicial.

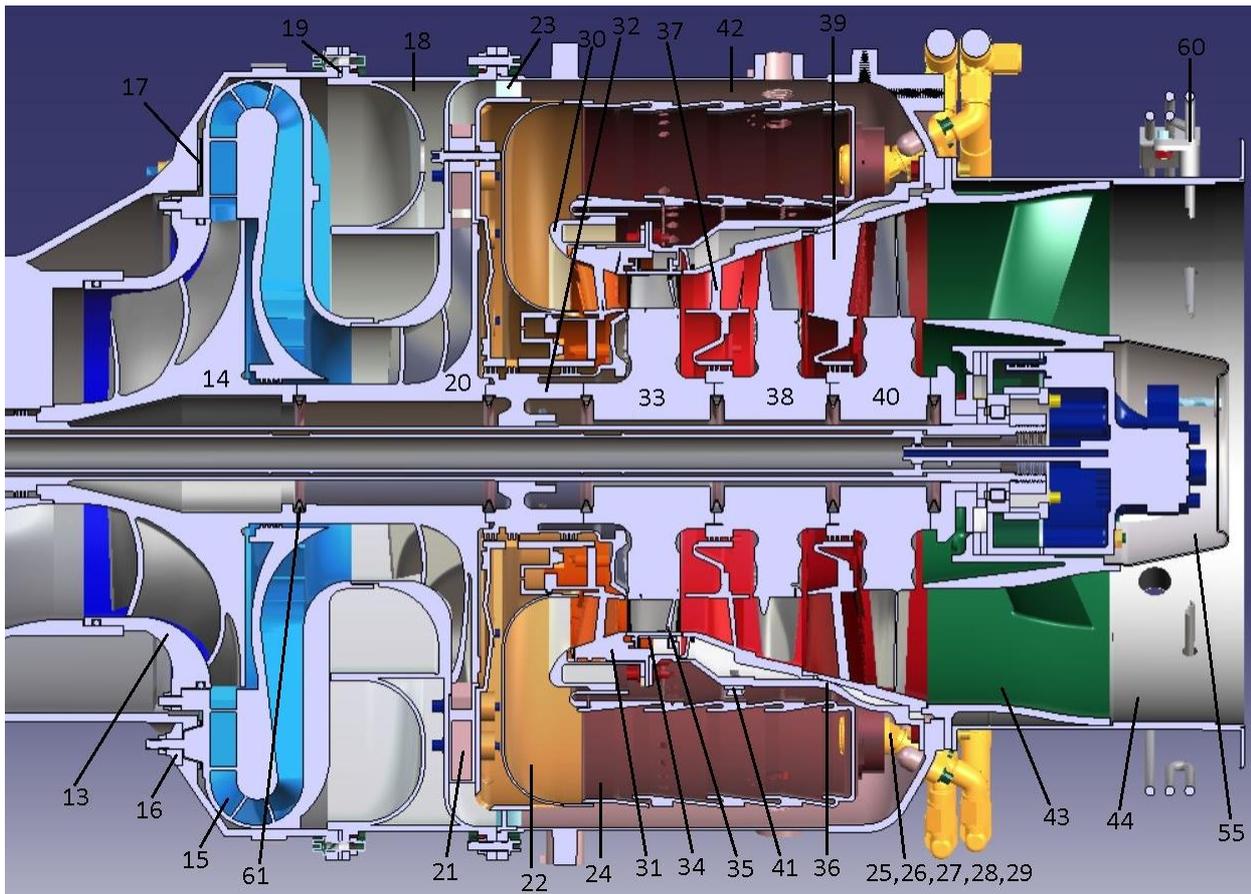


Figura 2-7. Distribución espacial de las piezas modeladas en el Conjunto motor.

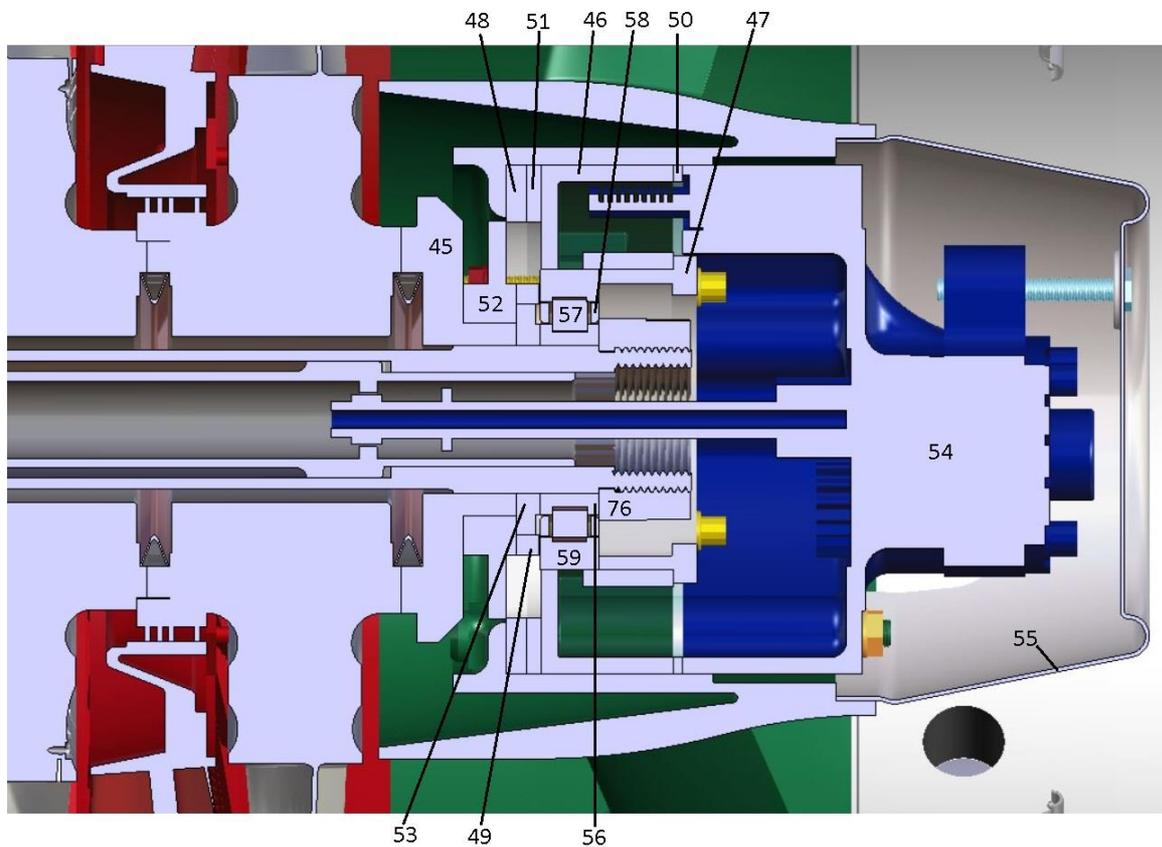


Figura 2-8. Distribución espacial de las piezas modeladas en el Conjunto de sujeción final.

La numeración señalada en las figuras anteriores corresponde al siguiente listado de piezas (BOM). Como se habrá podido observar, no se han señalado las posiciones de cada tipo de tornillo y tuerca debido a que esto dificultaría en gran medida la localización espacial de las piezas más relevantes en los conjuntos.

1. Accessory Drive Housing	(x1)
2. Diaphragm	(x1)
3. Nose Cone	(x1)
4. Gearbox (simplificada)	
i. Bull and Sun Gear	(x1)
ii. Planetary Spur Gear	(x1)
iii. Planet Gear Carrier	(x4)
iv. Gear and Bearing Assembly	(x1)
v. Gearshaft	(x1)
vi. Coupling Shaft	(x1)
5. Propeller Shaft	(x1)
6. Bearing Carrier	(x1)
7. Retainer	(x1)
8. Bearing Inner Race	(x1)
9. Bearing [Ball Bearing]	(x1)
10. Bearing Outer Race	(x1)
11. Torsion Shaft	(x1)
12. Shouldered Main Shaft	(x1)
13. First Stage Compressor Shroud	(x1)
14. First Stage Compressor Impeller	(x1)
15. First Stage Compressor Diffuser	(x1)
16. Spacer Washer	(x13)
17. Shim [Type I]	(x3)
18. Compressor Housing	(x1)
19. Gasket [Type I]	(x1)
20. Second Stage Compressor Impeller	(x1)
21. Second Stage Compressor Diffuser Vane	(x1)
22. Combustion Transition Liner	(x1)
23. Anular Flow Director	(x1)
24. Combustion Chamber	(x1)
25. Fuel Manifold and Nozzle Assembly [Type I]	(x6)
26. Fuel Manifold and Nozzle Assembly [Type II]	(x1)
27. Fuel Manifold and Nozzle Assembly [Type III]	(x1)
28. Fuel Manifold and Nozzle Assembly [Type IV]	(x1)
29. Fuel Manifold and Nozzle Assembly [Type V]	(x1)
30. First Stage Turbine Stator Shroud	(x1)

31. First Stage Turbine Stator	(x1)
32. First Stage Turbine Wheel Support	(x1)
33. First Stage Turbine Wheel	(x1)
34. First Stage Turbine Shroud Outer Race	(x1)
35. First Stage Turbine Shroud	(x12)
36. Turbine Support	(x1)
37. Second Stage Turbine Stator	(x1)
38. Second Stage Turbine Wheel	(x1)
39. Third Stage Turbine Stator	(x1)
40. Third Stage Turbine Wheel	(x1)
41. Nutplate	(x7)
42. Plenum	(x1)
43. Exhaust Support Assembly	(x1)
44. Exhaust Duct	(x1)
45. Courvic Coupling	(x1)
46. Bearing Support Assembly	(x1)
47. Retainer	(x1)
48. Gasket [Type II]	(x1)
49. Gasket [Type III]	(x1)
50. Gasket [Type IV]	(x1)
51. Shim [Type II]	(x1)
52. Seal	(x1)
53. Seal Rotor	(x1)
54. Oil Scavenge Pump and Spur Gearshaft	(x1)
55. Tail Cone	(x1)
56. Roller Bearing Inner Race	(x1)
57. Bearing [Roller Bearing]	(x1)
58. Thrust Ring	(x1)
59. Roller Bearing Outer Race	(x1)
60. Temperature Sensor	(x1)
61. Gasket [Type V]	(x6)
62. Bolt [Type I]	(x8)
63. Bolt [Type II]	(x22)
64. Bolt [Type III]	(x128)
65. Bolt [Type IV]	(x32)
66. Bolt [Type V]	(x17)
67. Bolt [Type VI]	(x2)
68. Bolt [Type VII]	(x4)

69. Bolt [Type VIII]	(x14)
70. Nut [Type I]	(x174)
71. Nut [Type II]	(x23)
72. Nut [Type III]	(x8)
73. Nut [Type IV]	(x5)
74. Nut [Type V]	(x24)
75. Nut [Type VI]	(x1)
76. Nut [Type VII]	(x1)

Tabla 2-1. Desglose de los elementos del modelo y sus cantidades.

Se recomienda de nuevo al lector, acudir a [1] en el caso de que desee más datos sobre cada una de las piezas, sus correspondientes etapas y operaciones de modelado y su posterior comparación visual con los elementos reales.

Cabe destacar que sobre el modelo original desarrollado en [1], se ha realizado una ligera modificación en la parte final de la Turbina de expansión, en concreto en la pieza *Turbine Support* o soporte de la turbina, cuyo lado posterior estaba ensamblado interior al *Plenum*, siendo este exterior, por lo que se ha ensamblado correctamente, alejando el plano de la solapa de ensamble posterior, del orden del medio milímetro. Este error viene justificado con el hecho de que se modelaron las piezas por separado, sin poder asistir a la secuencia completa de desmontaje del motor, por lo que en algunos casos la acumulación de errores de medida generaba incertidumbre de la posible secuencia de montaje.

Gracias al proceso iterativo de modelado de la secuencia de montaje del Garrett TPE 331-10R, se ha podido observar que el montaje era incoherente con dicha secuencia, por lo que se ha subsanado este detalle y se ha continuado con la definición del proceso.

3 INTRODUCCIÓN A 3DEXPERIENCE

En el presente capítulo se introducirá la herramienta empleada a lo largo de todo el trabajo, esta es la innovadora plataforma 3DEXperience y el software de diseño y fabricación asistido por ordenador que trae implementado. Como contextualización previa, se hará un recorrido histórico de las herramientas de tipo CAD/CAM (*Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacturing*) desde sus orígenes hasta la actualidad, destacando la relevancia que este tipo de herramientas tiene actualmente en el ámbito aeronáutico.

Para cerrar el capítulo se introducirán las distintas aplicaciones o módulos que 3DEXperience trae integrados y que se han empleado para lograr los objetivos del trabajo en las distintas etapas que lo constituyen.

Desde los orígenes de las computadoras ha sido una necesidad inherente al ser humano la de optimizar distintos procesos presentes en su vida, ya sea por eliminar secuencias repetitivas, abaratar costes eliminando el factor humano u optimizar tiempo y recursos, siempre intentando aprovechar todo lo posible las capacidades de computación disponibles.

Se define entonces el diseño y la fabricación asistidos por ordenador como la disciplina que estudia la aplicación de tecnologías de la información y de la comunicación como herramienta de soporte en todos los procesos involucrados en el diseño y la fabricación de un producto [11].

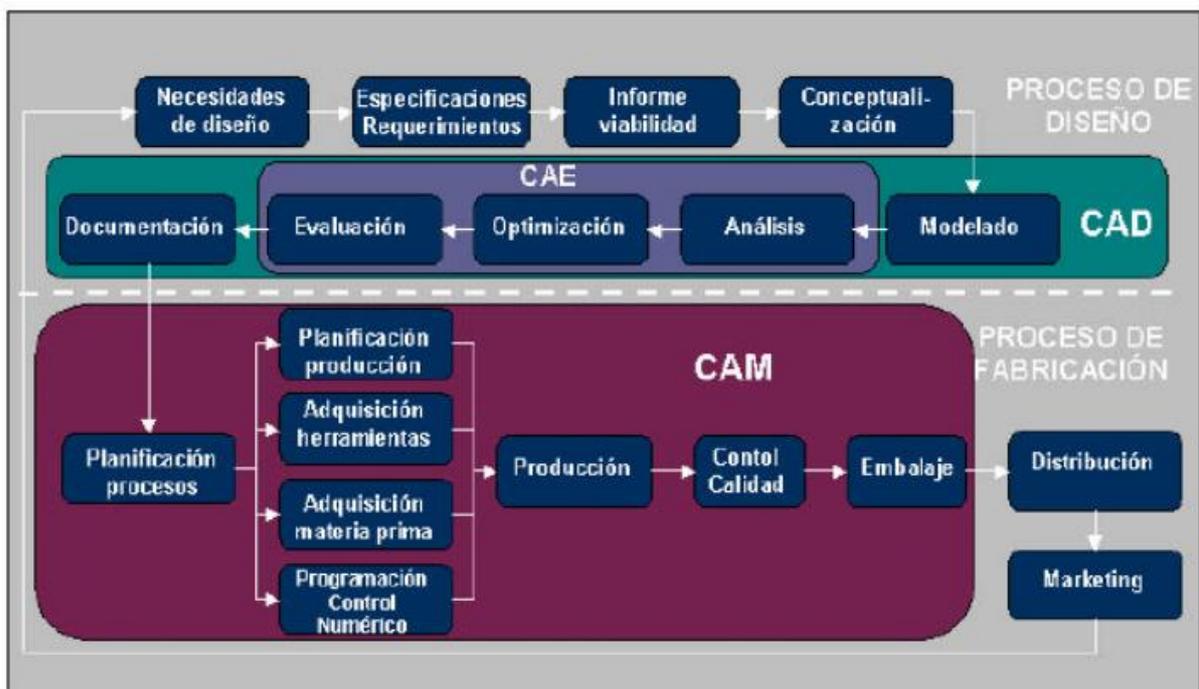


Figura 3-1. Ciclo simplificado del producto en una aplicación CAD/CAM [11].

De forma esquemática y resumida, dentro del ciclo propio de un producto al que se le aplica este tipo de herramientas podemos diferenciar, como se ve en la Figura 3-1, un proceso de modelado y definición virtual del producto, sus componentes y la información asociada, el cual se correspondería con las capacidades propias de una herramienta tipo CAD (*Computer Aided Design*).

Por otro lado, las herramientas que tienen tipología CAM (*Computer Aided Manufacturing*) incorporadas, poseen funcionalidades que parten del modelo definido y su información asociada y son capaces de asignar, distribuir, planificar y secuenciar los procesos tanto temporal como espacialmente, así como gestionar las etapas posteriores relativas al proceso de producción. Además este tipo de productos suelen pasar por fases iterativas o realimentadas de diseño y producción, requiriendo un costo alto en cálculos y evaluación de resultados, lo que hace indispensable la computerización de este tipo de problemas.

Desde su nacimiento, este tipo de herramientas ha experimentado una simbiosis perfecta con el desarrollo y la evolución tecnológica de cada momento, ya que son capaces de permitir grandes ahorros de recursos, tiempo y costes, favoreciendo el crecimiento económico de multitud de sectores ; lo cual a su vez incentiva a un fuerte inversión tecnológica aplicada a este tipo de herramientas, desarrollándolas y ampliando cada vez más las capacidades que ofrecen.

3.1 Breve reseña histórica

El origen de las herramientas de diseño asistido por ordenador o CAD puede datarse a mediados de la década de los 50. En concreto, autores como Justo Albarrán en [11] sitúan en 1955 y con finalidad militar para el ejército de los Estados Unidos, el nacimiento del primer sistema gráfico SAGE (*Semiautomatic Ground Environment*) en el Lincoln Laboratory del Instituto Tecnológico de Massachusetts, más conocido como MIT. Este sistema, muy lejano a los actuales, fue diseñado con la intención de mostrar la información asociada a la localización de objetos mediante radar [12].

Dada la innovación que supuso, durante la década de 1960 surge el esfuerzo conjunto de grupos de investigación en el concepto CAD y en el desarrollo de estas técnicas.

Ivan Sutherland, uno de estos investigadores del concepto CAD, culmina su tesis doctoral ‘A Machines Graphics Communications System’ en 1962 con el sistema SketchPad, también en el ambiente del Lincoln Laboratory. Este proyecto estableció las bases del generado interactivo de gráficos computerizados en las que, con un lápiz óptico y un teclado se podía seleccionar, posicionar y trazar juntamente con una imagen mostrada por pantalla.

Dado el potencial que estos sistemas ofrecían, esta misma década comenzaron a comercializarse dentro de las esferas de las grandes compañías automovilísticas y aeronáuticas, como las reconocidas Lockheed o General Motors o Ford, que fomentaron el desarrollo de los sistemas CAD/CAM. Sin embargo no fue hasta la década de 1980 cuando se globaliza el concepto de este tipo de herramientas, justificado con una reducción considerable de los precios de dichas herramientas, como la que se ofreció para el sistema AutoCAD, nacido en 1982.

Caben destacar los desarrollos de algunos softwares concretos que han marcado un antes y un después, siendo todavía en la actualidad grandes referentes de los sistemas CAD/CAM, como puede ser el software CATIA, empleado para el desarrollo del modelo del motor Garrett TPE 331-10R en [1].



Figura 3-2. Logo del software CATIA [12].

En 1981 un grupo de ingenieros se separaron de Dassault Aviation, creando Dassault Systèmes con el propósito específico de cubrir la necesidad por parte de algunas empresas de la época de obtener diseños computerizados de sus futuros productos, abaratando costes y facilitando la tarea de diseño. Ese mismo año Dassault Systèmes lanzó el software CATIA, comenzando a llamar la atención de grandes empresas como

IBM, con la que se cerró un contrato para las actividades de marketing, ventas y soporte o empresas automovilísticas como BMW, Honda y Mercedes [12].

En 1988 Dassault Systèmes lanza CATIA V3, incluyendo funcionalidades de distintos ámbitos como son la arquitectura, la ingeniería o la construcción para las plataformas de Unix y mainframe. En este momento CATIA se consideraba el software global líder para el diseño tanto aeronáutico como automovilístico.

La empresa empezó a abrir sus fronteras, acogiendo más ámbitos industriales como el naval, el energético o la fabricación y el montaje. Todo ello llevó a la creación, en 1988, de una marca específica para la gestión de datos de los productos de CATIA llamada ENOVIA.

No es hasta 1999 cuando se lanza CATIA V5, con renovadas funcionalidades y adaptadas al entorno Windows NT y UNIX. Desde el lanzamiento de CATIA V5 hasta nuestros días, la empresa Dassault Systèmes no ha parado en ningún momento de crecer, desarrollándose y cerrando acuerdos importantes con empresas de la envergadura de Ford Motor, AVIC, ENAER, Toyota, Sony, Airbus o Boeing entre otras.

En años posteriores cabe destacar el lanzamiento de la versión 6 de CATIA, la creación de plataformas como 3DEXPERIENCE o BIOVIA y la adquisición por parte de la Dassault Systèmes de multitud de empresas como Geensoft, Apriso o IQMS para dar soporte, evolución y continuidad a la marca [12].

Como ha podido verse, desde la creación de las herramientas de tipo CAD/CAM hasta la actualidad, la tendencia ha sido la de crear plataformas colaborativas e integradoras de multitud de softwares orientados a distintos ámbitos como el diseño, la fabricación, el análisis, la simulación o la gestión de recursos y ciclo de vida, entre otras.

3.2 Plataforma colaborativa 3DExperience

Una vez que hemos entrado en contexto de este tipo de herramientas y hemos visto la tendencia a la integración colaborativa de funciones, cabe destacar el lanzamiento en el año 2012 de la primera versión de la plataforma 3DExperience por parte del gigante Dassault Systèmes. Esta plataforma sigue en desarrollo continuo desde entonces, prueba de ello es que en el presente trabajo se ha empleado una licencia de carácter académico en la versión más reciente del software R2021x.

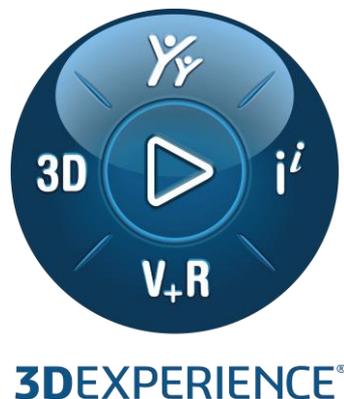


Figura 3-3. Brújula de la plataforma 3DExperience e imagen representativa de la marca [13].

3DExperience se define por sus desarrolladores como un entorno colaborativo que permite a las empresas innovar de formas completamente nuevas. Capaz de proporcionar a las organizaciones una visión holística y en tiempo real de su actividad empresarial y ecosistema, conectando personas, ideas, datos y soluciones en un solo entorno, adaptadas a cada industria. Además la plataforma actúa como un mercado o plataforma comercial que conecta a los proveedores de servicios y a los compradores [13].

Por lo tanto, 3DExperience ofrece al cliente una plataforma muy intuitiva y multidisciplinar, con la que prácticamente podría gestionar la totalidad de su empresa en el ámbito industrial, desde el diseño del producto y el sistema de producción hasta la simulación, validación y gestión de información.

Esto lo hace por medio de un sinfín de módulos integrados a los que denomina aplicaciones, todas ellas personalizadas para un objetivo concreto.

Es por ello que 3DExperience ha supuesto un salto en innovación, ofreciendo una plataforma colaborativa muy intuitiva para el usuario, donde se integran aplicaciones de muy distintos ámbitos. Ejemplo de ello son:

- Aplicaciones de modelado 3D derivadas de CATIA, SOLIDWORKS o GEOVIA entre otros.
- Aplicaciones enfocadas en la simulación de secuencias o análisis de resultados, provenientes de softwares como SIMULIA, DELMIA o 3DVIA.
- Aplicaciones de ámbito social y colaborativo asociadas a ENOVIA o 3DEXCITE.
- Aplicaciones de gestión y procesado inteligente de la información como NETVIBES o MEDIDATA.

Cabe destacar que en el presente trabajo únicamente se han empleado algunas de estas aplicaciones, dada la limitación temporal del proyecto; las cuales se expondrán de manera muy resumida en el siguiente apartado y se detallarán, tanto estas como sus operaciones empleadas, tanto en los tutoriales de aprendizaje como en el caso práctico aplicado al Garrett TPE 331-10R, en los correspondientes capítulos posteriores.

3.3 Aplicaciones 3DExperience usadas en este trabajo

3.3.1 Manufactured Item Definition

La aplicación *Manufactured Item Definition* es el módulo por excelencia que posee 3DExperience para la definición del MBOM o (*Manufacturing Bill of Material*). Nos definirá la estructura orientada al montaje.

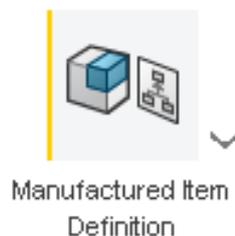


Figura 3-4. Icono de la aplicación *Manufactured Item Definition*.

El MBOM no es otra cosa que la estructura orientada al montaje que incluye todas las piezas, conjuntos y subconjuntos necesaria para fabricar el producto. Es decir, no define únicamente el listado de piezas como lo hacía el BOM, sino que mediante una estructura jerárquica define una visión global de la secuencia necesaria para la fabricación del producto en cuestión.

Entre otras funcionalidades, el módulo *Manufactured Item Definition* permite:

- Definición de ítems (de distintos tipos) y conjuntos, pudiendo definir estructuras jerárquicas de fabricación a partir del modelo o BOM de partida.
- Gestión de vínculos entre el modelo o BOM y la estructura de ítems generada.
- Asociación directa producto-ítem mediante la intuitiva técnica ‘*drag and drop*’ o asistentes de asignación más especializados.
- Edición de propiedades y gestión de cambios de diseño.

3.3.2 Process Planning

La aplicación *Process Planning* parte de la estructura de fabricación del producto o MBOM y la ordena temporalmente a modo de manual de fabricación, haciendo uso de flujos del producto y restricciones temporales entre operaciones. Es decir, nos definirá la secuencia de montaje.

Otra forma de visualizar la función de esta herramienta es pensar en el diagrama de Gantt de un proceso de fabricación, en el que cada tarea ya sea de posicionamiento de piezas, ensamblaje, manipulación o transporte de las mismas lleva asociada una duración y unas restricciones de precedencia con el resto de operaciones. Esto a su vez permite un análisis global del proceso, reorganizando las operaciones para equilibrar u optimizar el proceso en cuestión.

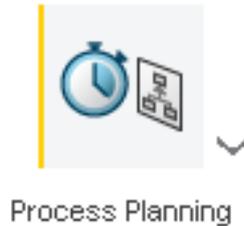


Figura 3-5. Icono de la aplicación *Process Planning*.

Entre otras funcionalidades, el módulo *Process Planning* permite:

- Definición de estructuras de sistemas y operaciones, así como el flujo de producto a través de estas.
- Gestión de vínculos entre MBOM y la estructura secuenciada de fabricación.
- Asociación directa producto-operación mediante la intuitiva técnica ‘*drag and drop*’ o asistentes de asignación más especializados.
- Gestión del diagrama de Gantt y de las restricciones o relaciones de precedencia
- Simulación, equilibrado y reorganización de las operaciones y sistemas.

3.3.3 *Equipment Allocation*

La aplicación *Equipment Allocation* es la encargada de definir y asignar los recursos necesarios para desarrollar correctamente el plan de fabricación previamente generado. Es decir, nos definirá los elementos necesarios para llevar a cabo cada una de las operaciones de la secuencia existente, sobre las distintas piezas que componen el MBOM.

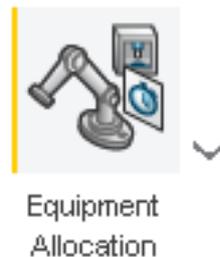


Figura 3-6. Icono de la aplicación *Equipment Allocation*.

Esta aplicación por lo tanto complementa al plan de montaje previamente definido, pudiendo crear y asignar una serie de recursos de distinto tipo como pueden ser trabajadores, robots, herramientas, bancos de trabajo e incluso una planta de fabricación o factoría, en la que distribuir espacialmente todo el proceso.

Entre otras funcionalidades, el módulo *Equipment Allocation* permite:

- Definición e importación de recursos y asignación de los mismos al sistema de fabricación.
- Gestión de vínculos entre los recursos y el plan de fabricación.
- Posicionamiento espacial de piezas, operaciones y recursos en la planta de fabricación.
- Gestión del diagrama de Gantt de asignación de recursos para la planificación de la capacidad.
- Simulación de los distintos sistemas que componen el proceso de fabricación.

3.3.4 *Assembly Evaluation*

La aplicación *Assembly Evaluation* permite simular movimientos de piezas del MBOM, definidos mediante trayectorias o ‘*tracks*’. Es decir, permite representar fielmente la localización espacial y temporal de cada elemento durante una operación determinada.



Figura 3-7. Icono de la aplicación *Assembly Evaluation*

Esta aplicación tiene una utilidad doble en dos etapas distintas del proceso:

1. Permite investigar la viabilidad del proceso de fabricación, mediante trayectorias simplificadas, permitiendo detectar montajes inviábiles en etapas tempranas de definición del MBOM.
2. Una vez que se ha comprobado que el proceso de montaje es el adecuado y se han definido ya tanto la secuencia de montaje, como la localización espacial en planta de las operaciones, esta herramienta permite generar trayectorias más sofisticadas, con el objetivo de realizar simulaciones que representen fielmente el proceso en cuestión.

Entre otras funcionalidades, el módulo *Assembly Evaluation* permite:

- Creación y gestión interactiva de trayectorias de ensamblaje
- Definición de escenarios y estados de simulación, con la posibilidad de detectar interferencias.
- Realización de animaciones o simulaciones y exportación de resultados
- Gestión de secuencias de montaje mediante interfaz de diagrama de Gantt
- Análisis del volumen barrido durante una operación
- Generación automática de un estado de ensamblaje explosionado

3.3.5 Herramientas secundarias de utilidad

En este subapartado se comentarán algunos de los espacios disponibles para el trabajo o el almacenamiento en la nube de archivos. Esto se realiza únicamente para instruir e instar al lector a utilizarlos, dada su gran utilidad a la hora de trabajar en las aplicaciones de 3DExperience.

Cabe destacar también, como consejo particular, el asignar todas aquellas aplicaciones y accesos usados frecuentemente a la sección de favoritos de la brújula de 3DExperience. Es sorprendente la cantidad de tiempo que se ahorra, al cambiar de aplicación sin tener que seleccionar la siguiente de la extensa lista de aplicaciones y servicios que ofrece la compañía.



Figura 3-8. Icono de los accesos a *3DSpace* y *3DDrive*, asignados en la sección de favoritos.

En cuanto a los espacios de trabajo y almacenamiento, cabe destacar primero la posibilidad de creación y gestión de espacios tanto privados como colaborativos que ofrece *3DEspace*, pudiendo gestionar un proyecto entero desde uno de estos espacios generados y compartirlo en cualquier momento con otros usuarios.

Otra herramienta muy útil es la nube de almacenamiento *3DDrive*, donde podemos almacenar y gestionar los archivos constituyentes de nuestro proyecto, pudiendo importarlos directamente desde la nube a la aplicación en la que nos encontremos trabajando. En mi caso particular, ha sido realmente indispensable el poder gestionar los archivos en la nube virtual desde cualquier otro ordenador, ya que el proyecto descrito en el presente trabajo se ha realizado trabajando en remoto, dado que mi ordenador personal era incapaz de computar un proyecto sobre un modelo tan extenso.

4 LISTADO DE PIEZAS DE FABRICACIÓN (MBOM) Y SECUENCIA DE ENSAMBLAJE

En el presente capítulo, se procede a describir el proceso de definición de la estructura del producto orientada a la fabricación del mismo o MBOM (*Manufacturing Bill of Material*), el cual se define mediante el uso de la aplicación de 3DExperience llamada *Manufactured Item Definition*.

Para ello, se partirá del modelo del motor Garrett TPE 331-10R proveniente de [1], previamente descrito en el Capítulo 2, el cual ha sido importado directamente en la aplicación en formato *CATProduct*. Este modelo viene definido por un BOM (*Bill of Material*) o estructura de piezas, el cual será en general distinto al MBOM mencionado.

4.1 Aplicación “Manufactured Item Definition”

El MBOM por lo tanto será el listado de todas y cada una de las piezas necesarias para conformar un producto, con una estructura jerárquica orientada a la fabricación. De esta forma, mientras que a la cabeza de la estructura tenemos el producto completo, en los extremos de cada una de las ramificaciones a las que conduce la estructura tendremos una serie de componentes y/o materiales.

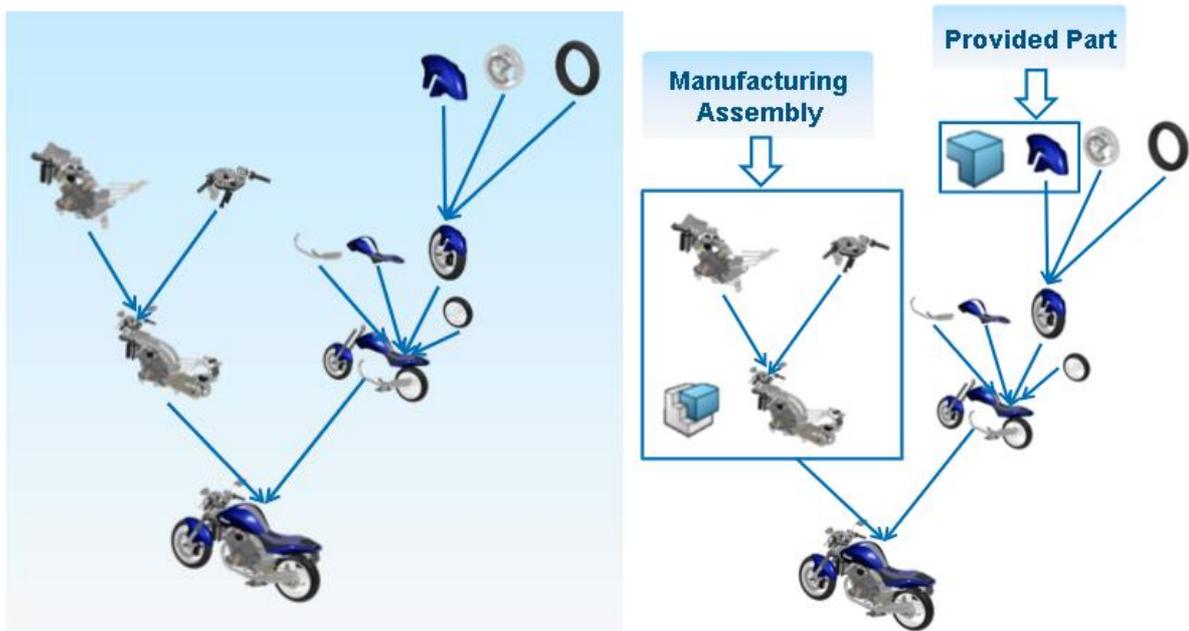


Figura 4-1. MBOM simplificado de una motocicleta y su tipología de objeto asociada [7].

Además estos elementos que componen el MBOM podrán ser de distinto tipo, algunos de los más relevantes que permite definir la aplicación *Manufactured Item Definition* son:

- *Manufacturing Assembly*: Son conjuntos ensamblados de elementos individuales y/o subconjuntos.
- *Provided Part*: Referido a elementos o piezas individuales que llegan tal cual al proceso de montaje. Estos provendrán de un proceso de fabricación concreto, externo al proceso actual.
- *Manufacturing Kit*: Se trata de un conjunto de elementos, con la salvedad de que estos no están ensamblados entre ellos. Cabe destacar que se han usado los *Manufacturing Kits* para englobar lotes de elementos repetitivos, como pueden ser tornillos y tuercas, no alargando así de forma innecesaria las posteriores etapas de asignación de operaciones y recursos a cada elemento.
- *Fasten*: Elementos de sujeción temporal, instalados para realizar operaciones concretas. Esta tipología abarca desde soldaduras en puntos concretos hasta pinzas de sujeción temporales.
- *Transform*: Referida a una etapa en la que alguno de los elementos requiere una transformación física, como puede ser un tratamiento superficial o un doblado de la pieza.
- *Continuous Provided Material*: Se trata de elementos necesarios para definir el montaje de un producto, que no pueden cuantificarse de forma ordinaria como un elemento individual. Un ejemplo sería la necesidad de rellenar un elemento con un volumen concreto de aceite industrial.
- *Continuous Manufactured Material*: Es similar al anterior, con la diferencia de que ahora sí pueden cuantificarse como elementos individuales, pero nuevamente no de forma ordinaria, ya que su fabricación es continua. Un ejemplo de esta tipología serían los cables necesarios para definir una instalación.

Esta estructura jerarquizada o parte de la misma, ha de estar asociada mediante uno o varios ‘*Scope*’ al modelo virtual del producto físico. A destacar que, el ‘o varios’, viene justificado con la posibilidad de crear vínculos a distinto nivel de la estructura o incluso de que se asignen varios productos a una misma línea de fabricación, o por el contrario, se asignen partes del mismo producto a diferentes líneas de fabricación.

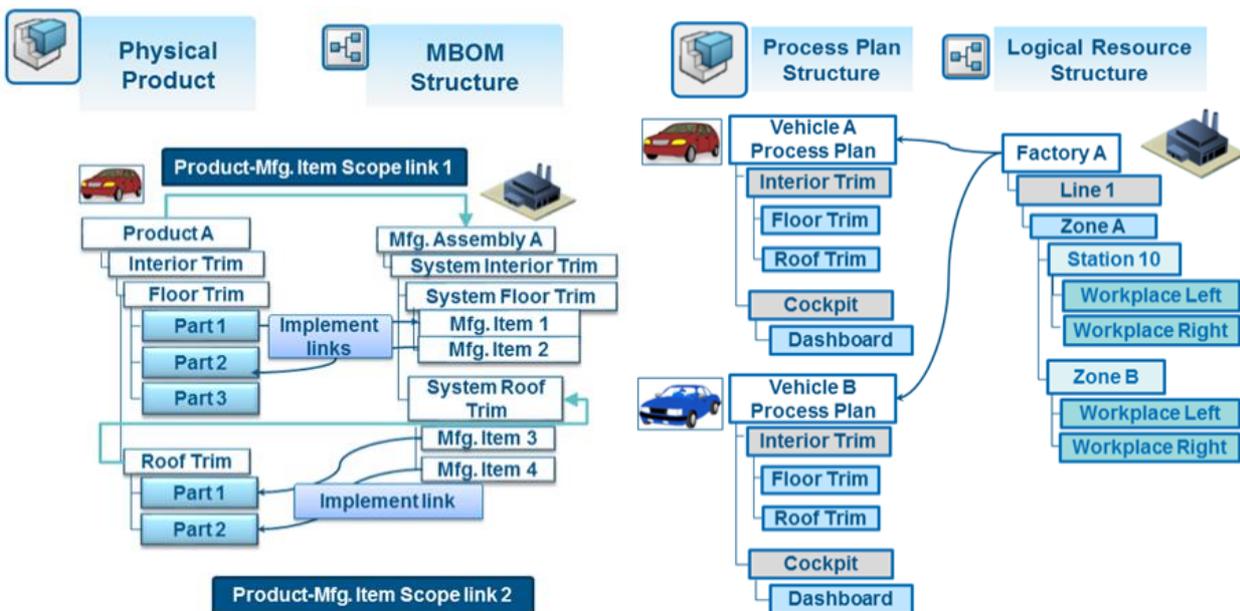


Figura 4-2. Definición de vínculos entre los ítems del MBOM y el modelo [7].

A partir de este punto, y con ambos elementos ya vinculados, el siguiente paso a realizar mediante *Manufactured Item Definition* será el de generar la estructura MBOM mediante ítems de alguna de las tipologías anteriormente citadas. Estos elementos pueden ser fácilmente ordenados e implementados unos dentro de otros a modo de árbol, pudiendo realizarse tanto manualmente mediante ‘*drag and drop*’, ya sea entre baldosas o *tiles*, o desde el árbol de montaje.

A continuación, se realiza la asignación de elementos individuales o conjuntos presentes en el modelo de partida y su BOM asociado, hacia la nueva estructura que define el MBOM de nuestro producto. Nuevamente existen varias formas de llevar a cabo este cometido, desde una asignación manual mediante ‘*drag and drop*’, hasta mediante asistentes y herramientas específicas como ‘*Assignment Manager*’ o ‘*Smart Zoom*’.

Una vez más, cabe recordar la utilidad de la aplicación de 3DExperience *Assembly Evaluation*, tanto para ayudarnos en la toma de decisiones a la hora de definir la estructura, como para comprobar la viabilidad del proceso de montaje y de su estructura MBOM asociada.

Otra herramienta muy útil para comprobar el estado de asignación de cada elemento, individual o conjunto de nuestro modelo de partida, hacia la estructura MBOM definida, es *B. I. Essentials*; en concreto su apartado *Product Assignment Status*, cuyo criterio está mostrado en la Figura 4-3. Esta herramienta identifica mediante colores el estado de asignación de los elementos, sirviendo entre otras cosas, de apoyo para comprobar si se nos ha olvidado asignar alguna pieza.

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

Figura 4-3. Clasificación por colores del estado de asignación del producto mediante *B.I. Essentials* [7].

4.2 Tutoriales en la plataforma Eduspace

Previo a la implementación del motor Garrett TPE 331-10R en la aplicación, se ha procedido a realizar una serie de tutoriales recomendados, recogidos en ‘Process Planner, DELMIA Manufactured Item Definition Essentials’, acerca de las distintas herramientas y funcionalidades que el módulo *Manufactured Item Definition* presenta.

Estos tutoriales, se encuentran almacenados en la web de Eduspace [7] y, si bien no están del todo actualizados respecto a la versión R2010x empleada, han sido de gran utilidad a la hora de obtener una visión general de las capacidades de la herramienta, siendo bastante ejemplificativos a la hora de mostrar las herramientas disponibles y las posibles utilidades de cada una.

Para comenzar se ha evaluado un caso práctico sencillo, en el que se ha definido el vínculo o *scope* entre un modelo de motor *3.5HP_Engine_Scope* y una baldosa “raíz”, a la que se le han realizado operaciones de añadir predecesores, ordenarlos y eliminarlos, practicando de esta forma las funciones más sencillas de la presente herramienta.

También se ha practicado modificando la configuración de la aplicación, cosa que puede no parecer demasiado importante, pero que se ha visto que es indispensable, ya que uno de los saltos que ha experimentado 3DExperience respecto a las interfaces de softwares anteriores como CATIA V5, es hacerla excesivamente

simplificada e intuitiva, por lo que si se desea hacer una operación algo más avanzada o permitir ciertos parámetros sobre las mismas, se ha comprobado que es indispensable modificar la configuración; cosa que apenas se modificaba en los softwares anteriores.

A continuación se ha interactuado con el comando *Spreadsheet*, función muy útil a la hora de ver el desglose del MBOM, generado en forma de tabla con sus parámetros asociados, ya que este permite gestionar la citada estructura desde la misma tabla.

Se ha practicado también la definición de estructuras MBOM con elementos de distinto tipo, tanto en el caso anterior del motor *3.5HP_Engine*, como en el caso del taladro portátil *Cordless_Drill*.

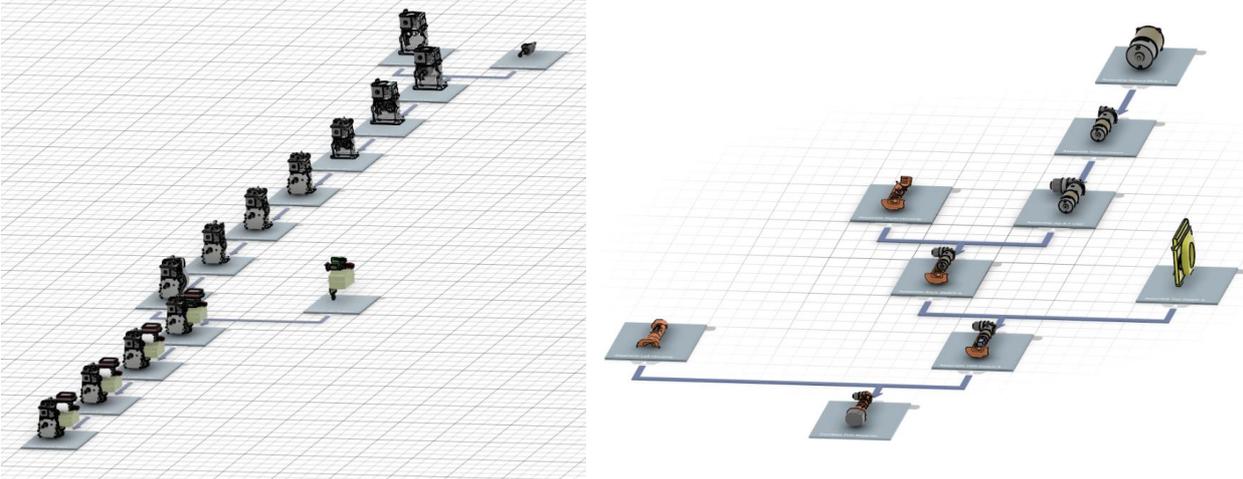


Figura 4-4. Casos prácticos propuestos '3.5HP_Engine' (izquierda) y 'Cordless_Drill' (derecha).

En ambos casos prácticos propuestos por los tutoriales, se han asignado los elementos del modelo de partida a la estructura MBOM, generada previamente. Se han empleado para ello distintas herramientas de asignación entre las que destacan:

- Método de asignación manual mediante *'drag and drop'*, tanto entre baldosas como desde el árbol de montaje. Cabe recomendar al lector el uso de F3 para que aparezca y desaparezca el árbol de montaje.
- Asignación mediante *Assignment Manager*.
- Asignación mediante *Assembly Assignment Assistant*.
- Asignación mediante *Smart Zoom*.

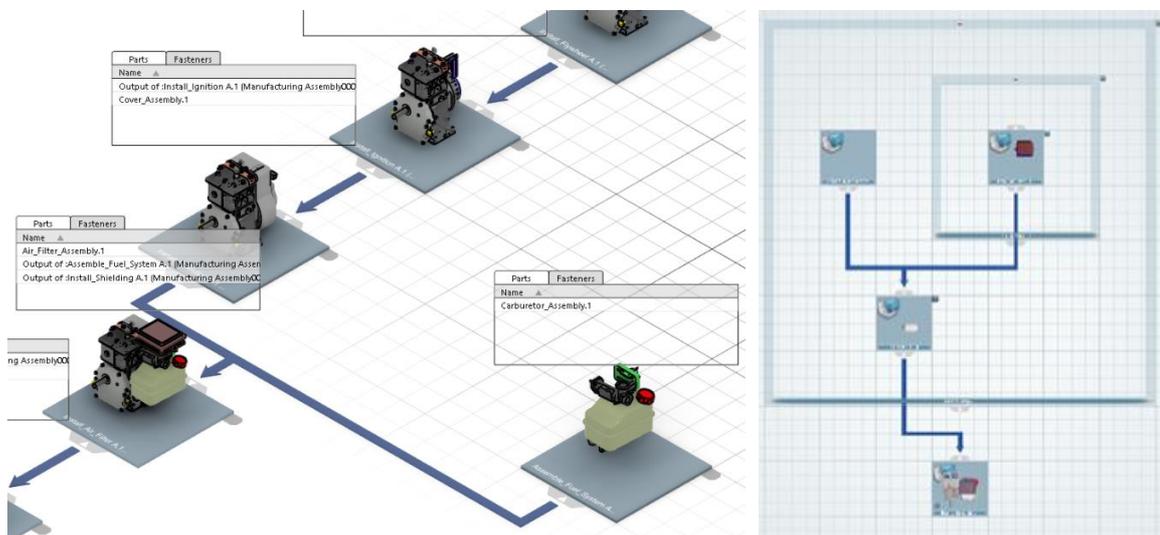


Figura 4-5. Ejemplos de uso del comando *F5 List* (izquierda) y de creación y gestión de grupos (derecha).

Por último, cabe destacar la realización de ejercicios prácticos con herramientas de gestión de conjuntos, como puede ser la de crear grupos, bastante útil para no sobrecargar la interfaz visual y tener nuestra estructura organizada sin generar operaciones nuevas; así como las herramientas de visualización de los conjuntos asignados y verificación del estado de asignación del producto, como pueden ser *F5 List* y *B. I. Essentials* respectivamente.

4.3 Definición del MBOM del motor

Tras comprender la herramienta y haber realizado los casos prácticos de ejemplo indicados en los tutoriales, es el momento de aplicar las técnicas aprendidas al modelo del motor Garrett TPE 331-10R, objetivo principal del presente trabajo. Cabe destacar que los resultados que se muestran en todos los capítulos son los finales, a los que se ha llegado tras un proceso iterativo el cual no se detallará por no extender innecesariamente la presente memoria, sí incluyéndose algunos comentarios relevantes del proceso.

Para ello, comenzaremos por importarlo desde el propio módulo *Manufactured Item Definition* en formato *CATProduct*, tal y como se ha indicado previamente. Se empleará el comando *Import...>CATIA File* para esto, y posteriormente el comando *Open* para abrir el modelo en la interfaz 3D propia del presente software. Finalizaremos este paso, previo a la definición del MBOM, insertando el modelo en el contexto PPR (*Product, Process and Resource*), mediante el comando *Insert Product> Existing Product...*

Con este breve paso previo a la definición de la estructura MBOM, ya tenemos definido el modelo y su BOM asociado dentro de la interfaz.

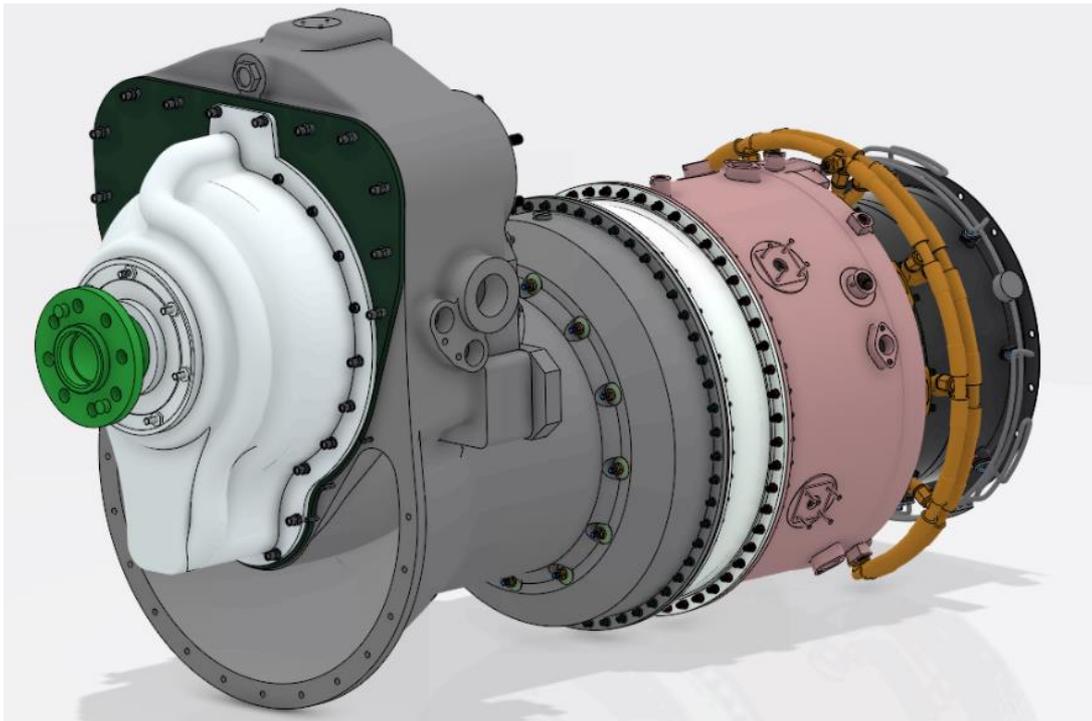


Figura 4-6. Modelo del motor Garrett TPE 331-10R importado en la plataforma.

Lo siguiente a realizar, es crear el vínculo o *scope* entre el modelo completo del motor ‘*Garrett TPE 331-10R Turboprop Engine*’ y la baldosa o *tile* principal en *Manufactured Item Definition*, denominada ‘*Garrett TPE 331-10R Complete Assembly*’, que será del tipo *Manufacturing Assembly*. Solo entonces nos aparecerá representado el motor completo sobre dicha baldosa principal.

La elección de crear únicamente un *scope* entre el modelo y la raíz de la estructura MBOM, viene justificada con que son coincidentes tanto las piezas como el número de estas necesario para pasar del BOM al MBOM, así como que un solo vínculo se ha visto suficiente para desempeñar todo el proceso, ya que, desde la creación del modelo en [1], se tuvo en mente el posterior ensamblaje del mismo, siendo un proceso algo distinto al buscado con el MBOM pero que respetaba de forma aproximada la estructuración de los conjuntos.

A continuación, se procede a realizar la estructura jerárquica de *tiles* o baldosas que componen el MBOM del motor. Cabe destacar que, al ser el autor del presente trabajo el mismo que el del modelo en [1], se conocía ya de manera extensa tanto el despiece o BOM del motor como la secuencia aproximada de montaje del mismo, viniendo estos conocimientos bastante reforzados con la realización 2 años atrás de prácticas en el Ejército del Aire, en concreto en la Maestranza Aérea de Sevilla, donde se repara este motor en concreto; por lo que se pudo observar parte del proceso de desmontaje/montaje, tanto durante la realización de [1] como en las citadas prácticas.

El citado MBOM se definirá conforme al capítulo de montaje tras revisión general u *Overhaul*, descrito en el Manual de Revisión General propio del motor Garrett TPE 331-5 [2]. Nuevamente cabe recordar que el modelo empleado es una versión más reciente del motor descrito en el manual, por lo que algunas de las piezas no se corresponden con las detalladas en el mismo. Es por ello que en las secciones del manual que describen la secuencia de montaje de elementos distintos a los contenidos en el modelo, se ha empleado tanto la citada experiencia propia que tengo con esta versión del motor, como la lógica y de forma puntual la herramienta *Assembly Evaluation*, para intentar definir una secuencia de montaje lo más lógica posible y comprobar posteriormente que esta es viable.

Estos hechos justifican que el módulo *Assembly Evaluation* se haya empleado únicamente como soporte puntual en las etapas previas a la definición del MBOM, pudiendo comprobar si la secuencia de montaje que se tenía en mente para los elementos que no se corresponden con los descritos en el manual era correcta. Por este motivo dicho módulo se detalla en el Capítulo 7 de la presente memoria, ya que se le ha dado un uso principal de generar las trayectorias específicas, con las piezas, operaciones y recursos ya distribuidos en la planta de montaje; con el objetivo final de generar y exportar simulaciones que ejemplifiquen lo más fielmente el proceso dadas las limitaciones existentes.

Por lo tanto, el objetivo del proyecto no reside en buscar la secuencia de montaje y su MBOM asociado que optimice el proceso, sino de representar de la forma más fidedigna posible dicho proceso de acuerdo al proceso real. Esto conlleva una investigación previa de los manuales disponibles [2] y [6], así como un proceso de selección de las operaciones que aplican a las piezas modeladas y una adaptación simplificada de mismas, de acuerdo a las hipótesis de partida y simplificaciones descritas en el Capítulo 1.

Otro criterio a destacar, es la estructuración de algunos *Manufacturing Assembly* por lotes de montaje definidos en el manual de Revisión general [2]. Cada vez que el citado manual diferenciaba una parte del montaje de otra que venía a continuación, ya fuese por una etapa de verificación del montaje correcto por parte del operario, por un cambio de herramientas o disposición de las piezas o por cualquier otro motivo, se ha configurado dicho lote de montaje dentro de un *Manufacturing Assembly*, al que posteriormente se le ha asignado una operación de ensamblaje o instalación que englobase dicho ensamblaje correcto del lote, antes de proseguir con el siguiente.

En cuanto a los elementos que componen el MBOM, se han definido mediante los siguientes tipos:

- *Provided Part*: Elementos o piezas individuales, las cuales llegan ya en su estado final al operario para ser montadas como parte de algún conjunto determinado.
- *Manufacturing Assembly*: Conjuntos que se ensamblan juntos antes de pasar a la siguiente etapa del proceso de montaje.
- *Manufacturing Kit*: Conjunto de elementos que no están ensamblados entre ellos. Se ha empleado para definir lotes de elementos repetitivos, como tornillos o tuercas. Tal y como se ha citado anteriormente, esto evita alargar de forma innecesaria las posteriores etapas de asignación de operaciones y recursos a cada elemento individual, pudiendo asignarse directamente a los lotes de tornillos y tuercas por simplificación.

En el proceso de asignación de los diferentes elementos del modelo a los *tiles* o baldosas del MBOM virtual, cabe destacar que se ha realizado en su gran mayoría manualmente mediante el método '*drag and drop*', es decir, arrastrando las piezas a los distintos ítems de destino. Alternativamente se ha empleado la funcionalidad *Assignment Manager* a la hora de buscar piezas concretas por su nombre, sin tener que buscarlas en la estructura en forma de árbol que define el modelo y su BOM asociado.

Este mismo método ‘*drag and drop*’ se ha reutilizado a la hora de ordenar los distintos niveles de la estructura MBOM, bajo el criterio de intentar ordenar los elementos de izquierda a derecha tal y como se encontrarían localizados entre ellos en la realidad. Es decir, considerando la izquierda el frontal del motor (donde se instalaría la Hélice) y la derecha como la parte trasera del motor (donde está la Tobera de salida de gases); se han ordenado los distintos elementos de forma que se respete su posición espacial relativa a los demás elementos del mismo nivel, de forma que visualmente puede comprenderse un poco más la estructura y secuencia asociada en el montaje de los mismos.

Otra herramienta muy útil a la hora de la asignación de elementos entre estructuras es *3D View*, la cual puede verse con el ejemplo de la Cámara de combustión en la Figura 4-7. Esta permite ver una representación 3D de cada pieza o conjunto que seleccionemos y facilita la ardua tarea de identificar los elementos, en caso de no recordar su nombre o de dudar entre varios de definición similar.

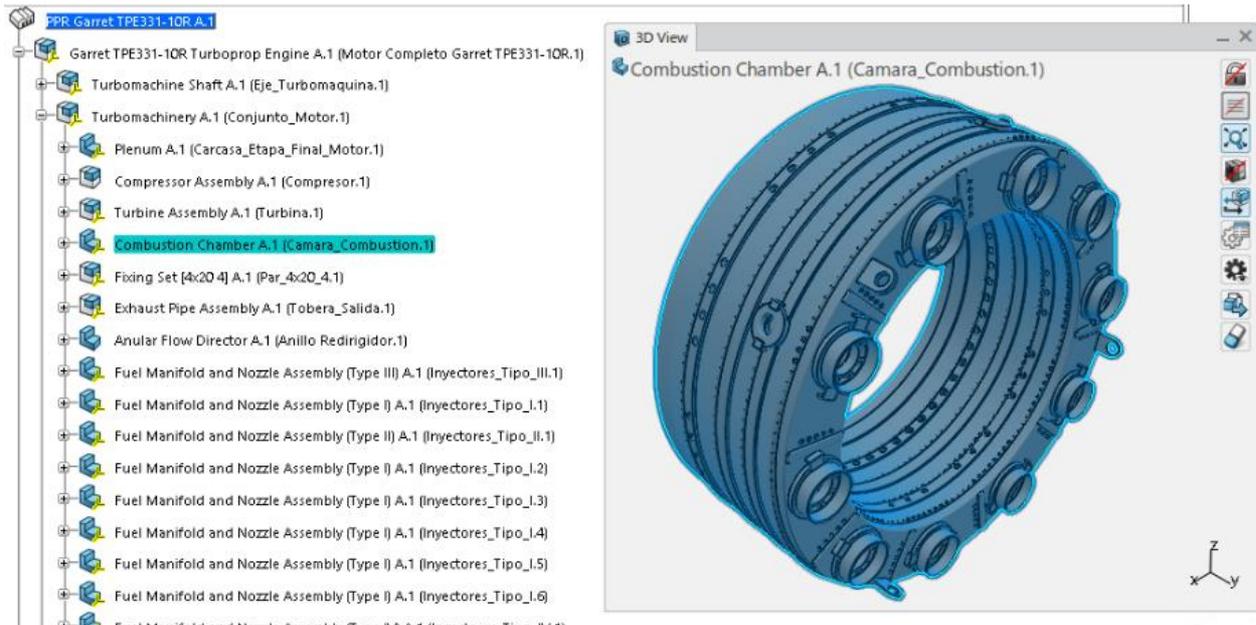


Figura 4-7. Uso de la herramienta 3D View para identificar la Cámara de combustión.

Respecto a los *Manufacturing Kits*, se recomienda encarecidamente su uso ya que, en una primera versión de la estructura MBOM se decidió asignar los elementos repetitivos como tornillos o tuercas mediante piezas individuales o *Provided Part*. Esto alargó en sobremanera, tanto la etapa de asignación de operaciones y relaciones de precedencia a cada elemento de forma individual como la etapa de asignación de recursos y distribución espacial de los elementos en planta. Tras rectificar y modificar el trabajo, se ha considerado que fue una pérdida grande de tiempo haberlos definido de forma individual, por lo que se recomienda al lector emplear *Manufacturing Kits* desde un principio y que pueda así optimizar su tiempo.

Para definir la estructura MBOM se ha seguido por lo tanto un proceso de lectura inversa del manual de Revisión general [2], ya que se ha partido de las etapas finales del montaje (asociadas a conjuntos cercanos a la cabeza del MBOM o montaje final) y se ha seguido el manual desde dicho final hasta el principio de la etapa de montaje (asociado al final de la ramificación más lejana de la estructura MBOM). De esta forma podemos optimizar nuestro tiempo a la hora de generar la estructura y cada una de sus ramificaciones.

Finalmente la estructura MBOM generada es la presentada en la Figura 4-8, donde se muestran únicamente los conjuntos, grupos y *Manufacturing Kits* definidos (ocultando todas las piezas individuales), ya que al mostrar todos los elementos individuales, se hace inviable la representación dada la enorme cantidad de piezas que componen el modelo del motor.

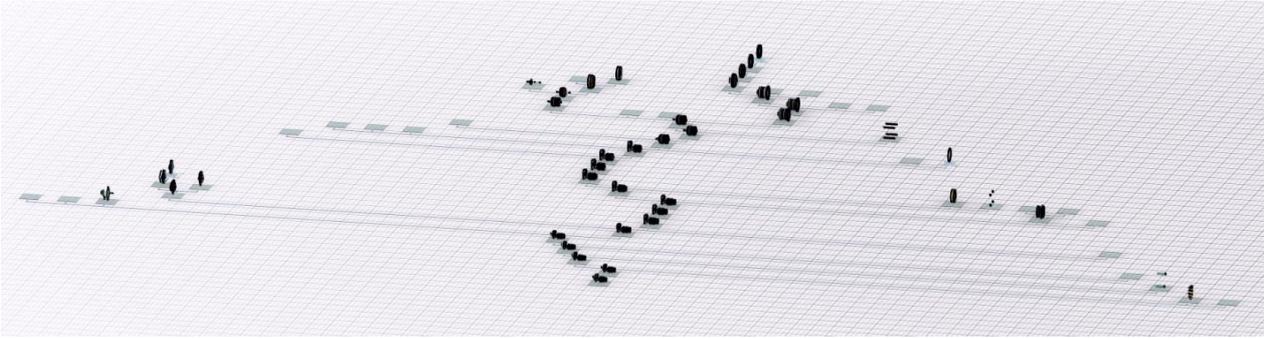


Figura 4-8. Vista de la estructura MBOM con todas las piezas individuales ocultas.

Aun así, puede observarse que la vista general del proceso no es lo suficientemente buena, dada la cantidad de conjuntos de montaje o *Manufacturing Assembly* existentes.

En las siguientes Figuras 4-9, 10 y 11 podemos ver un desglose más detallado de la estructura completa que define el MBOM. Se observa que los primeros pasos de montaje vienen asociadas a los elementos de la primera etapa de compresor centrífugo, tanto en sus elementos rotatorios como '*Main Shaft*' y '*First Stage Compressor Impeller*', como en sus elementos fijos '*Compressor Housing*' o '*Second Stage Compressor Diffuser Vane*'.

El proceso sigue con el montaje del resto del Compresor, la instalación de la Cámara de combustión y el *Plenum* o carcasa de la parte final del motor. A continuación, se instala la Turbina, conjunto previamente montado en lo que vamos a considerar una estación aparte a la del montaje principal, ya que no requiere elementos de este y se busca agilizar el proceso sin perder de vista que estamos ante un proceso de producción muy reducido o incluso unitario, por lo que habrá 3-4 trabajadores como mucho en todo el proceso.

Tras instalar la turbina, se procede a montar el '*Accessory Drive Housing*' y los elementos de sujeción delanteros del eje, que se instalan en su interior.

A continuación se comienza con los elementos de la Tobera de salida y los elementos de sujeción trasera asociados, encargados de proporcionar un apoyo mediante rodamiento de rodillos al eje del motor. Este montaje se alternará con el de la *Gearbox* con el '*Diaphragm*' y el '*Nose Cone*'.

Por último, se disponen los elementos finales de la tobera de salida, cerrando con el '*Tail Cone*' y se sitúa el conjunto de mangueras de combustible y sus inyectores asociados.



Figura 4-9. Estructura completa del MBOM definido (Parte superior).



Figura 4-10. Estructura completa del MBOM definido (Parte intermedia).

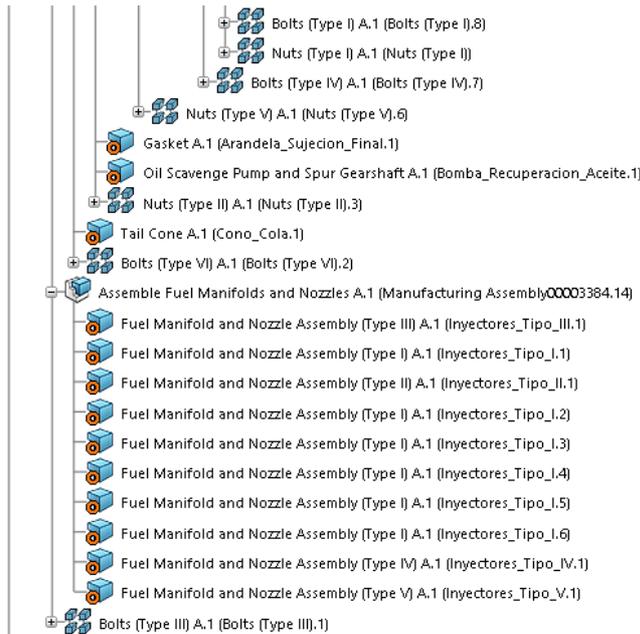


Figura 4-11. Estructura completa del MBOM definido (Parte inferior).

Donde ahora sí podemos hacernos una idea de la magnitud del modelo y la complicación del MBOM.

Se ha empleado también la funcionalidad de crear grupos en los elementos repetitivos (a excepción de los lotes de tornillos y tuercas que vienen definidos por *Manufacturing Kits*), con el objetivo de no extender innecesariamente la representación visual, juntándolos en una misma baldosa, pero con la ventaja de que un grupo no genera operaciones como tal en las etapas posteriores de secuenciación del montaje, por lo que podremos asignarles operaciones individuales al no tratarse de un número excesivo de elementos.

A continuación, se procederá a mostrar de forma individual cada uno de los conjuntos relevantes del árbol de montaje, así como un desglose de los componentes del mismo (en los lotes de elementos el nº es de piezas).

4.3.1 Instalación de la Segunda etapa del compresor

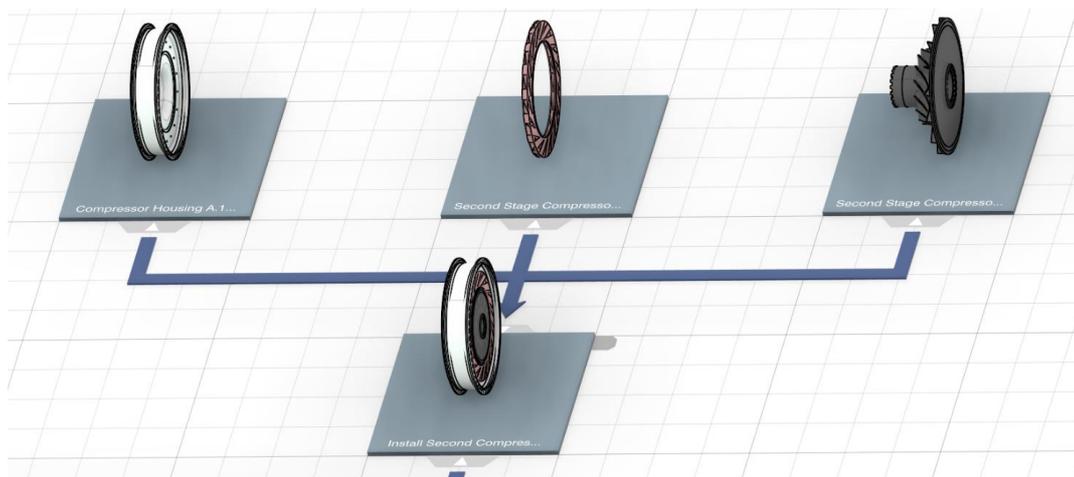


Figura 4-12. Componentes del conjunto ‘Install Compressor Second Stage’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* ‘Compressor Housing’ (x1)
- *Provided Part* ‘Second Stage Compressor Diffuser Vane’ (x1)
- *Provided Part* ‘Second Stage Compressor Impeller’ (x1)

Tabla 4-1. Desglose de ‘Install Compressor Second Stage’ y sus cantidades.

4.3.2 Instalación del Enlace de transición

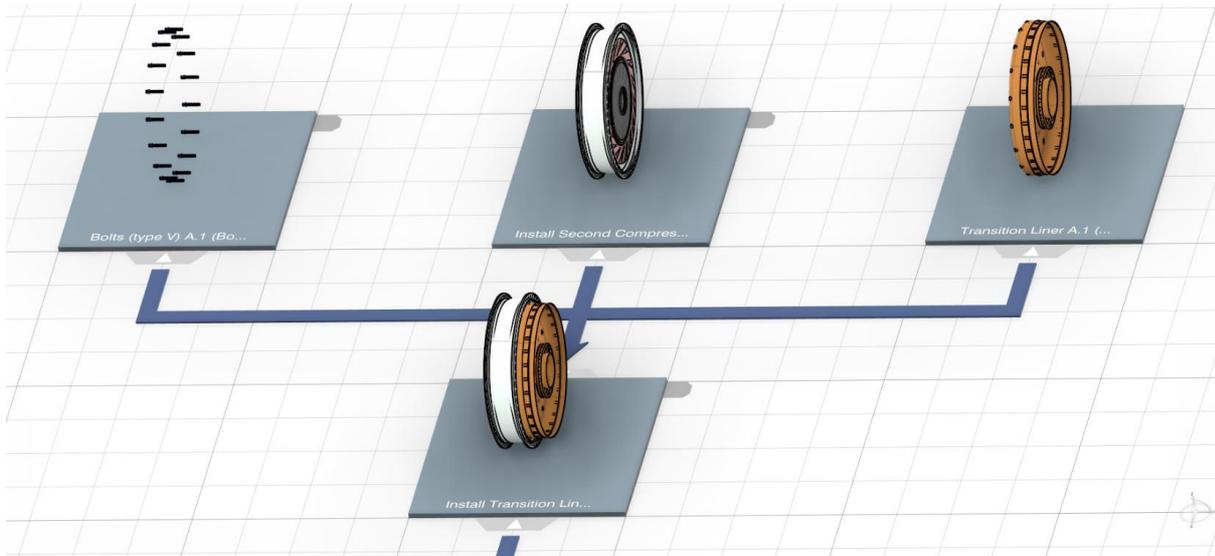


Figura 4-13. Componentes del conjunto 'Install Transition Liner'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Kit* 'Bolts (Type V)' (x17)
- *Manufacturing Assembly* 'Install Compressor Second Stage' (x1)
- *Provided Part* 'Transition Liner' (x1)

Tabla 4-2. Desglose de 'Install Transition Liner' y sus cantidades.

4.3.3 Ensamblaje de la Primera etapa de rotor centrífugo del compresor

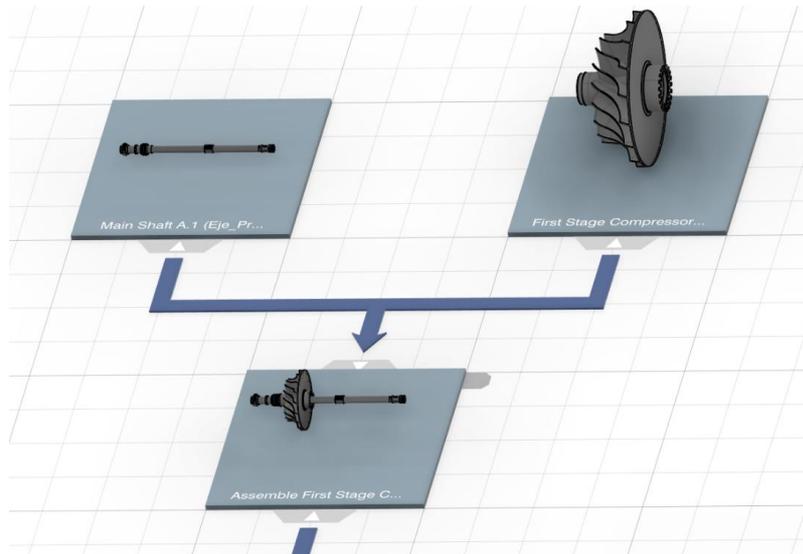


Figura 4-14. Componentes del conjunto 'Assemble First Stage Compressor Impeller'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* 'Main Shaft' (x1)
- *Provided Part* 'First Stage Compressor Impeller' (x1)

Tabla 4-3. Desglose de 'Assemble First Stage Compressor Impeller' y sus cantidades.

4.3.4 Instalación del Difusor y el conjunto rotativo parcialmente ensamblado

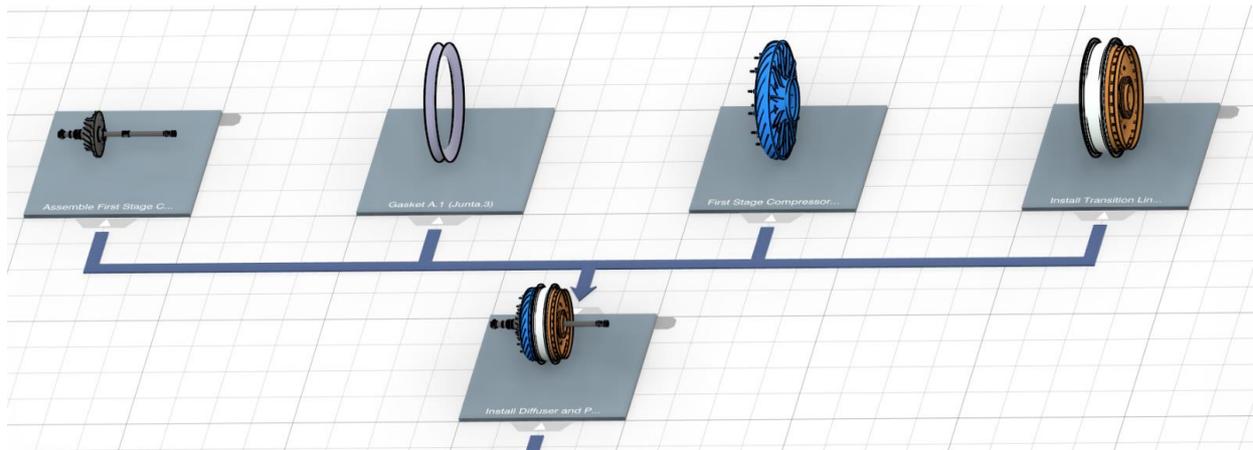


Figura 4-15. Componentes del conjunto *'Install Diffuser and Partially Assembled Rotating Group'*.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* 'Assemble First Stage Compressor Impeller' (x1)
- *Provided Part* 'Gasket' (x1)
- *Provided Part* 'First Stage Compressor Diffuser' (x1)
- *Manufacturing Assembly* 'Install Transition Liner' (x1)

Tabla 4-4. Desglose de *'Install Diffuser and Partially Assembled Rotating Group'* y sus cantidades.

4.3.5 Instalación de la Cámara de combustión y el Anillo redirector de flujo

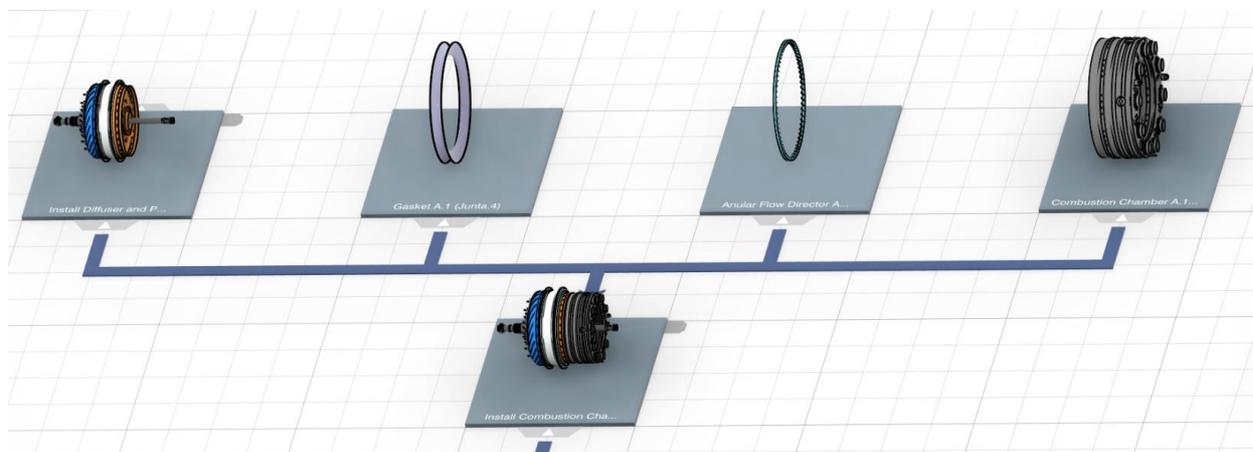


Figura 4-16. Componentes del conjunto *'Install Combustion Chamber and Flow Director'*.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* 'Install Diffuser and Partially Assembled Rotating Group' (x1)
- *Provided Part* 'Gasket' (x1)
- *Provided Part* 'Anular Flow Director'
- *Provided Part* 'Combustion Chamber' (x1)

Tabla 4-5. Desglose de *'Install Combustion Chamber and Flow Director'* y sus cantidades.

4.3.6 Ensamblaje de la Cubierta de la primera etapa de rotor de la turbina

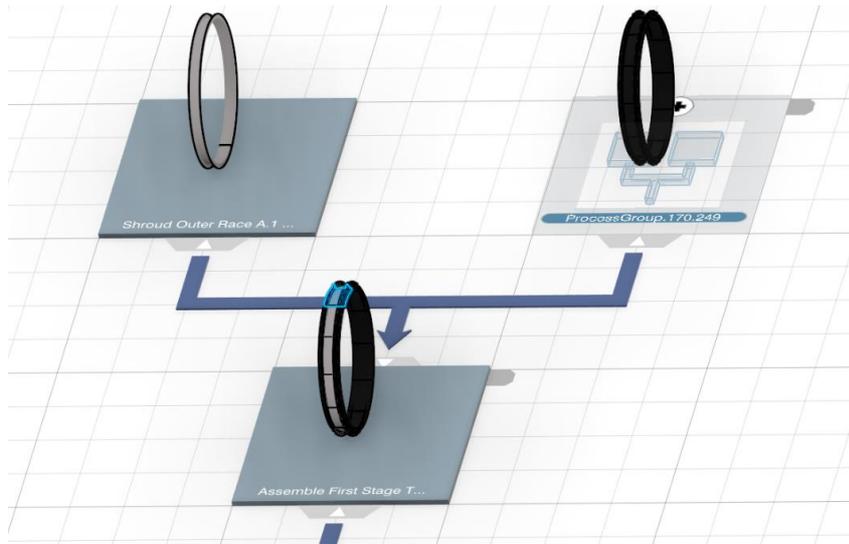


Figura 4-17. Componentes del conjunto 'Assemble First Stage Turbine Wheel Shroud'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* 'Shroud Outer Race' (x1)
- *Provided Part* 'Shroud' en un grupo (x12)

Tabla 4-6. Desglose de 'Assemble First Stage Turbine Wheel Shroud' y sus cantidades.

4.3.7 Ensamblaje de la Primera etapa de estátor de la turbina

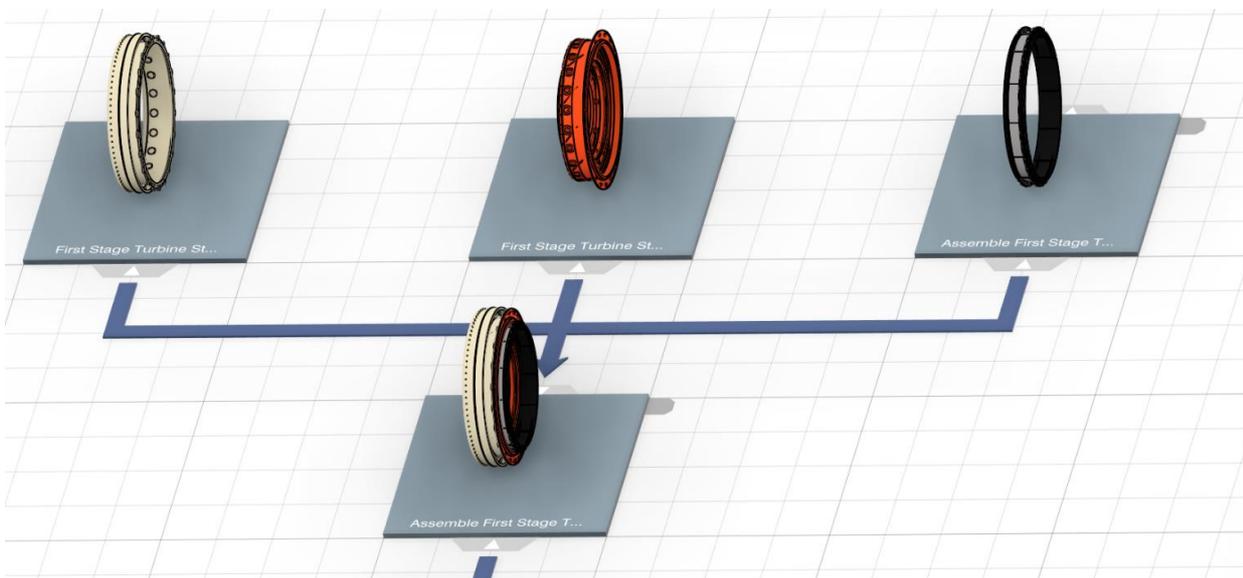


Figura 4-18. Componentes del conjunto 'Assemble First Stage Turbine Stator'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* 'First Stage Turbine Stator Shroud' (x1)
- *Provided Part* 'First Stage Turbine Stator' (x1)
- *Manufacturing Assembly* 'Assemble First Stage Turbine Wheel Shroud' (x1)

Tabla 4-7. Desglose de 'Assemble First Stage Turbine Stator' y sus cantidades.

4.3.8 Ensamblaje de las Primeras etapas de la turbina

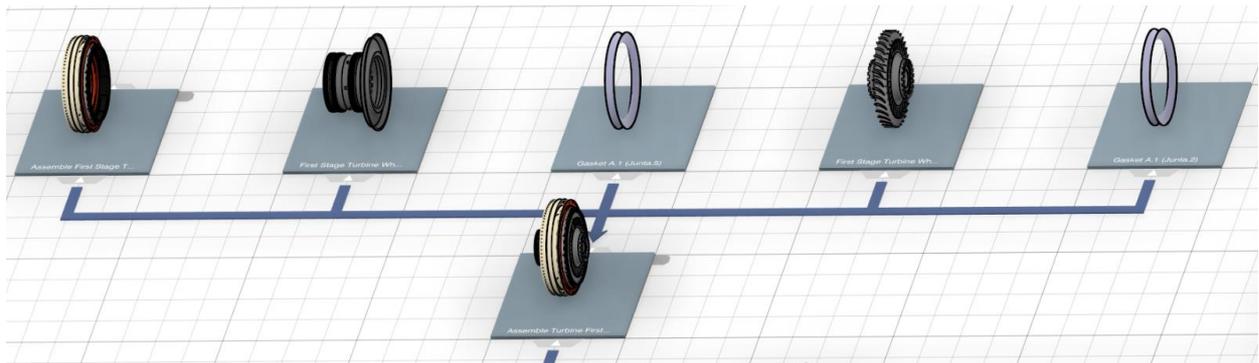


Figura 4-19. Componentes del conjunto ‘*Assemble Turbine First Stages*’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* ‘Assemble First Stage Turbine Stator’ (x1)
- *Provided Part* ‘First Stage Turbine Wheel Support’ (x1)
- *Provided Part* ‘Gasket’ (x2)
- *Provided Part* ‘First Stage Turbine Wheel’ (x1)

Tabla 4-8. Desglose de ‘*Assemble Turbine First Stage*’ y sus cantidades.

4.3.9 Instalación del Soporte de la turbina

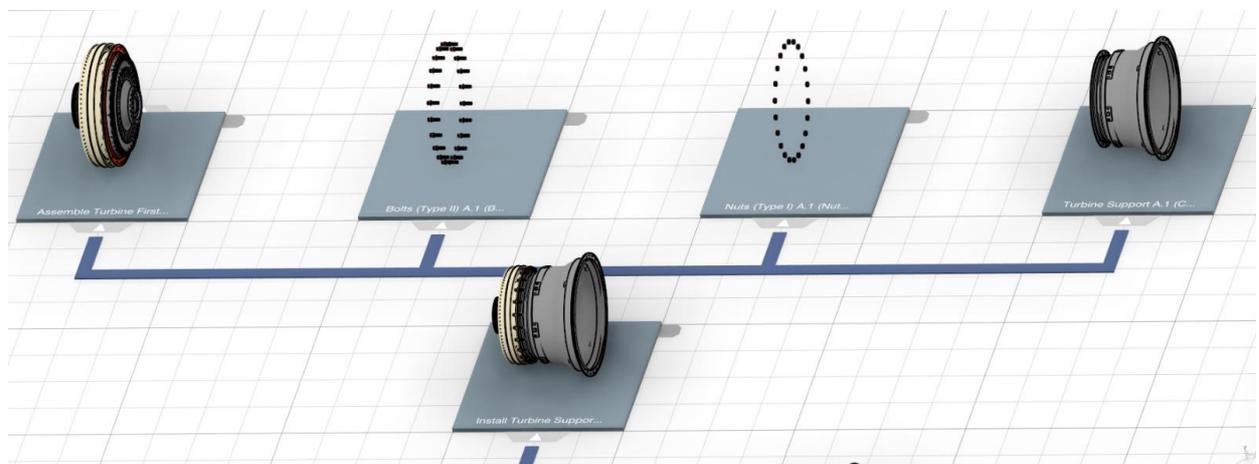


Figura 4-20. Componentes del conjunto ‘*Install Turbine Support*’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* ‘Assemble Turbine First Stages’ (x1)
- *Manufacturing Kit* ‘Bolts (Type II)’ (x17)
- *Manufacturing Kit* ‘Nuts (Type I)’ (x17)
- *Provided Part* ‘Turbine Support’ (x1)

Tabla 4-9. Desglose de ‘*Install Turbine Support*’ y sus cantidades.

4.3.10 Instalación de la Segunda etapa de estátor de la turbina

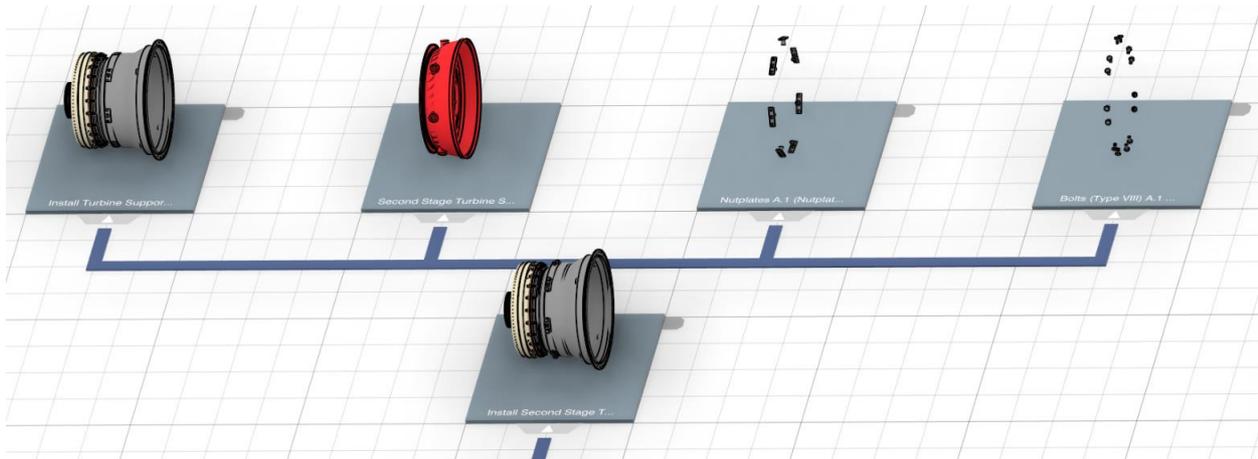


Figura 4-21. Componentes del conjunto ‘*Install Second Stage Turbine Stator*’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* ‘Install Turbine Support’ (x1)
- *Provided Part* ‘Second Stage Turbine Stator’ (x1)
- *Manufacturing Kit* ‘Nutplates’ (x17)
- *Manufacturing Kit* ‘Bolts (Type VIII)’ (x17)

Tabla 4-10. Desglose de ‘*Install Second Stage Turbine Stator*’ y sus cantidades.

4.3.11 Instalación de las Últimas etapas de la turbina

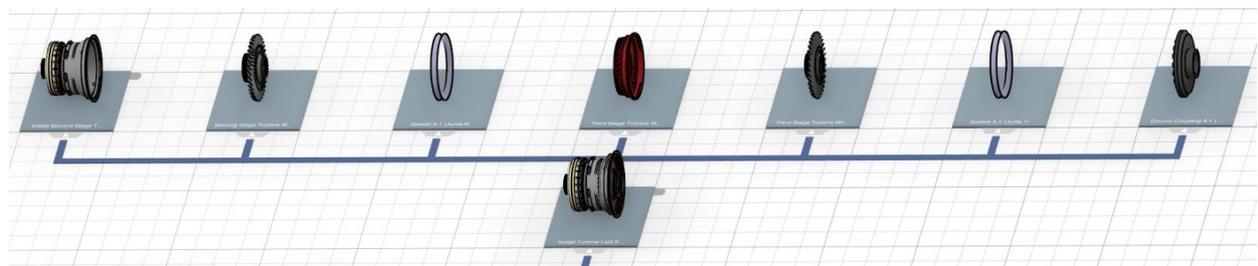


Figura 4-22. Componentes del conjunto ‘*Install Turbine Last Stages*’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* ‘Install Second Stage Turbine Stator’ (x1)
- *Provided Part* ‘Second Stage Turbine Wheel’ (x1)
- *Provided Part* ‘Gasket’ (x2)
- *Provided Part* ‘Third Stage Turbine Stator’ (x1)
- *Provided Part* ‘Third Stage Turbine Wheel’ (x1)
- *Provided Part* ‘Courvic Coupling’ (x1)

Tabla 4-11. Desglose de ‘*Install Turbine Last Stages*’ y sus cantidades.

4.3.12 Instalación de Turbina y el *Plenum*

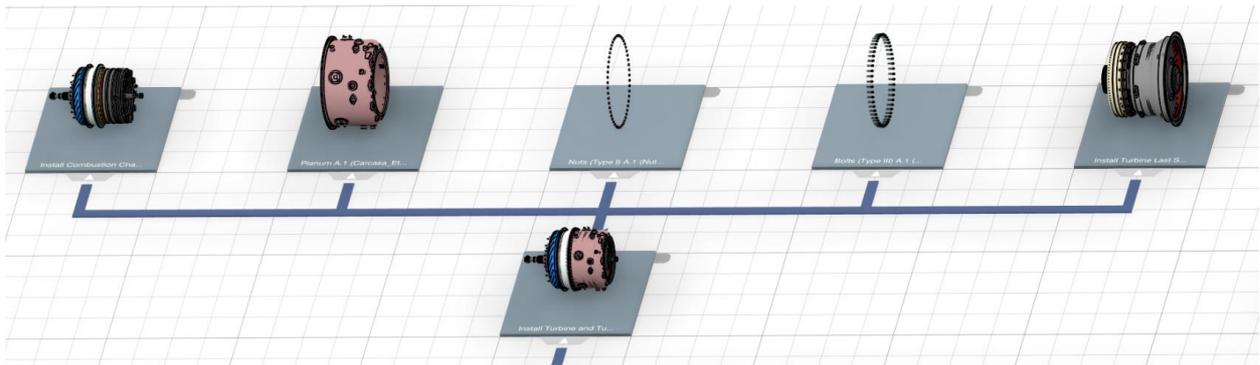


Figura 4-23. Componentes del conjunto ‘*Install Turbine and Turbine Plenum*’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* ‘Install Combustion Chamber and Flow Director’ (x1)
- *Provided Part* ‘Plenum’ (x1)
- *Manufacturing Kit* ‘Nuts (Type I)’ (x54)
- *Manufacturing Kit* ‘Bolts (Type III)’ (x54)
- *Manufacturing Assembly* ‘Install Turbine Last Stages’ (x1)

Tabla 4-12. Desglose de ‘*Install Turbine and Turbine Plenum*’ y sus cantidades.

4.3.13 Instalación del Soporte del cojinete montado en el eje principal

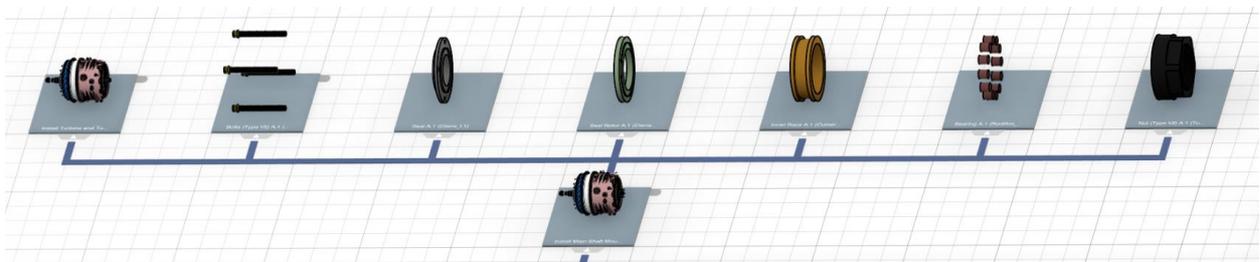


Figura 4-24. Componentes del conjunto ‘*Install Main Shaft Mounted Bearing Support*’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* ‘Install Combustion Chamber and Flow Director’ (x1)
- *Manufacturing Kit* ‘Bolts (Type VII)’ (x4)
- *Provided Part* ‘Seal’ (x1)
- *Provided Part* ‘Seal Rotor’ (x1)
- *Provided Part* ‘Bearing Inner Race’ (x1)
- *Provided Part* ‘Bearing’ (x1)
- *Provided Part* ‘Nut (Type VII)’ (x1)

Tabla 4-13. Desglose de ‘*Install Main Shaft Mounted Bearing Support*’ y sus cantidades.

4.3.14 Instalación de la segunda etapa del Compresor

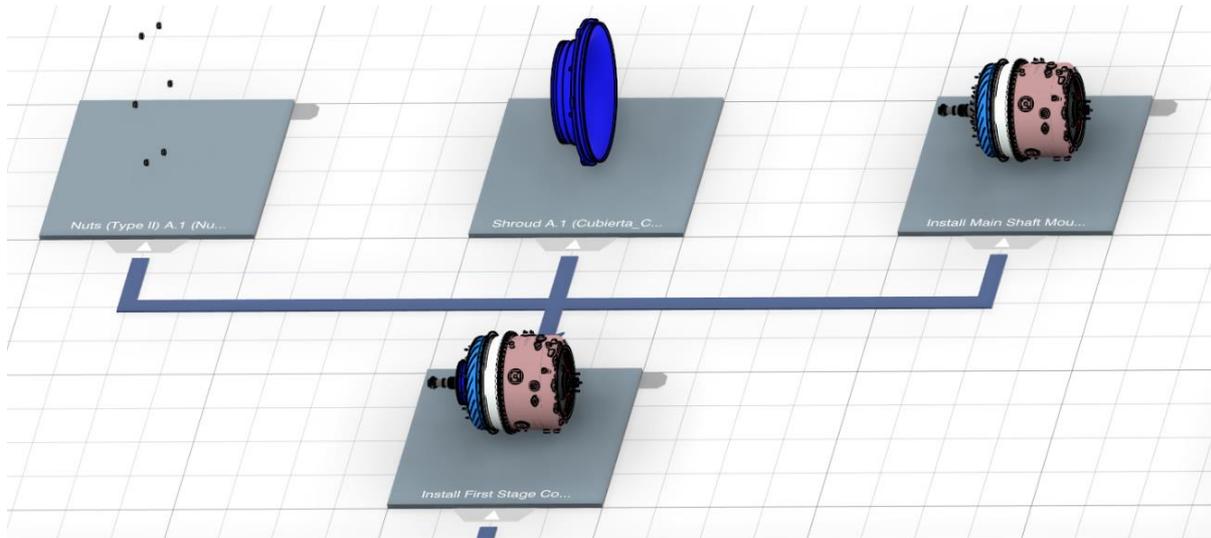


Figura 4-25. Componentes del conjunto *'Install First Stage Compressor Impeller Shroud'*.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* 'Install Main Shaft Mounted Bearing Support' (x1)
- *Provided Part* 'Shroud' (x1)
- *Manufacturing Kit* 'Nuts (Type II)' (x6)

Tabla 4-14. Desglose de *'Install First Stage Compressor Impeller Shroud'* y sus cantidades.

4.3.15 Instalación de la Carcasa de la unidad de accesorios y Gearbox

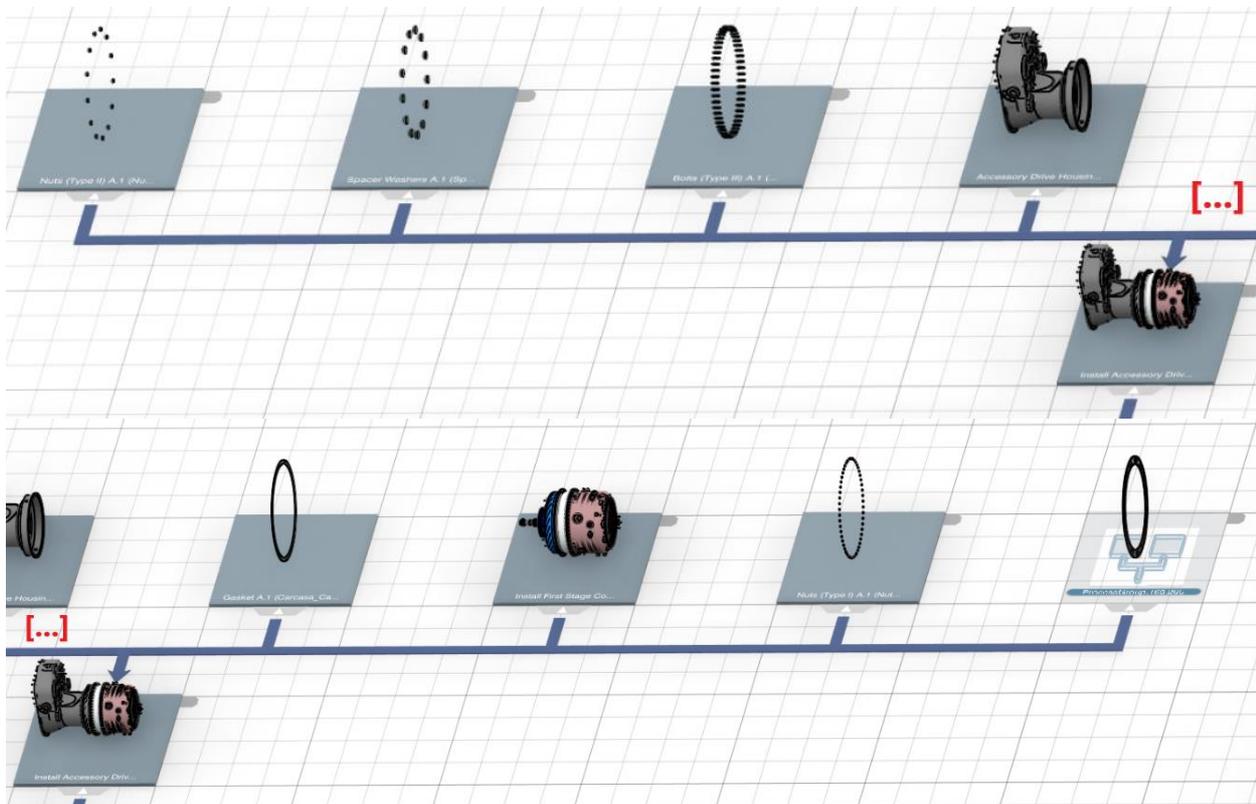


Figura 4-26. Componentes del conjunto *'Install Accessory Drive Housing'*

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Kit* ‘Nuts (Type II)’ (x13)
- *Manufacturing Kit* ‘Spacer Washers’ (x13)
- *Manufacturing Kit* ‘Bolts (Type III)’ (x54)
- *Provided Part* ‘Accessory Drive Housing’ (x1)
- *Provided Part* ‘Gasket’ (x1)
- *Manufacturing Assembly* ‘Install First Stage Compressor Impeller Shroud’ (x1)
- *Manufacturing Kit* ‘Nuts (Type I)’ (x54)
- *Provided Part* ‘Shim’ en un grupo (x3)

Tabla 4-15. Desglose de ‘Install Accessory Drive Housing’ y sus cantidades.

4.3.16 Instalación del Soporte del cojinete delantero, el Cojinete del compresor y el Cierre

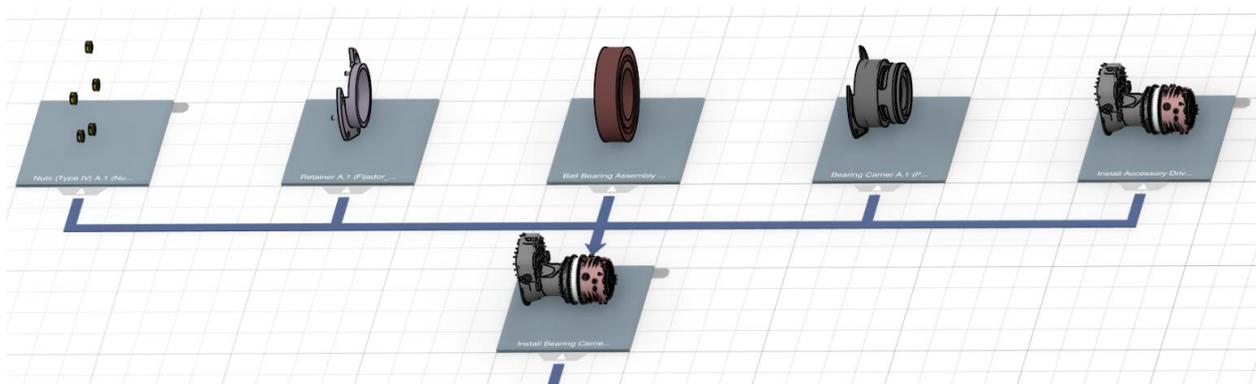


Figura 4-27. Componentes del conjunto ‘Install Bearing Carrier, Compressor Bearing and Retainer’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Kit* ‘Nuts (Type IV)’ (x5)
- *Provided Part* ‘Retainer’ (x1)
- *Provided Part* ‘Ball Bearing Assembly’ (x1)
- *Provided Part* ‘Bearing Carrier’ (x1)
- *Manufacturing Assembly* ‘Install Accessory Drive Housing’ (x1)

Tabla 4-16. Desglose de ‘Install Bearing Carrier, Compressor Bearing and Retainer’ y sus cantidades.

4.3.17 Instalación de la Tuerca del eje principal

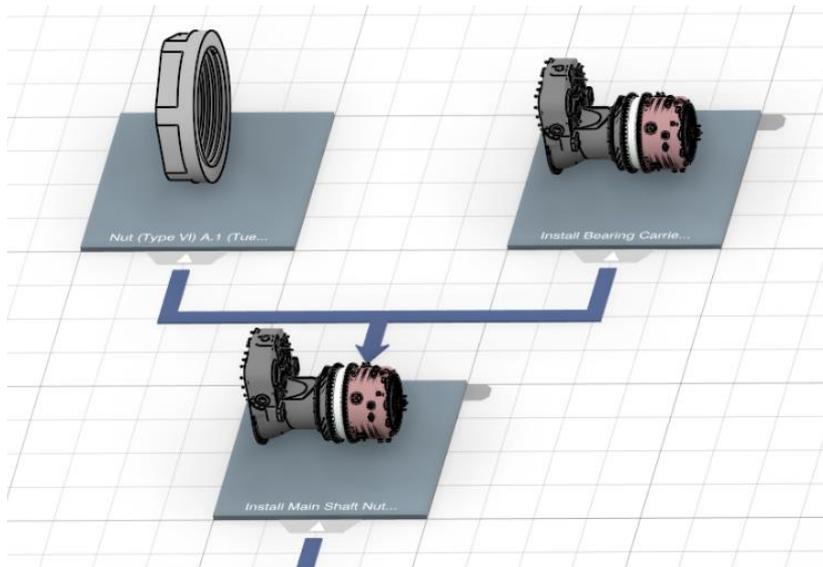


Figura 4-28. Componentes del conjunto 'Install Main Shaft Nut'

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* 'Main Shaft Nut' (x1)
- *Manufacturing Assembly* 'Install Bearing Carrier, Compressor Bearing and Retainer' (x1)

Tabla 4-17. Desglose de 'Install Main Shaft Nut' y sus cantidades.

4.3.18 Instalación del Conjunto de soporte del cojinete trasero

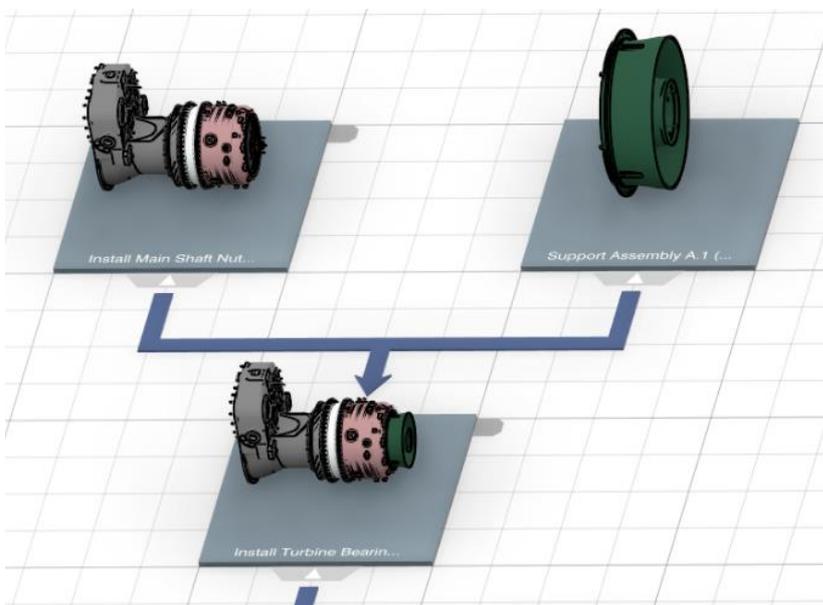


Figura 4-29. Componentes del conjunto 'Install Turbine Bearing Support Assembly'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* 'Install Main Shaft Nut' (x1)
- *Provided Part* 'Support Assembly' (x1)

Tabla 4-18. Desglose de 'Install Turbine Bearing Support Assembly' y sus cantidades.

4.3.19 Ensamblado del Soporte del cojinete trasero

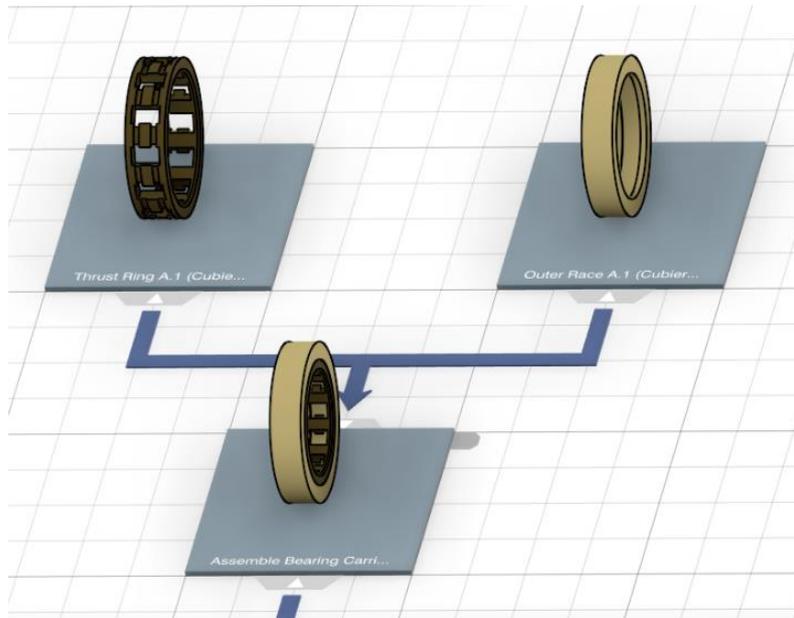


Figura 4-30. Componentes del conjunto 'Assemble Bearing Carrier'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* 'Thrust Ring' (x1)
- *Provided Part* 'Outer Race' (x1)

Tabla 4-19. Desglose de 'Assemble Bearing Carrier' y sus cantidades.

4.3.20 Instalación del Conjunto de soporte y el Cierre

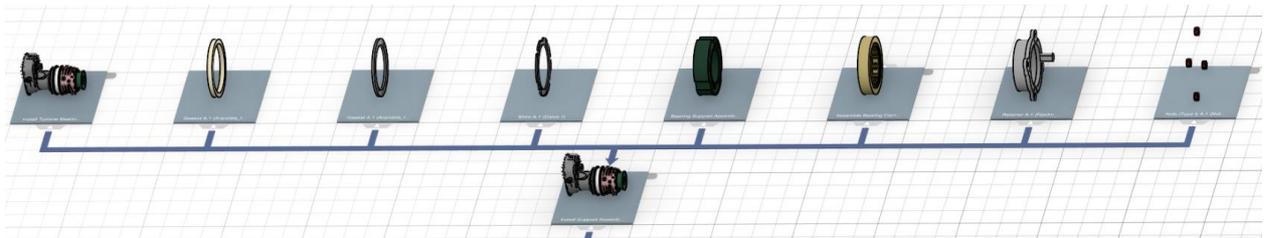


Figura 4-31. Componentes del conjunto 'Install Support Assembly and Retainer'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* 'Install Turbine Bearing Support Assembly' (x1)
- *Provided Part* 'Gasket' (x1)
- *Provided Part* 'Gasket 2' (x1)
- *Provided Part* 'Shim' (x1)
- *Provided Part* 'Bearing Support Assembly' (x1)
- *Manufacturing Assembly* 'Assemble Bearing Carrier' (x1)
- *Provided Part* 'Retainer' (x1)
- *Manufacturing Kit* 'Nuts (Type I)' (x4)

Tabla 4-20. Desglose de 'Install Support Assembly and Retainer' y sus cantidades.

4.3.21 Instalación de los Termopares

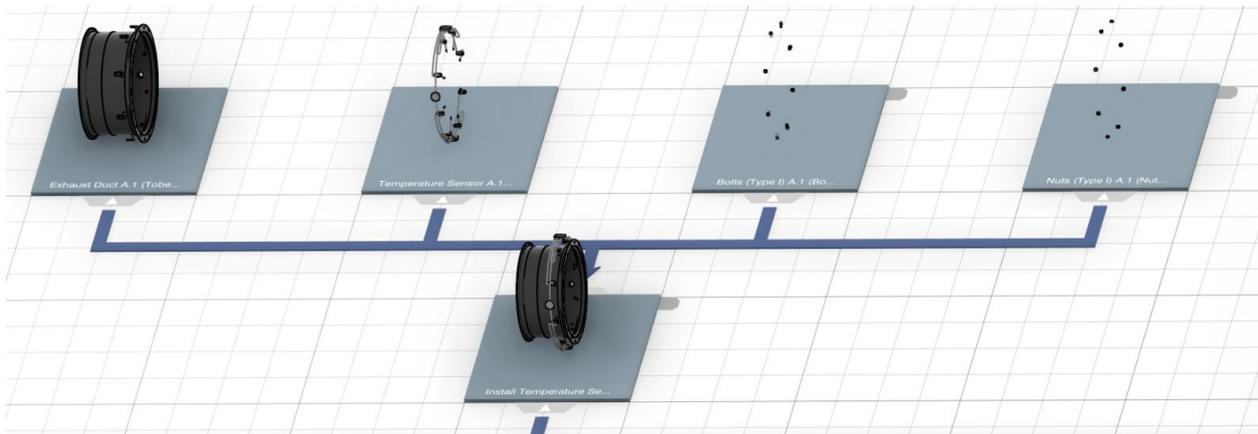


Figura 4-32. Componentes del conjunto 'Install Temperature Sensor'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* 'Exhaust Duct' (x1)
- *Provided Part* 'Temperature Sensor' (x1)
- *Manufacturing Kit* 'Bolts (Type I)' (x4)
- *Manufacturing Kit* 'Nuts (Type I)' (x4)

Tabla 4-21. Desglose de 'Install Temperature Sensor' y sus cantidades.

4.3.22 Instalación del Conjunto de tobera de salida

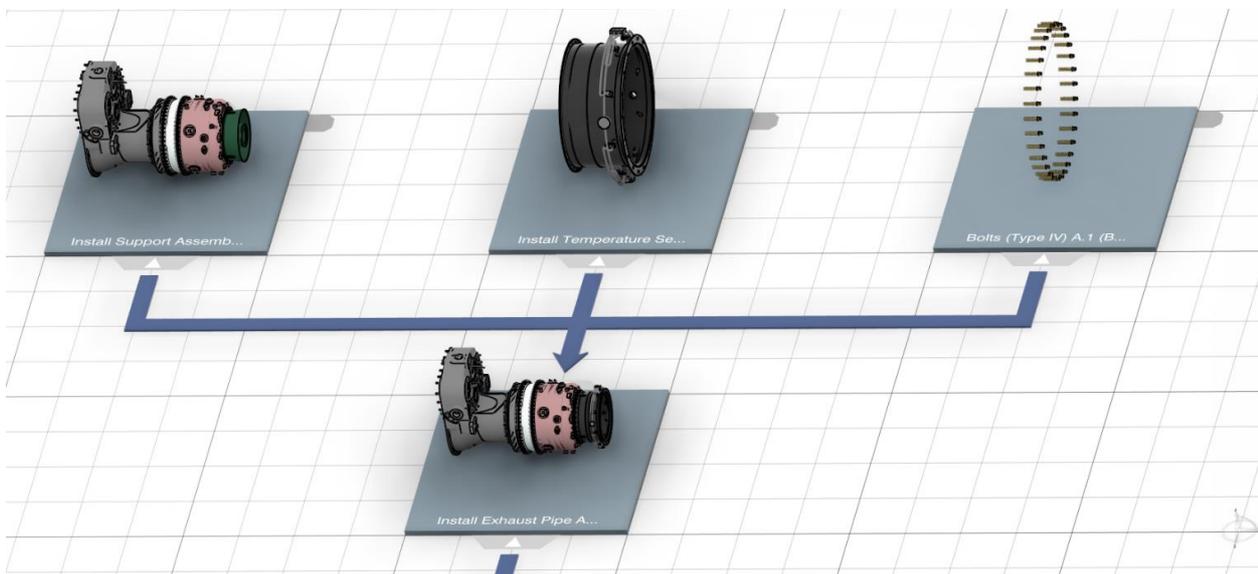


Figura 4-33. Componentes del conjunto 'Install Exhaust Pipe Assembly'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* 'Install Support Assembly and Retainer' (x1)
- *Manufacturing Assembly* 'Install Temperature Sensor' (x1)
- *Manufacturing Kit* 'Bolts (Type IV)' (x32)

Tabla 4-22. Desglose de 'Install Exhaust Pipe Assembly' y sus cantidades.

4.3.23 Instalación del Eje de torsión

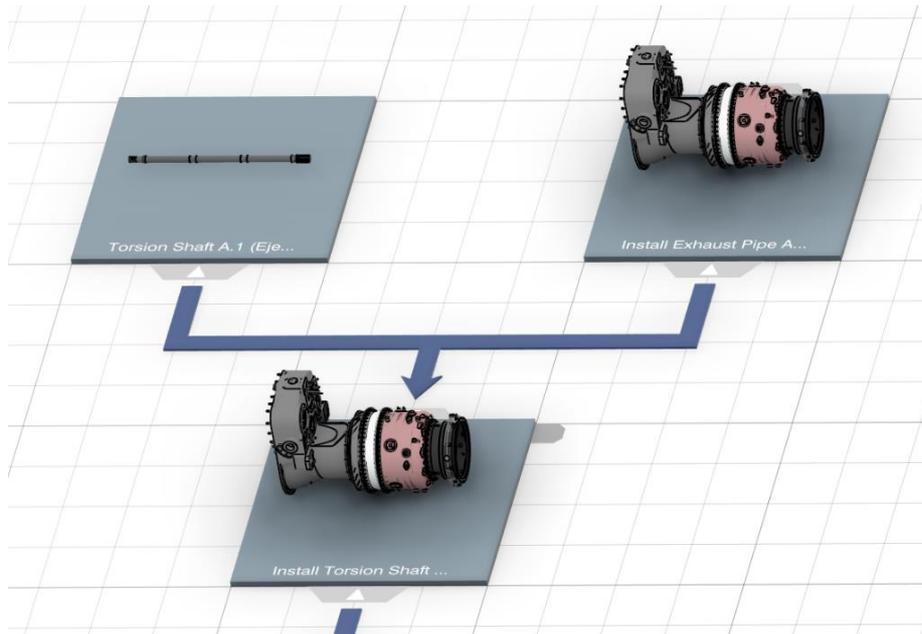


Figura 4-34. Componentes del conjunto ‘Install Torsion Shaft’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* ‘Torsion Shaft’ (x1)
- *Manufacturing Assembly* ‘Install Exhaust Pipe Assembly’ (x1)

Tabla 4-23. Desglose de ‘Install Torsion Shaft’ y sus cantidades.

4.3.24 Instalación del Eje acoplador y su engranaje

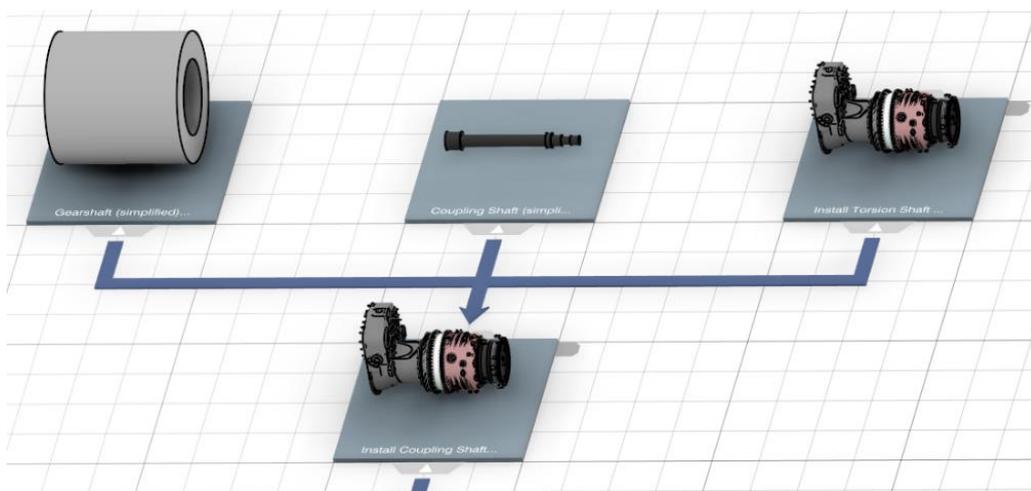


Figura 4-35. Componentes del conjunto ‘Install Coupling Shaft and Gear’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* ‘Gearshaft (simplified)’ (x1)
- *Provided Part* ‘Coupling Shaft (simplified)’ (x1)
- *Manufacturing Assembly* ‘Install Torsion Shaft’ (x1)

Tabla 4-24. Desglose de ‘Install Coupling Shaft and Gear’ y sus cantidades.

4.3.25 Ensamblado parcial del Mecanismo planetario

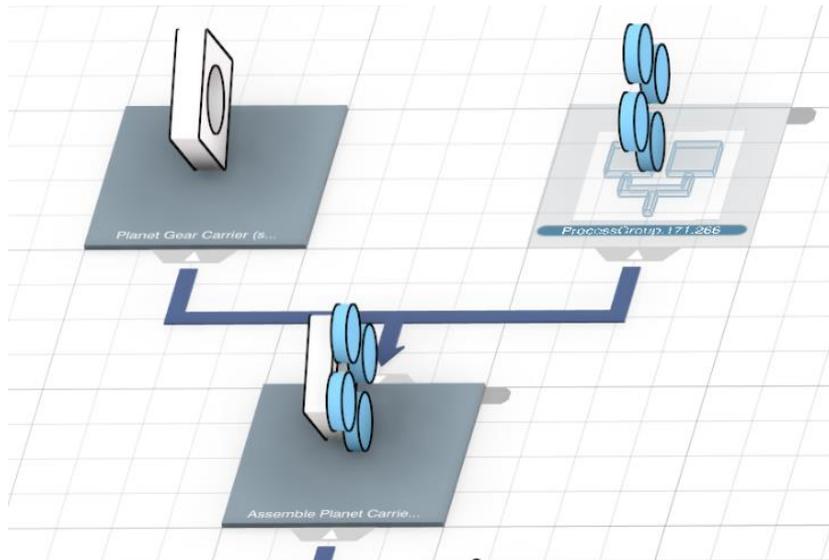


Figura 4-36. Componentes del conjunto 'Assemble Planet Carrier and Gear Assembly'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* 'Planet Gear Carrier (simplified)' (x1)
- *Provided Part* 'Gear and Bearing Assembly (simplified)' en un grupo (x4)

Tabla 4-25. Desglose de 'Assemble Planet Carrier and Gear Assembly' y sus cantidades.

4.3.26 Instalación del conjunto de engranajes 'Bull and Sun' en el diafragma

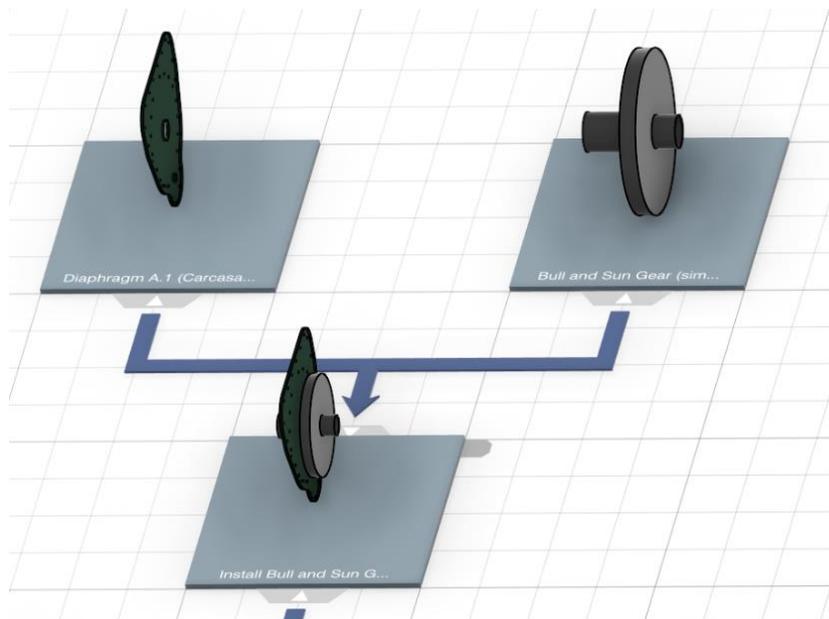


Figura 4-37. Componentes del conjunto 'Install Bull and Sun Gear Assembly'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* 'Diaphragm (simplified)' (x1)
- *Provided Part* 'Bull and Sun Gear (simplified)' (x1)

Tabla 4-26. Desglose de 'Install Bull and Sun Gear Assembly' y sus cantidades.

4.3.27 Instalación del Mecanismo planetario

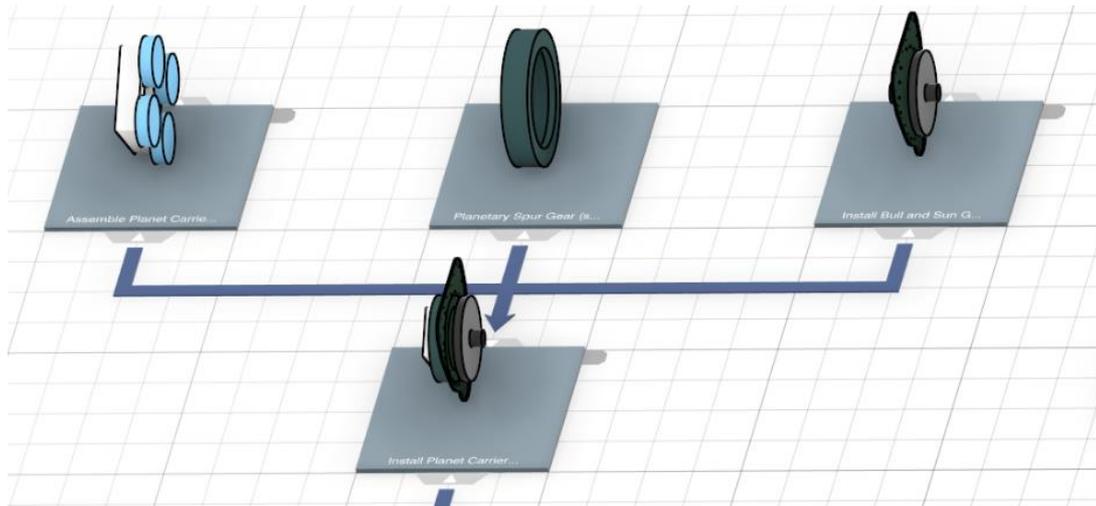


Figura 4-38. Componentes del conjunto 'Install Planet Carrier and Gear Assembly'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* 'Assemble Planet Carrier and Gear Assembly' (x1)
- *Provided Part* 'Planetary Spur Gear (simplified)' (x1)
- *Manufacturing Assembly* 'Install Bull and Sun Gear Assembly' (x1)

Tabla 4-27. Desglose de 'Install Planet Carrier and Gear Assembly' y sus cantidades.

4.3.28 Instalación del conjunto Diafragma

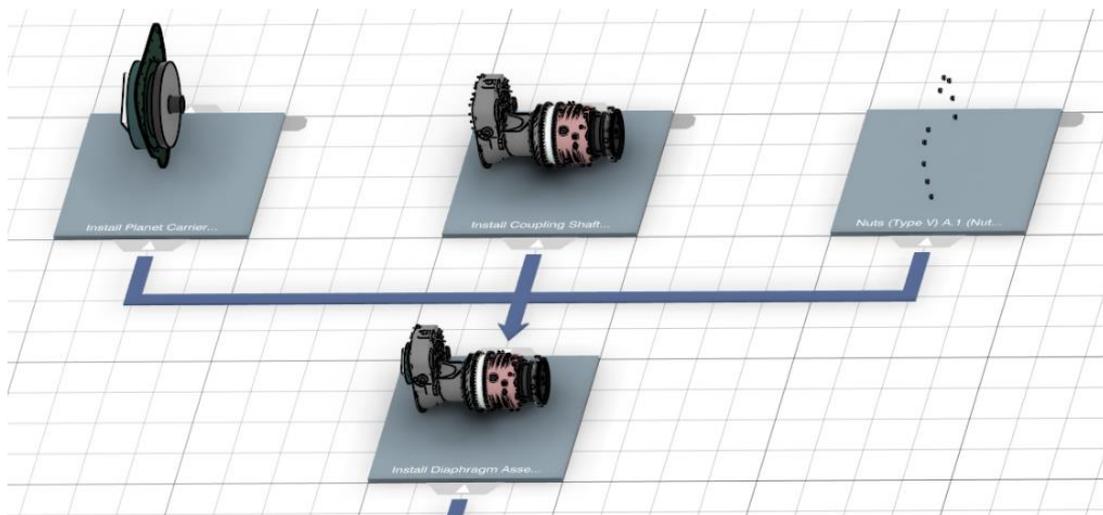


Figura 4-39. Componentes del conjunto 'Install Diaphragm Assembly'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* 'Install Planet Carrier and Gear Assembly' (x1)
- *Manufacturing Assembly* 'Install Coupling Shaft and Gear' (x1)
- *Manufacturing Kit* 'Nuts (Type V)' (x10)

Tabla 4-28. Desglose de 'Install Diaphragm Assembly' y sus cantidades.

4.3.29 Ensamblaje del Nose Cone o morro.

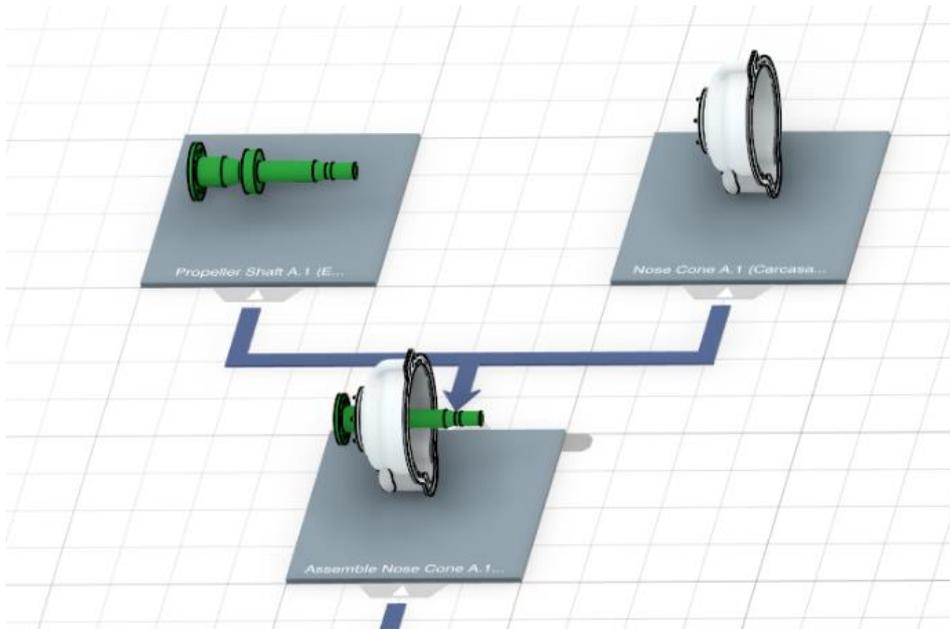


Figura 4-40. Componentes del conjunto 'Assemble Nose Cone'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* 'Propeller Shaft (simplified)' (x1)
- *Provided Part* 'Nose Cone (simplified)' (x1)

Tabla 4-29. Desglose de 'Assemble Nose Cone' y sus cantidades.

4.3.30 Instalación del conjunto Nose Cone o morro

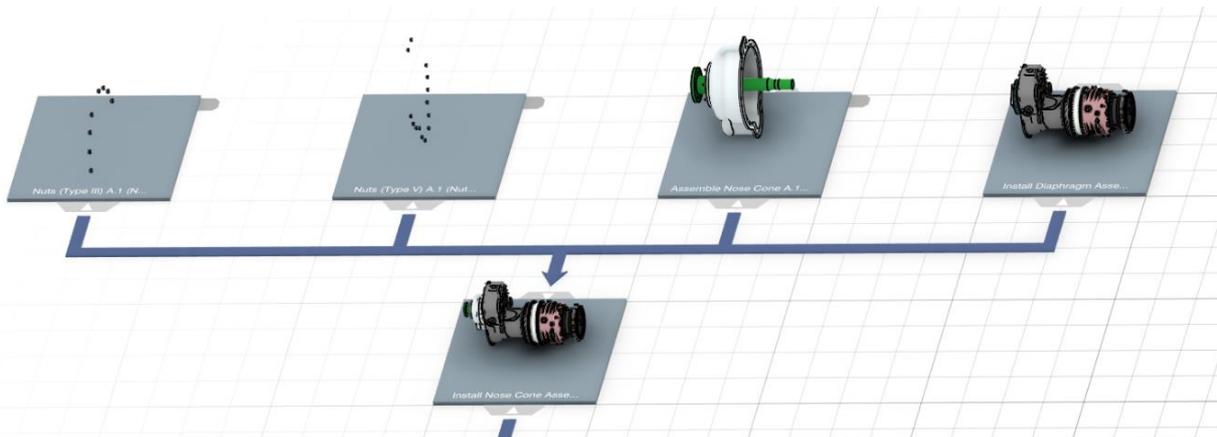


Figura 4-41. Componentes del conjunto 'Install Nose Cone Assembly'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Kit* 'Nuts (Type III)' (x8)
- *Manufacturing Kit* 'Nuts (Type V)' (x14)
- *Manufacturing Assembly* 'Assemble Nose Cone' (x1)
- *Manufacturing Assembly* 'Install Diaphragm Assembly' (x1)

Tabla 4-30. Desglose de 'Install Nose Cone Assembly' y sus cantidades.

4.3.31 Instalación de la Bomba de recuperación de aceite

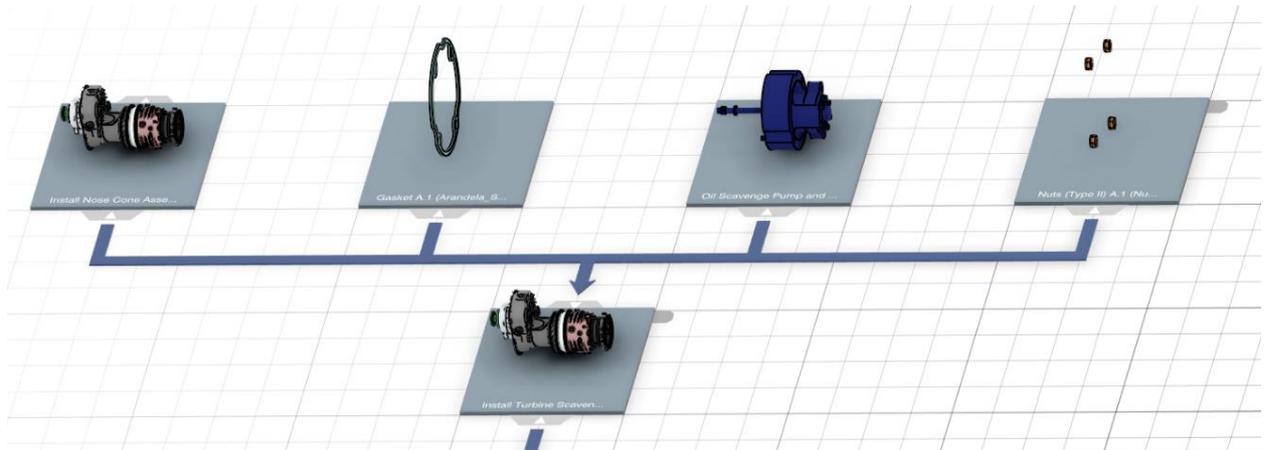


Figura 4-42. Componentes del conjunto ‘Install Turbine Scavenge Pump and Spur Gearshaft’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* ‘Install Diaphragm Assembly’ (x1)
- *Provided Part* ‘Gasket’ (x1)
- *Provided Part* ‘Oil Scavenge Pump and Spur Gearshaft’ (x1)
- *Manufacturing Kit* ‘Nuts (Type II)’ (x4)

Tabla 4-31. Desglose de ‘Install Turbine Scavenge Pump and Spur Gearshaft’ y sus cantidades.

4.3.32 Instalación del Cono de cola

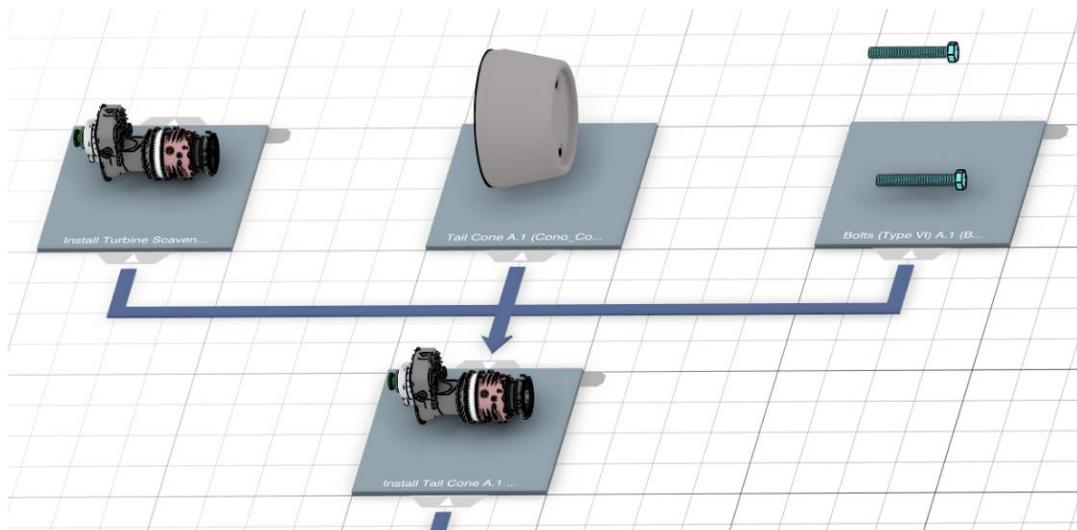


Figura 4-43. Componentes del conjunto ‘Install Tail Cone’.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* ‘Install Turbine Scavenge Pump and Spur Gearshaft’ (x1)
- *Provided Part* ‘Tail cone’ (x1)
- *Manufacturing Kit* ‘Bolts (Type VI)’ (x2)

Tabla 4-32. Desglose de ‘Install Tail Cone’ y sus cantidades.

4.3.33 Ensamblaje del Conjunto de mangueras de combustible y sus Inyectores asociados

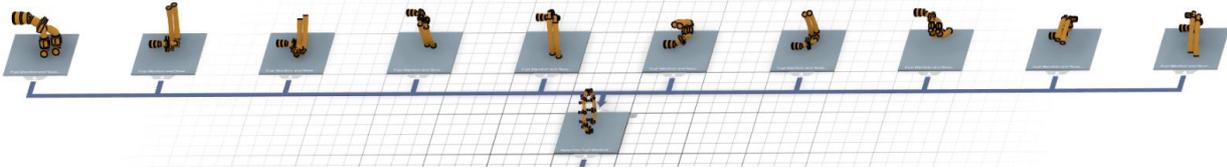


Figura 4-44. Componentes del conjunto 'Assemble Fuel Manifolds and Nozzles'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* se supone que le llega al operario parcialmente montado para ahorrar espacio y está conformado por los siguientes componentes:

- *Provided Part* 'Fuel Manifold and Nozzle Assembly (Type I)' (x6)
- *Provided Part* 'Fuel Manifold and Nozzle Assembly (Type II)' (x1)
- *Provided Part* 'Fuel Manifold and Nozzle Assembly (Type III)' (x1)
- *Provided Part* 'Fuel Manifold and Nozzle Assembly (Type IV)' (x1)
- *Provided Part* 'Fuel Manifold and Nozzle Assembly (Type V)' (x1)

Tabla 4-33. Desglose de 'Assemble Fuel Manifolds and Nozzles' y sus cantidades.

4.3.34 Instalación del Conjunto de mangueras de combustible y sus Inyectores asociados

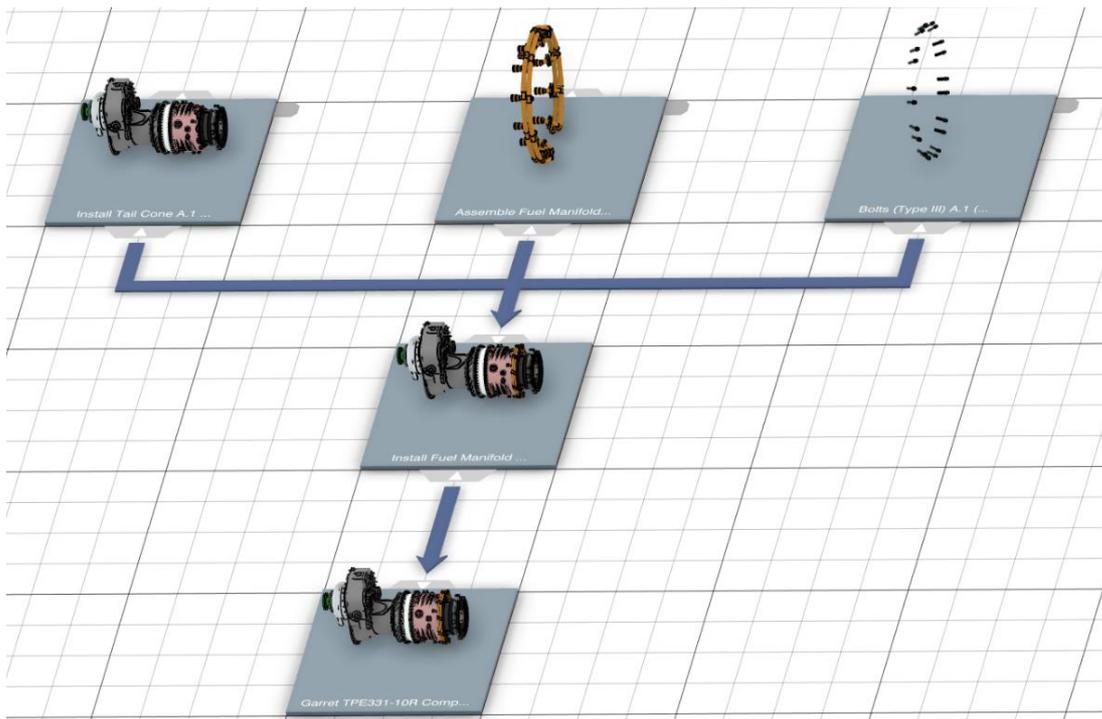


Figura 4-45. Componentes del conjunto 'Install Fuel Manifold and Nozzle Assembly'.

Este conjunto de montaje o *Manufacturing Assembly* está conformado por los siguientes componentes:

- *Manufacturing Assembly* 'Install Tail Cone' (x1)
- *Manufacturing Assembly* 'Assemble Fuel Manifolds and Nozzles' (x1)
- *Manufacturing Kit* 'Bolts (Type III)' (x20)

Tabla 4-34. Desglose de 'Install Fuel Manifold and Nozzle Assembly' y sus cantidades.

Llegando al fin al motor completo ‘Garrett TPE 331-10R Complete Engine’ y terminando por tanto la estructura que define el MBOM.

Una opción muy interesante que permite el módulo *Manufactured Item Definitions*, es la de comprobar si todas las piezas o conjuntos de piezas existentes en la estructura BOM del modelo inicial, están asignados en la estructura MBOM que acabamos de realizar. Esto se hace de forma muy intuitiva, mediante colores, usando la función *B. I. Essentials*, con la opción *Product Assignment Status* escogida.



Figura 4-46. Ejemplo de comprobación de que las piezas están asignadas a la estructura MBOM.

Como puede verse en el breve ejemplo de la Figura 4-46, todas las piezas están asignadas correctamente y además el *scope* está creado con éxito. Esta herramienta nos ofrece un plus de seguridad a la hora de continuar con las posteriores etapas del modelo.

Cabe recordar de nuevo, que aunque la herramienta *Assembly Evaluation* se explique en el Capítulo 7, ya que su principal uso ha sido el de definir las trayectorias de las piezas en las operaciones una vez que ya estaban ambas distribuidas en la planta de montaje, también se ha usado en esta primera etapa para comprobar la viabilidad del proceso de fabricación que define el MBOM.

Tal y como se dijo en el Capítulo 2, la herramienta *Assembly Evaluation* ha permitido detectar un pequeño error en el modelo de partida [1], que hacía inviable el proceso de ensamblaje. Por este motivo se ha realizado una ligera modificación en la parte final de la Turbina de expansión, en concreto en la pieza ‘*Turbine Support*’ para que pudiera ensamblarse correctamente en el ‘*Plenum*’.

Llegados a este punto y teniendo la estructura MBOM definida, revisada y verificada mediante simulaciones, podemos dar por concluida la primera etapa del proyecto, alcanzando satisfactoriamente el objetivo asociado a la misma.

5 PLANIFICACIÓN DEL PROCESO DE ENSAMBLAJE

En el presente capítulo, continuaremos con la segunda etapa del proyecto, la cual define la denominada Planificación del proceso. Esta no es otra cosa que una distribución temporal restringida de las operaciones definidas sobre cada uno de los elementos del MBOM, con la finalidad de generar la secuencia de operaciones que desemboca en el producto final.

Esto se hará mediante la aplicación de 3Dexperience denominada *Process Planning*, la cual permite definir operaciones sobre los elementos del MBOM previamente generado y definir una secuencia temporal ordenada de las operaciones, donde podemos establecer restricciones o relaciones de precedencia, de forma que podamos obtener un modelo fidedigno del proceso real de ensamblaje del motor Garrett TPE 331-10R. De manera complementaria, la citada aplicación también permite la gestión de los sistemas y estructuras creados, así como el análisis y posterior equilibrado de los sistemas, pudiendo optimizar el proceso.

5.1 Aplicación “Process Planning”

Tal y como se ha mencionado en la introducción, esta etapa del trabajo persigue la definición de la Planificación del proceso de montaje mediante la aplicación *Process Planning*, pero ¿en qué consiste?

En algunas enciclopedias como [14], se define la planificación del proceso como un paso preparatorio antes de la fabricación, que determina la secuencia de operaciones o procesos necesarios para producir una pieza o un ensamblaje. Esta etapa cobra una mayor relevancia cuando la fabricación se desarrolla en talleres de trabajo, donde se fabrican productos únicos o el mismo producto se fabrica con poca frecuencia.



Figura 5-1. Segunda etapa del proyecto, correspondiente a la aplicación Process Planning [7].

Para desarrollar esta tarea de secuenciación, previamente deberemos generar todas y cada una de las operaciones necesarias para ensamblar el producto. Para ello la aplicación *Process Planning* ofrece varios tipos de operaciones como pueden ser por ejemplo:

- *Header Operation*: Define una “operación raíz” o principal, asemejado a un sistema principal dentro del cual generar otro tipo de sistemas o secuencias.
- *General Operation*: Operación de carácter general que puede englobar, por ejemplo, desde la instalación o ensamblaje de uno o varios componentes hasta el transporte o manipulación de conjuntos, de cara a poder realizar correctamente la siguiente operación.
- *Loading Operation*: Operación de carga y posicionamiento de un elemento. Es decir, engloba todo el proceso de seleccionar el elemento necesario para una operación, manipularlo y colocarlo en su posición de destino. Dado el *layout* de tipo fijo, explicado más adelante, se supondrá también que engloba la búsqueda y breve transporte del elemento desde el estante cercano al banco de trabajo, donde se ha almacenado provisionalmente hasta el propio banco.
- *Unloading Operation*: Operación contraria a la anterior, donde se desinstala una pieza (que ha debido ser instalada previamente). Nuevamente se supondrá que incluye también el proceso de manipulación y almacenaje en un estante cercano al banco de trabajo.
- *Point / Curve Fastening Operation*: Definen operaciones orientadas a la creación de elementos tipo *Fasten*, como pueden ser soldaduras o sujeciones temporales para operaciones concretas.
- *Remove Material Operation*: Definen operaciones de eliminación de material. Ejemplos claros de este tipo de operaciones pueden ser el torneado, fresado o taladrado de una pieza previamente instalada.

Al igual que pasaba entre el MBOM y el modelo de partida, la Planificación del montaje ha de estar vinculada mediante un *scope* al previamente definido MBOM. Se podrán realizar uno o varios *scope* dependiendo del proceso que persigamos seguir. De esta forma pueden fabricarse varios productos en una misma secuencia o dividir el proceso de fabricación de un producto en distintas secuencias, asociados a distintas fábricas.

De la misma manera, se puede estructurar el plan de fabricación en distintos sistemas asociados a distintas etapas o conjuntos de fabricación y/o en distintas localizaciones o bancos de trabajo.

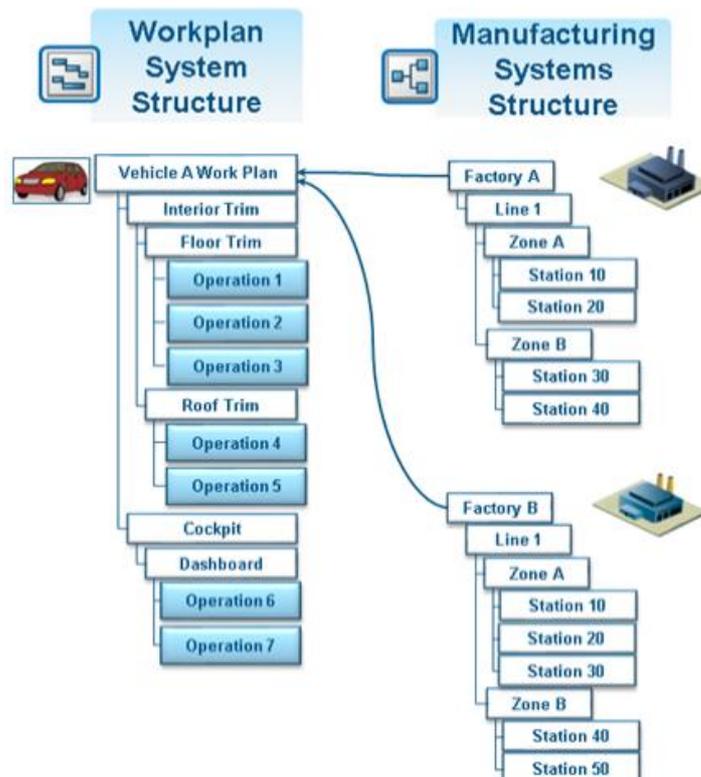


Figura 5-2. Ejemplo de estructuración de un plan de fabricación [7].

Una diferencia que presenta este proceso con la definición del MBOM, en cuanto a la aplicación *Process Planning* se refiere, es que ahora resulta más fácil y eficiente el crear operaciones de forma automática al arrastrar manualmente (*'drag and drop'*) los elementos del MBOM a los distintos sistemas o estaciones definidas en la etapa actual. También se pueden agregar operaciones extra de forma manual y posteriormente asociar a cada una los elementos o conjuntos de elementos del MBOM a las que aplica, mediante herramientas como *Assignment Manager* o *Systems Assignment Assistant*.

Una vez que se tienen las operaciones definidas, se da paso al proceso de secuenciación temporal de las mismas mediante restricciones/relaciones de precedencia. Esto se ha realizado mediante una serie de funcionalidades que la aplicación ofrece, directamente aplicadas al diagrama de Gantt del proceso.

El objetivo del diagrama de Gantt no es otro que el de exponer de forma visual y mediante barras horizontales, el tiempo de dedicación previsto para diferentes operaciones, definiendo también el tiempo total del proceso completo. Sobre el mismo se pueden aplicar restricciones de distinto tipo:

- *Create Precedence Link*: Establece una restricción temporal, en la que una operación no puede comenzar hasta que termine la operación anterior establecida.
- *Create Start-Start Link*: Genera una restricción que implica que dos tareas comiencen a la vez.
- *Create End-End Link*: Genera una restricción en la que dos actividades acaban en el mismo instante.
- *Create End-Start Link*: Similar a la primera opción, pero con la diferencia de que podemos establecer un tiempo entre operaciones de forma que, acabada la operación previa y pasado este tiempo, comenzará la segunda operación.

Nuevamente *B. I. Essentials* resulta muy útil para comprobar distintos estados del sistema, como puede ser el verificar que todos los elementos están asignados correctamente.

También existen una serie de funciones destinadas al análisis de la eficiencia del sistema y el equilibrado de las operaciones por puestos de trabajo. Este tipo de análisis ha quedado excluido de los objetivos del trabajo por dos motivos: el primero es que estamos basando nuestro sistema de fabricación en el manual de Revisión General [2], es decir no estamos diseñando un sistema nuevo que busquemos optimizar. La segunda y más relevante es la limitación temporal del trabajo y la vasta extensión del modelo en cuanto a número y tipos de piezas se refiere, por lo que la búsqueda de una optimización del sistema descrito en el manual se planteará como aplicación futura en el Capítulo 8.

5.2 Tutoriales en la plataforma Eduspace

Una vez que tenemos claro el concepto de Planificación del proceso, y como etapa previa a la implementación de estas técnicas en el motor Garrett TPE 331-10R, se procederá al igual que se hizo en la etapa de definición del MBOM; a realizar una serie de tutoriales recomendados, recogidos en la web de Eduspace [7]. En concreto se realizarán los tutoriales recogidos en *Process Planner > DELMIA Process Planning Essentials*.

Nuevamente reseñar que, si bien los tutoriales no están del todo actualizados respecto a la versión R2010x empleada, han sido de gran utilidad para conocer los aspectos generales de la herramienta y sus funciones.

Para comenzar, se han establecido diferentes opciones en la aplicación, indispensables para que el sistema nos muestre o deje de mostrar elementos, o para definir la computación del sistema en función de las restricciones temporales o de las de flujo de trabajo, entre otras. Se recomienda nuevamente al lector prestar atención en este breve tutorial, ya que la configuración es más relevante en este software que en los anteriores.

Tras esto se han generado estructuras de operaciones, una para el caso *3.5HP_Engine* y otra para *Cordless_Drill*. A continuación, se ha vinculado la raíz del sistema a la propia del MBOM mediante el ya conocido *scope* y se han testeado las distintas formas de asignar elementos del MBOM a las mismas, las cuales varían desde la forma manual o *'drag and drop'*, hasta formas más específicas como son los asistentes de asignación *Assignment Manager* o *Systems Assignment Assistant*, bastante útiles si se quiere configurar una asignación algo más avanzada a la que se realiza por defecto.

Un ejemplo de asignación avanzada puede ser el de asignar un elemento a más de una operación, cosa que no permite el ‘drag and drop’, al eliminar por defecto las anteriores asignaciones que se hayan hecho de dicho elemento.

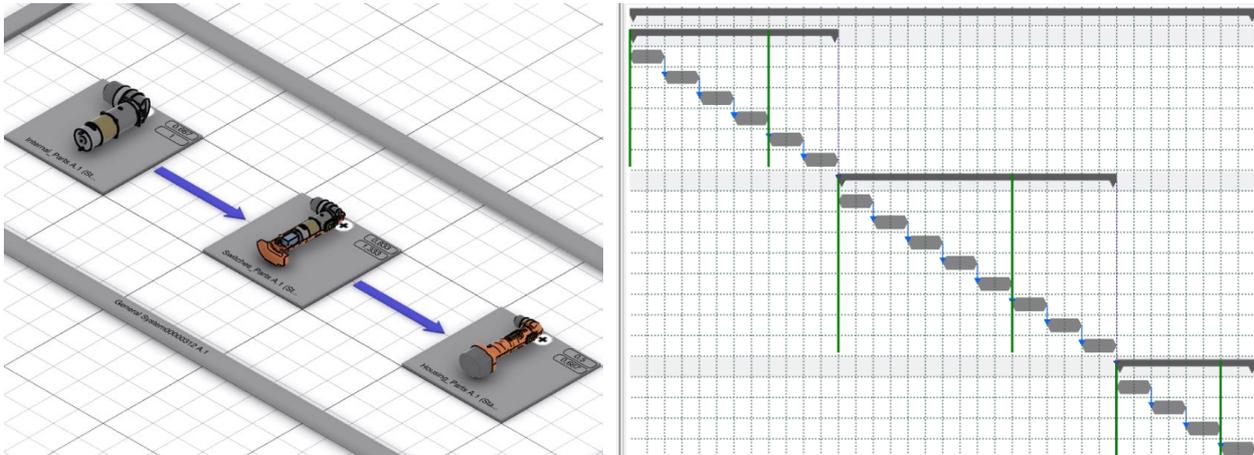


Figura 5-3. Ejemplo *Cordless_Drill* con su sistema (izquierda) y su diagrama de Gantt asociado (derecha).

Tras esto, se han restringido las operaciones mediante relaciones de precedencia, con el objetivo de secuenciar de forma lógica el montaje, desde la primera pieza y su operación asociada, hasta la última; obteniendo el resultado mostrado en la Figura 5-3 para el ejemplo *Cordless_Drill*.

Otro ejemplo a señalar, es la aplicación a la fabricación de varios modelos en una misma secuencia, proceso que se ha realizado como ejercicio en su correspondiente tutorial. Esto es más común en la realidad de lo que se piensa, llegando a ensamblarse varios modelos, que normalmente no requieren de gran complejidad individual, en una misma cadena de montaje.

Por último caben destacar los tutoriales enfocados a analizar los sistemas de montaje y sus secuencias asociadas de operaciones. Estos análisis se pueden enfocar de distintas formas, una de ellas es el análisis de la utilización del sistema con la posibilidad del equilibrio de las operaciones, buscando una optimización que reduzca los tiempos muertos y equilibre las cargas de trabajo.

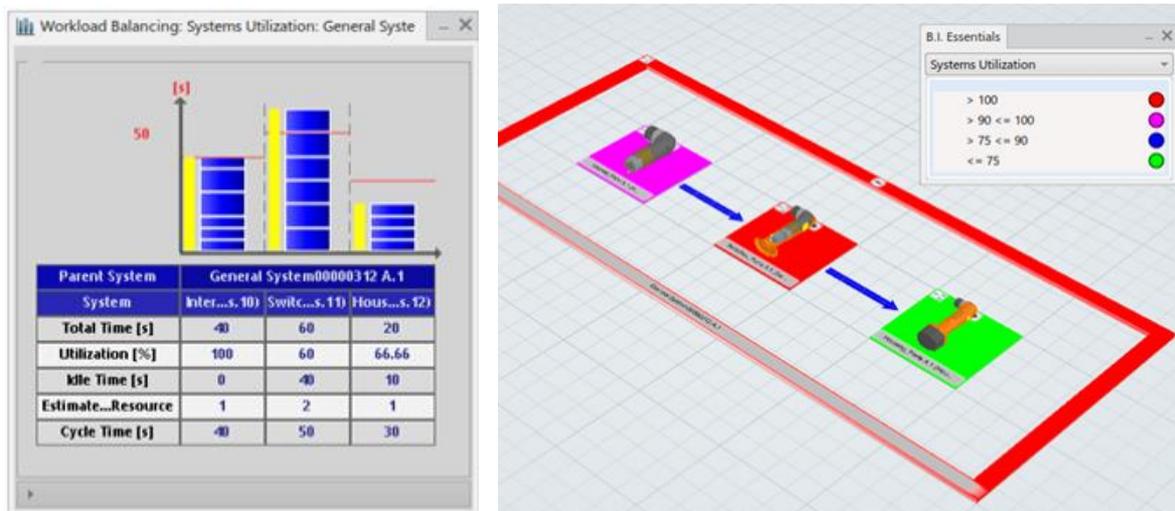


Figura 5-4. Balance de carga de trabajo de ejemplo (izquierda) y utilización del sistema (derecha).

Otro enfoque alternativo de análisis del sistema, es el de establecer un tiempo de ciclo del producto y una demanda del mismo, y ajustar el sistema a la misma, de forma que el proceso se optimice para esta demanda concreta.

Una vez que se han realizado todos los tutoriales recomendados, adquiriendo una visión global de la herramienta y una serie de conceptos particulares sobre las herramientas, se procede a aplicarlos sobre el modelo de MBOM, definido en el Capítulo 4 sobre el motor Garrett TPE 331-10R.

5.3 Planificación del ensamblaje del motor

Tras adquirir los conceptos generales de las herramientas presentes en el módulo *Process Planning* y haber realizado los casos prácticos recomendados en los tutoriales referentes al mismo, llega el momento de aplicar lo aprendido a nuestro modelo, en concreto a la estructura que define el MBOM generada en el Capítulo 4.

Como etapa previa a la aplicación de conceptos, se ha realizado un estudio y reflexión previa acerca del tipo de *layout* que vamos a implementar, ya que la distribución y secuenciación de las operaciones vendrá fuertemente ligada a la tipología del mismo.

En cuanto a los tipos generales de *layout*, estos se pueden clasificar mediante distintos parámetros. En concreto, si decidimos estudiarlo en función del volumen de producción y la variedad de productos, podemos basarnos en la Figura 5-5. En nuestro caso podría no quedar clara la dependencia con el nº de productos, pero esta viene fuertemente relacionada con la variedad de operaciones y distintos recursos necesarios para completar cada una, por lo que concluimos en que el tipo de *layout* más apropiado sería el de Posición fija.

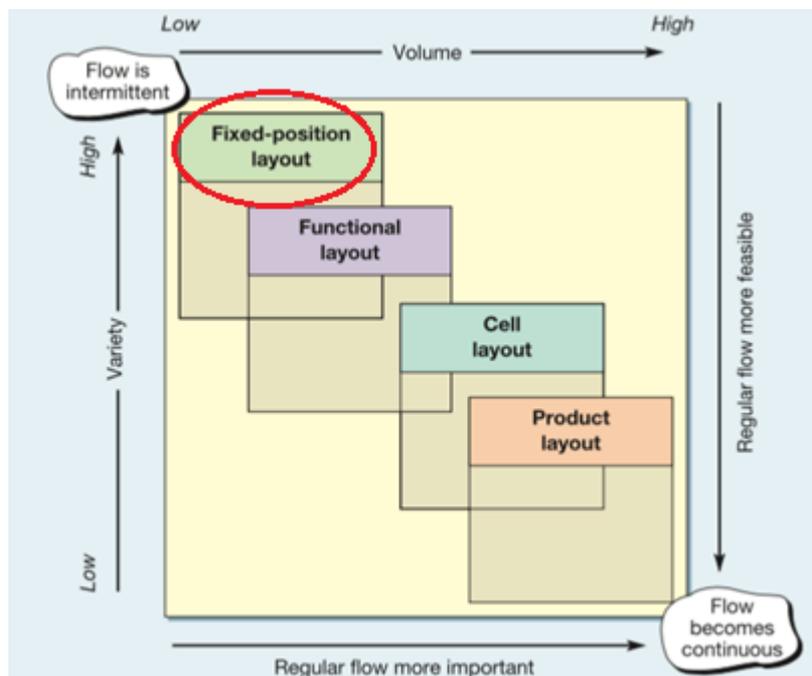


Figura 5-5. Tipología de *layout* en función de la variedad y el volumen de producción [15].

Esta decisión viene justificada también por la mencionada anteriormente experiencia de prácticas en el Ejército del Aire, donde se pudo observar que la mayor parte del montaje del motor se realizaba con este colocado sobre un banco fijo de trabajo.

Los operarios sin embargo, lejos de quedarse fijos, eran los que llevaban al banco las piezas a ensamblar, así como el utillaje y resto de recursos necesarios para desempeñar correctamente cada operación.

Debemos tener en mente también el altísimo valor económico de un motor aeronáutico y la alta criticidad que supone el fallo de estos en vuelo. Esto hace que prime más el garantizar que las operaciones están bien hechas, con sus posteriores inspecciones y verificaciones de calidad, que el tiempo empleado en el proceso, el cual suele rondar el orden de varios meses; evitando también en todo lo posible el traslado y manipulación no indispensable de las piezas por la factoría, lo que refuerza aún más la elección del *layout* de Posición fija.

Otro factor a considerar es el número de trabajadores, el cual será reducido dada la elección del tipo de planta y la necesidad de gran experiencia y cualificación para desempeñar la tarea.

Tras el estudio preliminar, se ha decidido establecer una estación de trabajo principal '*Principal Station*', a la que le llegan los pequeños conjuntos de una serie de estaciones secundarias. Todas estas estaciones estarán fijas y será el operario de cada una el encargado de traer las piezas y recursos necesarios para el desempeño de cada operación. Cabe destacar que se ha realizado la simplificación de que los pequeños conjuntos que afectan a la Estación principal y se montan sobre la misma, se montan directamente sobre esta, obviando el corto paso intermedio para no definir excesivas posiciones de montaje y/o estaciones.

Los criterios seguidos a la hora de definir el número de estaciones han sido.

- Tipo de utillaje necesario para posicionar las piezas y similitud de las herramientas necesarias. Este criterio ha definido una estación secundaria empleada únicamente para el ensamblaje inicial del grupo rotatorio (Eje principal, rotores de compresor y turbina,...), ya que estos se montan ensartados sobre un útil específico para este conjunto de operaciones.

Este criterio también ha apoyado la decisión de establecer una estación principal donde se ensambla la mayor parte del motor, ya que según lo indicado en el manual de Revisión general [2], todas estas operaciones citadas se desarrollan sobre un banco concreto, que agarra el motor en dos puntos y permite el giro del mismo, con respecto al eje que definen los puntos de agarre.

- Localización relativa de los conjuntos en el montaje, que requerirá una especialización concreta sobre una de las zonas del motor, ya sea la sección fría (Toma dinámica y compresor), la sección caliente (Turbina y salida) o la sección dedicada a la transmisión de movimiento y accesorios (*Gearbox*). Este criterio ha definido dos estaciones secundarias, una donde se montará la Turbina y otra donde se ensamblará tanto el Diafragma como el *Nose Cone*, ya que estos últimos son componentes ligados a la mecánica de la *Gearbox* y requieren una especialización muy distinta a la Turbina. Cabe de nuevo destacar que, tanto la *Gearbox* como sus elementos asociados, tienen un modelo bastante simplificado ya que no fueron objetivo de [1], siendo su modelo meramente representativo para entender la transmisión del movimiento entre ejes.
- Tamaño de las piezas a manipular, que pueden superar la fuerza del operario para trasladarlos con seguridad. Este criterio apoya la decisión del criterio anterior, ya que mientras que los elementos de la Turbina son de dimensiones y pesos reducidos, los del Diafragma y el *Nose Cone* son bastante más pesados y voluminosos, por lo que es necesario que se las operaciones sobre estos últimos se realicen sobre un banco específico, el cual supondremos que está reforzado y preparado para ello.

Para comenzar, definiremos nuevamente un vínculo o *scope*, ahora entre la estructura MBOM definida en la primera etapa del trabajo y el sistema general ‘*Garrett TPE331-10R Assembly Process*’, que será el sistema raíz dentro del que se generarán las estaciones de trabajo y sus secuencias de operaciones asociadas.

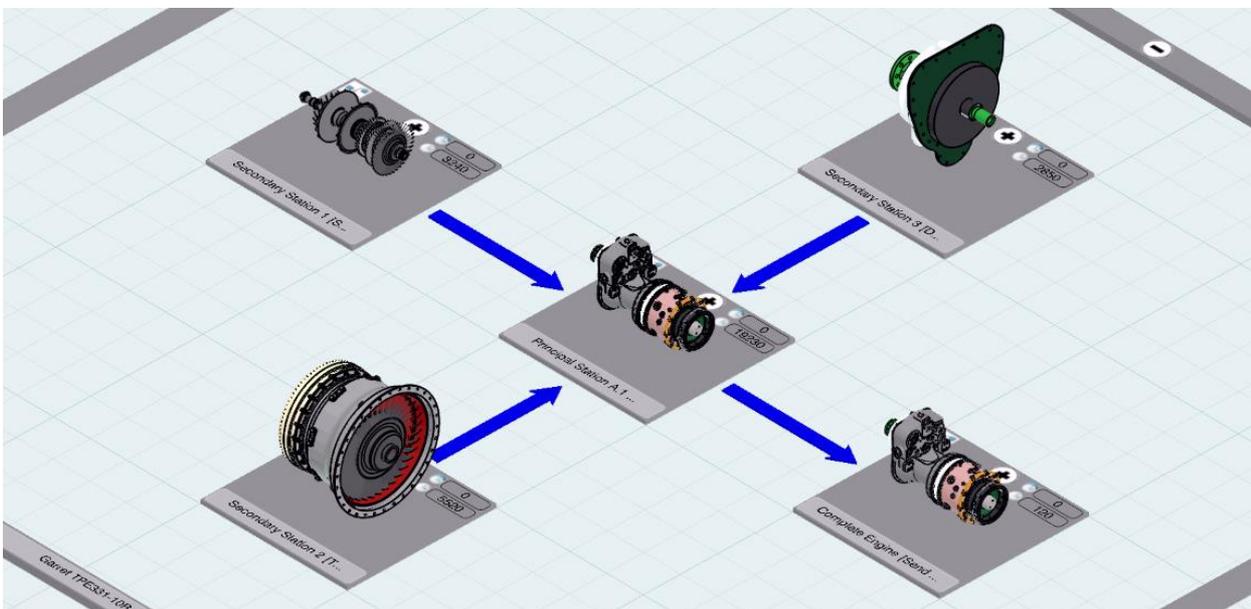


Figura 5-6. Distribución de las operaciones en estaciones de trabajo mediante *General Systems*.

Es necesario mencionar, viendo la Figura 5-6, que *Process Planning* muestra por defecto en las *tiles* outputs de cada sistema, el resultado final de sumar los “resultados gráficos” de todas las operaciones individuales, lo cual en los sistemas que incluyen operaciones ‘*Unload*’ no se corresponde exactamente con el producto de salida de la estación, ya que el hecho por separado de quitar un elemento no genera una imagen del mismo. No se ha encontrado el apartado de la configuración visual que cambia este detalle, pero se ha comprobado mediante simulaciones que el proceso de montaje es correcto y sólido, pese a este detalle gráfico.

Aplicando la serie de criterios citada anteriormente, derivados de una investigación y contextualización previas, tendremos que definir un total de 4 estaciones de trabajo como se puede observar en la Figura 5-6. Una de ellas será la principal, donde se desarrollará el montaje de la gran parte del proceso de ensamblaje, y otras 3 secundarias.

De forma más detallada:

- *‘Principal Station’*: Estación principal de trabajo, donde los elementos se van montando anclados al banco de trabajo *‘Maintenance Stand Assembly’* descrito en el Capítulo 6. Este banco de trabajo tiene la capacidad de rotar sobre el eje que definen los puntos donde se ancla al montaje, por lo que se definirán dentro del sistema *‘Principal Station’* una serie de subsistemas llamados fases, que van desde la *‘Phase I’* a la *‘Phase VII’*. El cambio de fase de montaje vendrá marcado por el manual de Revisión general [2] y vendrá asociado a una rotación del montaje en el banco, para poder acceder mejor a la zona relevante para las operaciones venideras. Comentar que no se ha considerado cambio de fase las rotaciones puntuales para realizar una operación y volver en un corto lapso de tiempo a la posición anterior. Estas fases pueden observarse en la Figura 5-7.

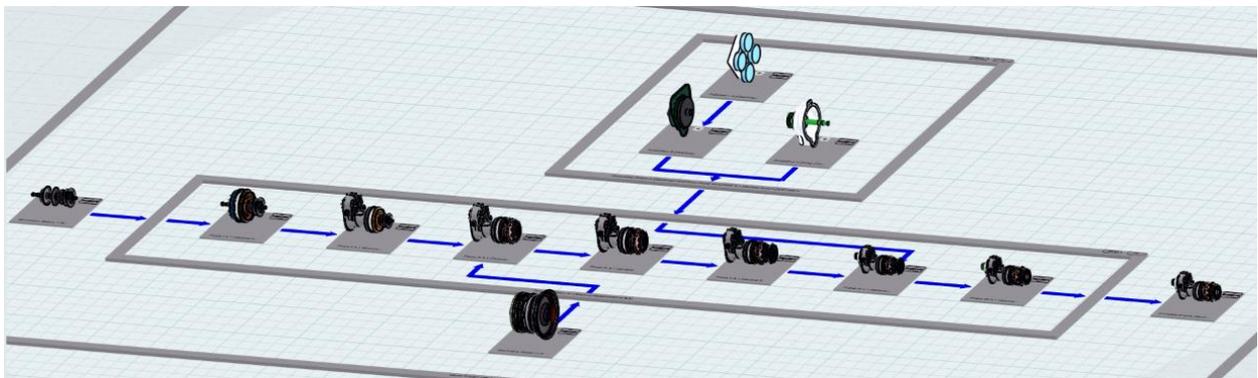


Figura 5-7 Distribución completa de las operaciones en estaciones de trabajo y fases.

- *‘Secondary Station 1 [Shaft]’*: Primera estación secundaria, en la que se realiza un montaje completo del grupo rotatorio sobre el Eje principal, para posteriormente desmontarlo hasta quedarnos con la Primera etapa de rotor centrífugo del compresor ensamblado en el Eje principal. Todas estas operaciones se desarrollan sobre un útil denominado *‘Rotating Assembly Holder’*, representado nuevamente en el Capítulo 6.
- *‘Secondary Station 2 [Turbine]’*: Estación de montaje de la Turbina, que posteriormente será instalada en la parte posterior del *Plenum*, “ensartando” sus elementos con el Eje principal del motor hasta que los elementos rotatorios queden engranados.
- *‘Secondary Station 3 [Diaphragm and Nose Cone]’*: Estación secundaria encargada por una parte de ensamblar el modelo simplificado del Diafragma y por otra, de hacer lo propio con el modelo simplificado del *Nose Cone*. Tal y como se ha indicado previamente, se supondrá que este puesto está reforzado y equipado para el manejo de piezas de grandes dimensiones y peso, como son las que componen ambos conjuntos. Esta estación se compone a su vez de las subestaciones:
 - *‘Substation A [Diaphragm 1]’*: En ella se ensambla parte del mecanismo planetario antes de su instalación en la *‘Substation B’*, por lo que la alimenta con su flujo del producto.
 - *‘Substation B [Diaphragm 2]’*: En esta subestación se finaliza el ensamblaje del Diafragma.
 - *‘Substation C [Nose Cone]’*: Subestación dedicada al ensamblaje del *Nose Cone*.

De forma adicional, y con objetivo puramente representativo del proceso terminado, se ha implementado una estación extra de salida *‘Complete Engine [Send to Packing Line]’* que indica la finalización del proceso y el traslado del motor a la zona de *Packing* para su posterior envío, la cual queda fuera del contexto y objetivos del presente trabajo.

A continuación se han definido una serie de operaciones asociadas a las distintas piezas, conjuntos y subconjuntos del MBOM. Estas operaciones aunque están simplificadas respecto al manual de Revisión general [2], mantienen los nombres de las piezas a las que hacen referencia, de forma que es fácil seguirlo.

La tipología de las operaciones es la siguiente:

- Carga y posicionamiento de piezas y conjuntos, mediante operaciones de tipo *Loading Operation*.
- Carga y posicionamiento de lotes de tornillos/tuercas, mediante operaciones tipo *General Operation*.
- Instalación/Ensamblaje de elementos, que pueden complementarse de forma adicional con el apretado mediante llave dinamométrica de tuercas y/o tornillos, previamente posicionados. Esto se ha asignado mediante operaciones del tipo *General Operation*.
- Manipulación, traslado breve y posicionamiento de los conjuntos ensamblados en las estaciones secundarias hacia la estación principal, mediante operaciones del tipo *General Operation*.
- Rotación del banco principal de trabajo y de los conjuntos instalados sobre el mismo, con el objetivo de poder acceder correctamente a la zona indicada para la siguiente operación. Nuevamente se han utilizado operaciones del tipo *General Operation* para ello.

Otra herramienta muy útil es el conocido Diagrama de Gantt, el cual nos muestra las operaciones secuenciadas temporalmente, visualizando su duración asignada con una barra horizontal de longitud proporcional a la misma y pudiendo observar de un vistazo las restricciones de flujo de trabajo y relaciones de precedencia, representadas con flechas entre las operaciones.

Con la interfaz del citado diagrama abierto y mediante las herramientas para crear restricciones entre operaciones, se ha restringido todas las secuencias de operaciones de forma lógica e intentando no sobrecargar innecesariamente la interfaz. Es decir, aunque bien es cierto que, en un supuesto, una operación “final” no puede ocurrir antes que las operaciones “iniciales”, secuenciadas entre ellas, no se va a incluir en todas las operaciones “iniciales” una relación de precedencia con la final, sino que se va a establecer únicamente con la última operación “inicial” de la secuencia. Ambos casos estarían bien restringidos, pero el segundo es visualmente más claro ya que no aparecen flechas redundantes por todo el modelo. Las restricciones empleadas han sido todas del tipo *Create Precedence Link* ya que, aunque previamente se introdujeron relaciones del tipo *Start-Start Link* para imponer que dos operaciones empiecen a la vez (se vio que era bastante útil cuando hay operaciones que implican colocar varios elementos similares en el mismo sitio y en contacto entre ellos, pudiendo ser trasladados y posicionados a la vez); posteriormente se cambiaron todos al tipo *Precedence Link* ya que cualquier otra tipología más compleja de vínculo impedía realizar los análisis de tipo *Workload* y equilibrado de las estaciones.

Aunque estos análisis no son objetivo del presente trabajo, tal y como ya se ha comentado, se pretenden dejar como aplicación futura del trabajo, por lo que se ha intentado definir el modelo de la forma más realista posible y sin elementos que restrinjan posibilidades o dificulten futuras continuaciones del trabajo.

Destacar que la inclusión de operaciones tipo *Unload* para representar con mayor fidelidad el proceso real, ha ocasionado bastantes problemas y contratiempos en el desarrollo del presente trabajo, por lo que se recomienda al lector prestar atención a la solución encontrada. Estas operaciones *Unload* se han empleado en dos momentos concretos del montaje:

1. Ensamblaje de todo el conjunto rotatorio para a continuación desmontar las distintas piezas hasta quedarnos únicamente con el Eje principal del motor, la Primera etapa centrífuga del compresor y una Junta. Esto se realiza para dejarlos bien posicionados, a la par de verificar las dimensiones y el equilibrado tanto estático como dinámico del grupo rotatorio completo.
2. Instalación provisional del *Accessory Drive Housing* sobre el Compresor, para después desmontarlo e incluir elementos intermedios como la Cubierta o *Shroud* del mismo. Se realiza con el objetivo de verificar las dimensiones respecto al eje en varios puntos para verificar su correcta instalación.

Uno de los problemas, fue la imposibilidad de asociar mediante ‘*drag and drop*’ un elemento del MBOM a más de una operación. La solución encontrada fue realizar la segunda asignación mediante *Systems Assignment Assistant* y su opción indicada con una doble flecha horizontal, la cual habilita la asignación múltiple de un elemento.

La segunda problemática con la que nos encontramos viene a la hora de las simulaciones, ya que varios de los bancos de trabajo contienen tramos de sus secuencias de operaciones en paralelo y si dos de estas secuencias contienen operaciones relativas a un mismo elemento del MBOM, el sistema entra en conflicto y la pieza

desaparece de uno de los montajes para continuar en el otro. Por ejemplo, mientras se ensamblaba el grupo rotatorio en la *Secondary Station 1 [Shaft]* (para luego ser ensamblado de nuevo), en la *Principal Station* se empleaba la segunda etapa del compresor centrífugo para ensamblarla, sin haberse esta desmontado todavía en la primera estación; desapareciendo de esta antes de tiempo. La solución dada es restringir las operaciones con relaciones de precedencia, de forma que una pieza previamente instalada no pueda volverse a instalar por segunda vez, hasta que se haya desinstalado, lo cual además tiene todo el sentido del mundo si lo pensamos mínimamente.

Para la representación de diagrama de Gantt, se ha decidido realizar la siguiente asignación simplificada de tiempos, justificada con criterios como el tamaño de la pieza, el tipo de operación o la dificultad de acceso a la zona de instalación:

- Operaciones de carga y posicionamiento de ‘piezas pequeñas’ o ‘lotes de tornillos/tuercas’ **(2 min)**
- Operaciones de carga y posicionamiento de ‘piezas intermedias’ o ‘pequeñas e internas’ **(3.5 min)**
- Operaciones de carga y posicionamiento de ‘piezas grandes’ **(5 min)**
- Operaciones de desmontaje y almacenamiento durarán la mitad que si fuesen de carga **(x/2 min)**
- Operaciones instalación/ensamblaje **(2min)**
 - Si incluyen el apretado de tornillos/tuercas estos 2 minutos se aumentarán de forma proporcional a la cantidad de elementos a apretar hasta un **(máximo de 5 min)**
- Operaciones de ‘rotación del conjunto’ en el banco principal de trabajo **(2min)**

El diagrama de Gantt total resultante es el siguiente mostrado en la Figura 5-8, donde se han rodeado las distintas estaciones con colores para facilitar la, ya de por sí complicada, representación visual.

- En azul tendremos la *Principal Station*
- En negro la *Secondary Station 1 [Shaft]*
- En rojo la *Secondary Station 2 [Turbine]*
- En verde oscuro la *Substation A [Diaphragm 1]* y *Substation B [Diaphragm 2]* y en verde claro la *Substation C [Nose Cone]*
- En naranja el sistema extra de proceso completado *Complete Engine [Send to Packing Line]*



Figura 5-8. Diagrama de Gantt del proceso total

Al igual que como ocurría en el MBOM, la representación total, si bien es ejemplificativa, es bastante deficiente y por lo tanto, no es viable una representación de todas las *tiles* y sus operaciones asociadas, ya que son tantas que dejan de apreciarse con claridad

En cuanto al desglose total de operaciones y tiempos tenemos:

Tipo de Operación	Cantidad total	Tiempo total
Carga y posicionamiento	131	305 min
Desmontaje	17	22.25 min
Instalación/ Ensamblaje	36	105 min
Rotación del conjunto	8	16 min
Manipulación y traslado hacia la estación principal	4	18.5 min
Total de todo el proceso	195 ops.	466.75 min

Tabla 5-1. Tabla resumen del sistema completo.

A continuación, se procederá al igual que se hizo en el capítulo anterior con el MBOM, a mostrar de forma individual cada uno de los sistemas relevantes, el listado de operaciones que lo conforman y su respectiva representación restringida temporalmente del diagrama de Gantt.

Señalar que las escalas no son iguales en todas las imágenes. Esta se ha variado para poder reducir el tamaño del diagrama y que se lean lo mejor posible los nombres de las operaciones.

5.3.1 Estación principal

5.3.1.1 Fase I

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

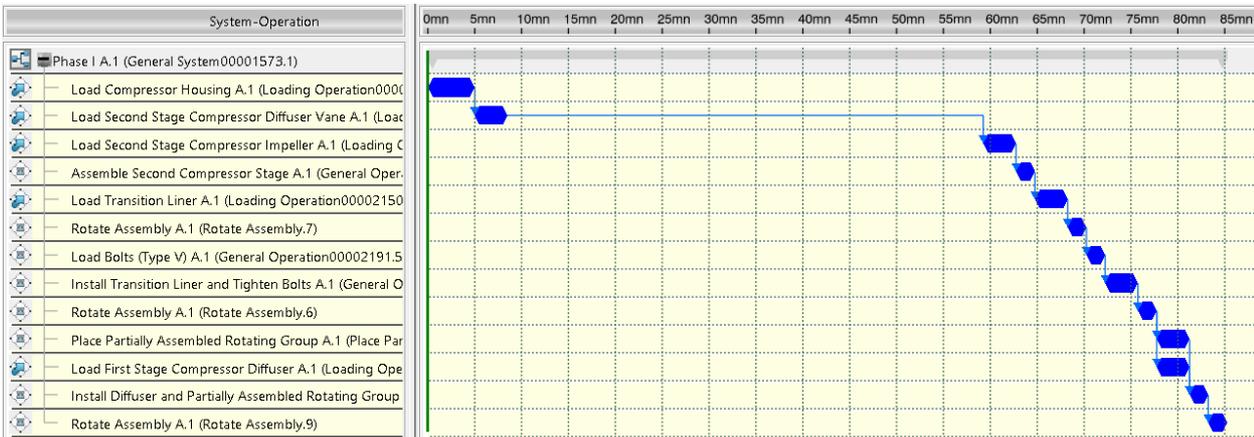


Figura 5-9. Operaciones del sistema 'Principal Station: Phase I'.

Donde la espera entre la carga y posicionamiento del Difusor de la segunda etapa del compresor y la carga y posicionamiento de la Segunda etapa de rotor centrífugo del compresor, viene justificada con que es necesario que esta segunda pieza sea desinstalada antes del conjunto rotatorio en la Estación secundaria 1 [Eje] (tras haberse instalado previamente en la misma).

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	6	17.5 min
Desmontaje	-	-
Instalación/ Ensamblaje	3	7.5 min
Rotación del conjunto	3	6 min
Manipulación y traslado hacia la estación principal	1	3.5 min
Total	13 ops.	34.5 min

Tabla 5-2. Tabla resumen del sistema ‘Principal Station: Phase I’.

5.3.1.2 Fase II

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

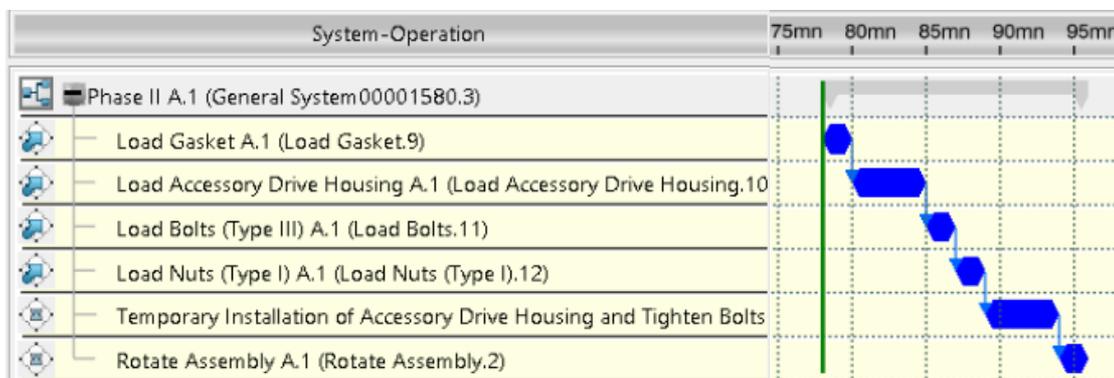


Figura 5-10. Operaciones del sistema ‘Principal Station: Phase II’.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	4	11 min
Desmontaje	-	-
Instalación/ Ensamblaje	1	5 min
Rotación del conjunto	1	2 min
Manipulación y traslado hacia la estación principal	-	-
Total	6 ops.	18 min

Tabla 5-3. Tabla resumen del sistema ‘Principal Station: Phase II’.

5.3.1.3 Fase III

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

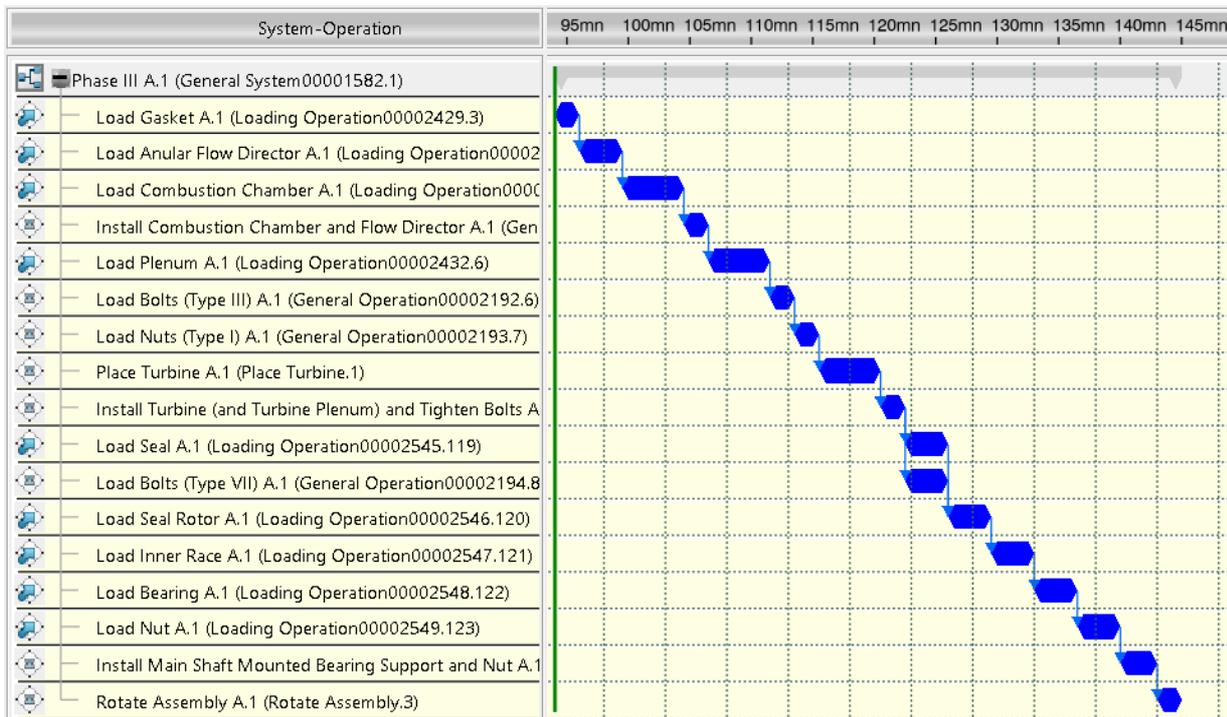


Figura 5-11. Operaciones del sistema 'Principal Station: Phase III'.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	12	37 min
Desmontaje	-	-
Instalación/ Ensamblaje	3	7 min
Rotación del conjunto	1	2 min
Manipulación y traslado hacia la estación principal	1	5 min
Total	17 ops.	51 min

Tabla 5-4. Tabla resumen del sistema 'Principal Station: Phase III'.

5.3.1.4 Fase IV

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

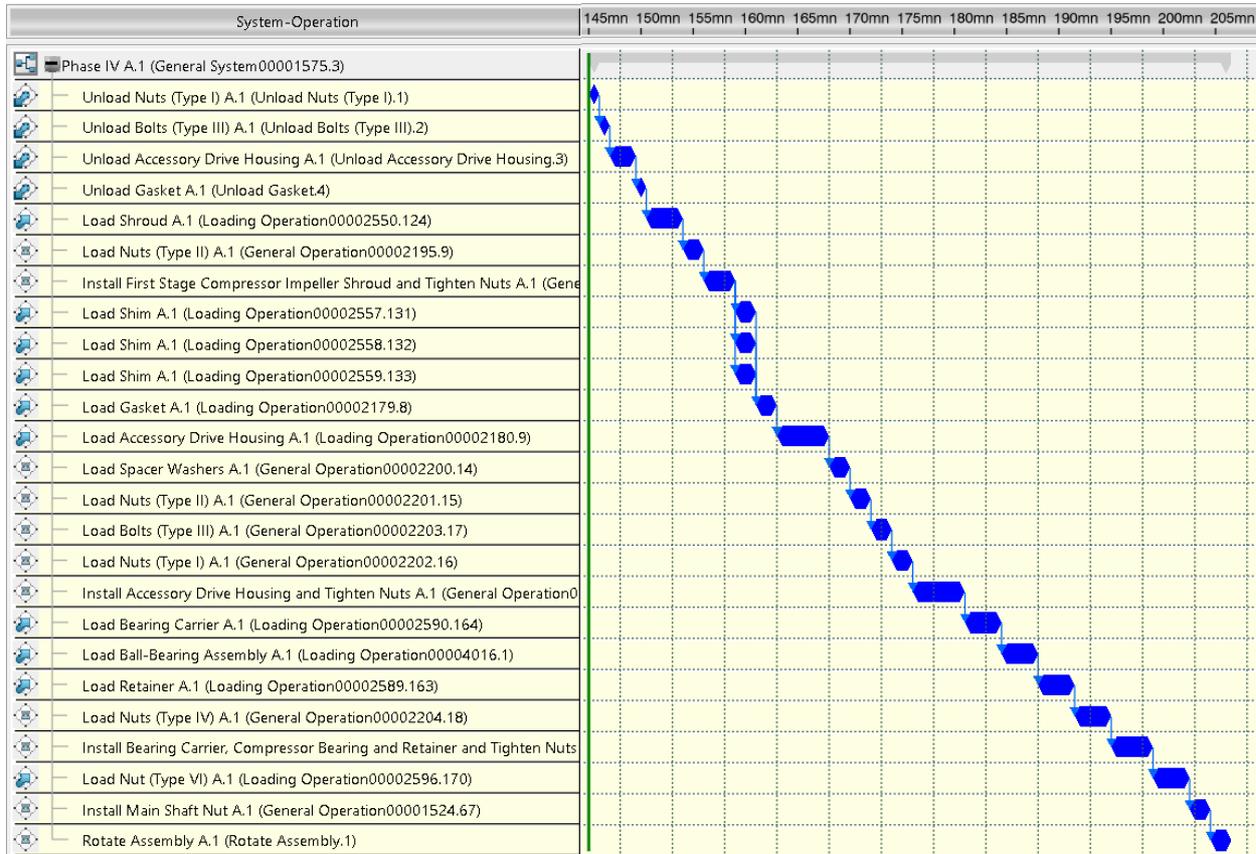


Figura 5-12. Operaciones del sistema 'Principal Station: Phase IV'.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	16	40 min
Desmontaje	4	5.5 min
Instalación/ Ensamblaje	4	14 min
Rotación del conjunto	1	2 min
Manipulación y traslado hacia la estación principal	-	-
Total	25 ops.	61.5 min

Tabla 5-5. Tabla resumen del sistema 'Principal Station: Phase IV'.

5.3.1.5 Fase V

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

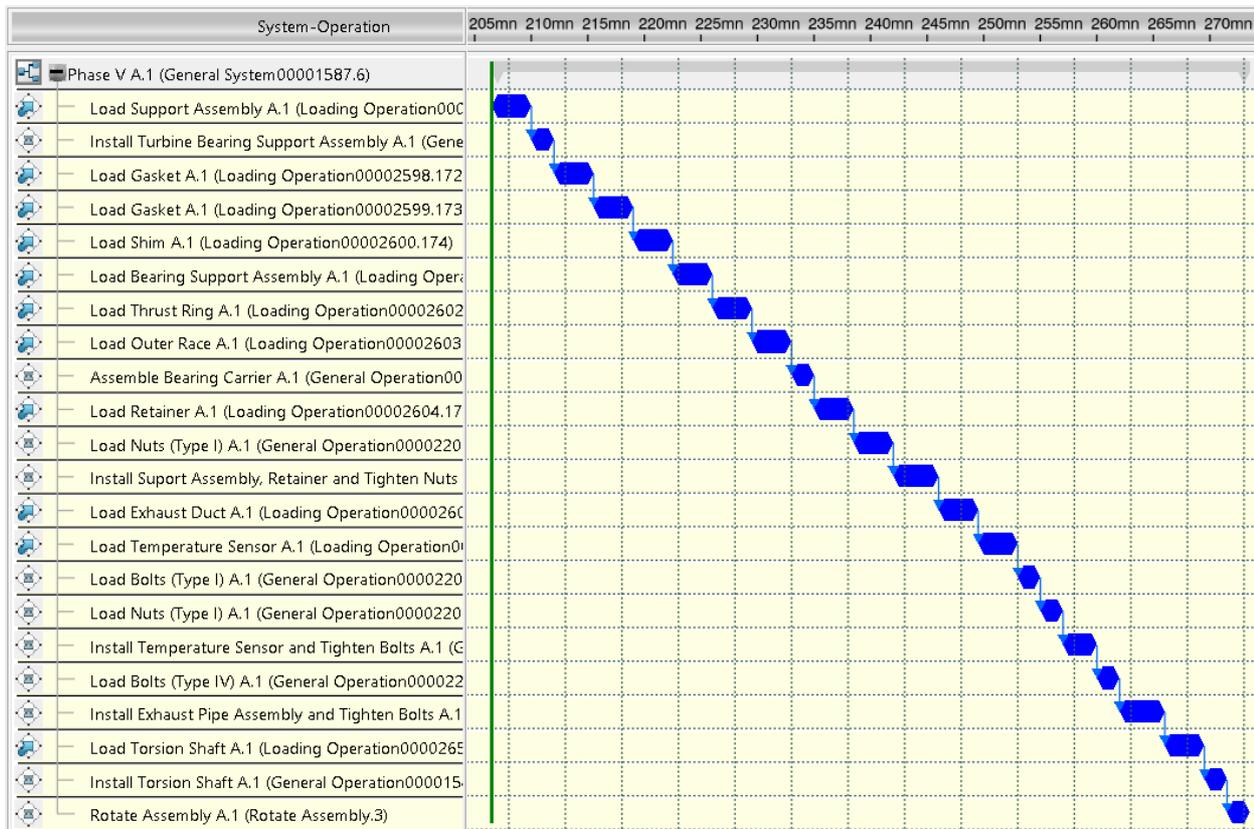


Figura 5-13. Operaciones del sistema 'Principal Station: Phase V'.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	15	48 min
Desmontaje	-	-
Instalación/ Ensamblaje	6	17 min
Rotación del conjunto	1	2 min
Manipulación y traslado hacia la estación principal	-	-
Total	22 ops.	67 min

Tabla 5-6. Tabla resumen del sistema 'Principal Station: Phase V'.

5.3.1.6 Fase VI

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

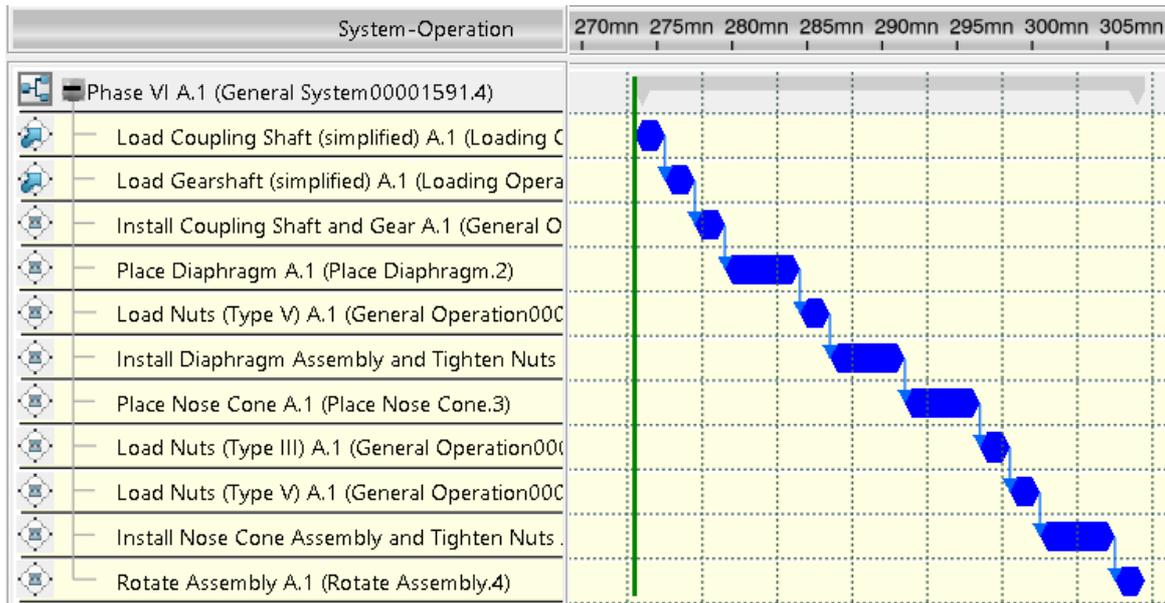


Figura 5-14. Operaciones del sistema ‘Principal Station: Phase VI’.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	5	10 min
Desmontaje	-	-
Instalación/ Ensamblaje	3	12 min
Rotación del conjunto	1	2 min
Manipulación y traslado hacia la estación principal	2	10 min
Total	11 ops.	34 min

Tabla 5-7. Tabla resumen del sistema ‘Principal Station: Phase VI’.

5.3.1.7 Fase VII

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

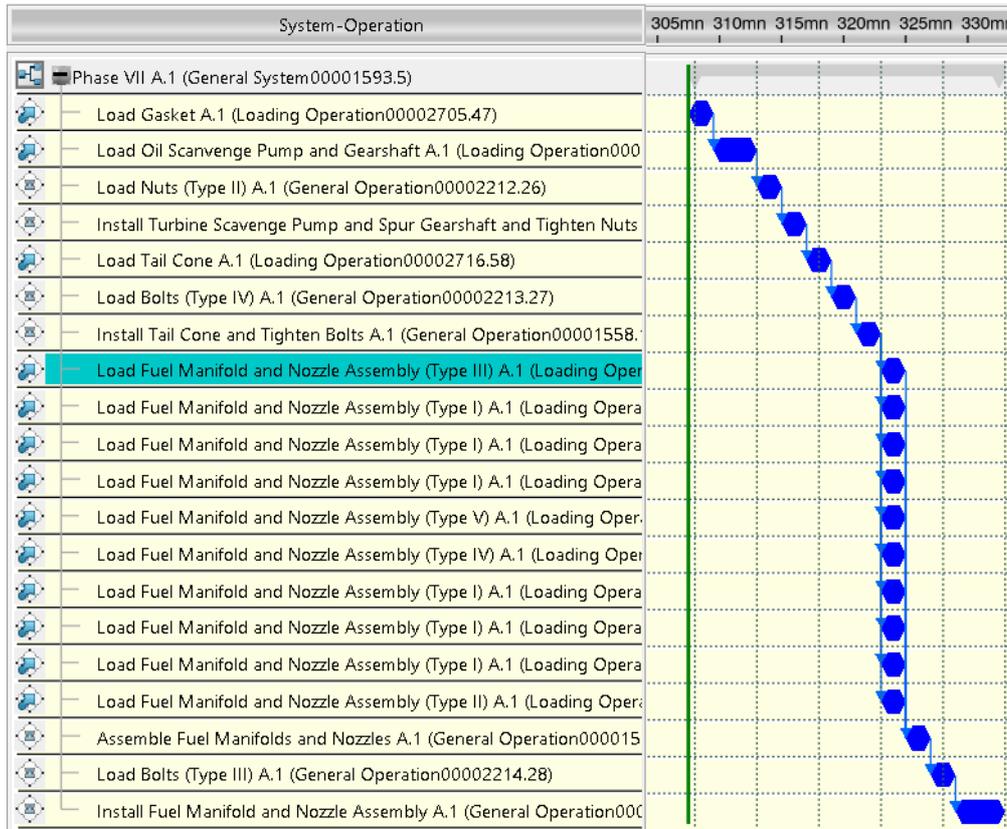


Figura 5-15. Operaciones del sistema ‘Principal Station: Phase VII’.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	16	15.5 min
Desmontaje	-	-
Instalación/ Ensamblaje	4	10 min
Rotación del conjunto	-	-
Manipulación y traslado hacia la estación principal	-	-
Total	20 ops.	25.5 min

Tabla 5-8. Tabla resumen del sistema ‘Principal Station: Phase VII’.

5.3.2 Estación secundaria 1 [Eje]

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

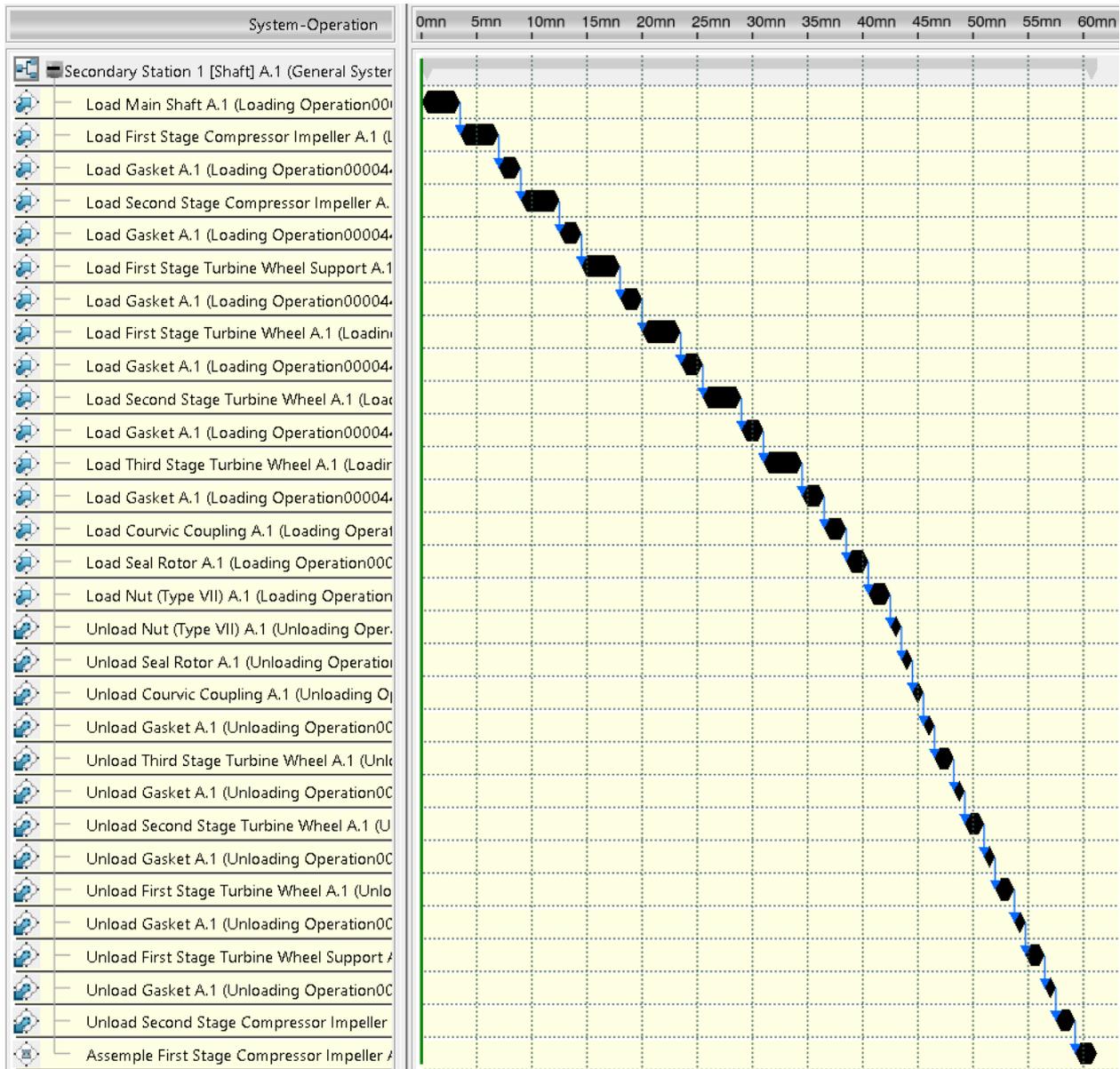


Figura 5-16. Operaciones del sistema ‘Secondary Station 1 [Shaft]’.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	16	42.5 min
Desmontaje	13	16.75min
Instalación/ Ensamblaje	1	2 min
Rotación del conjunto	-	-
Manipulación y traslado hacia la estación principal	-	-
Total	30 ops.	91.25 min

Tabla 5-9. Tabla resumen del sistema ‘Secondary Station 1 [Shaft]’.

5.3.3 Estación Secundaria 2 [Turbina]

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

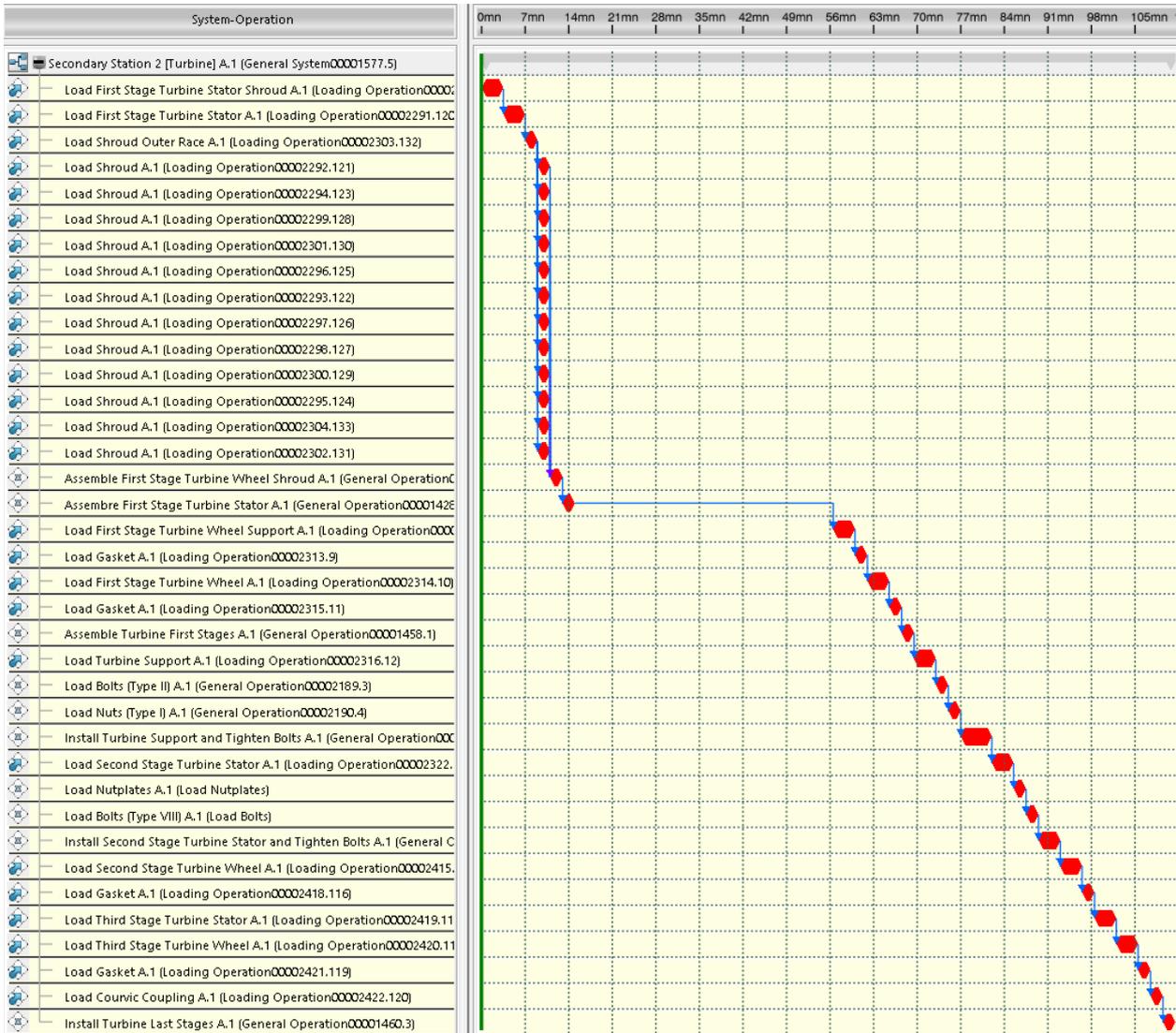


Figura 5-17. Operaciones del sistema ‘Secondary Station 2 [Turbine]’.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	31	51.5 min
Desmontaje	-	-
Instalación/ Ensamblaje	6	16.5 min
Rotación del conjunto	-	-
Manipulación y traslado hacia la estación principal	-	-
Total	37 ops.	68 min

Tabla 5-10. Tabla resumen del sistema ‘Secondary Station 2 [Turbine]’.

5.3.4 Estación Secundaria 3 [Diafragma y Nose Cone]

5.3.4.1 Subestación A [Diafragma 1]

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

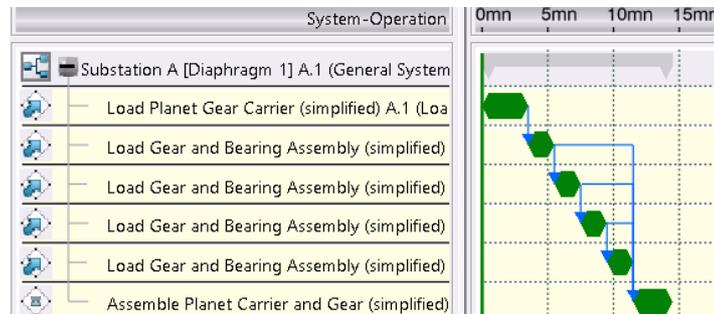


Figura 5-18. Operaciones del sistema ‘Substation A [Diafragma 1]’.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	5	11.5 min
Desmontaje	-	-
Instalación/ Ensamblaje	1	3 min
Rotación del conjunto	-	-
Manipulación y traslado hacia la estación principal	-	-
Total	6 ops.	14.5 min

Tabla 5-11. Tabla resumen del sistema ‘Substation A [Diafragma 1]’.

5.3.4.2 Subestación B [Diafragma 2]

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

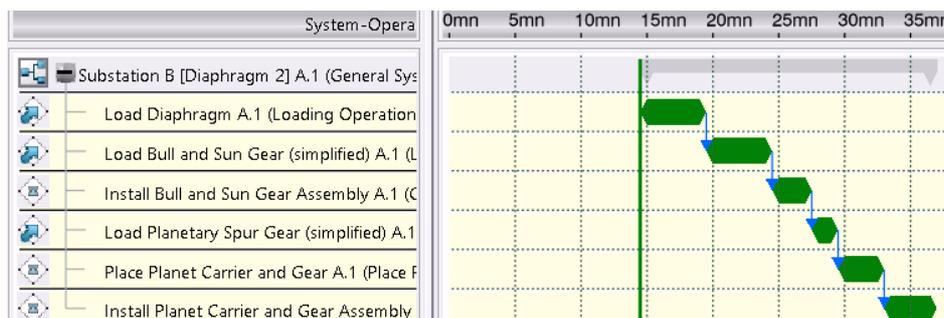


Figura 5-19. Operaciones del sistema ‘Substation B [Diafragma 2]’.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	3	12 min
Desmontaje	-	-
Instalación/ Ensamblaje	2	7 min
Rotación del conjunto	-	-
Manipulación y traslado hacia la estación principal	1	3.5 min
Total	6 ops.	22.5 min

Tabla 5-12. Tabla resumen del sistema ‘Substation B [Diafragma 2]’.

5.3.4.3 Subestación C [Nose Cone]

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

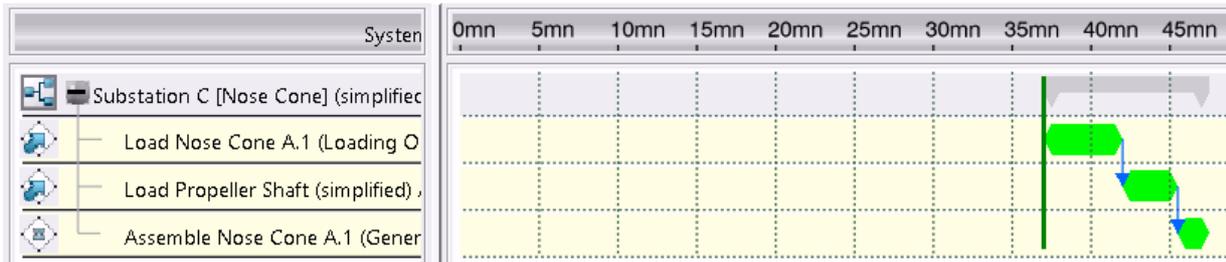


Figura 5-20. Operaciones del sistema 'Substation C [Nose Cone]'.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	2	8.5 min
Desmontaje	-	-
Instalación/ Ensamblaje	1	2 min
Rotación del conjunto	-	-
Manipulación y traslado hacia la estación principal	-	-
Total	3 ops.	10.5 min

Tabla 5-13. Tabla resumen del sistema 'Substation C [Nose Cone]'.

5.3.5 Estación extra de Motor completo [Enviar a línea de empaquetado]

Cuyas operaciones y diagrama de Gantt son las representadas en la siguiente figura:

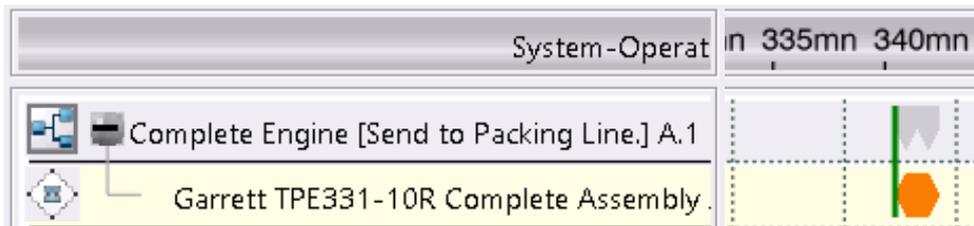


Figura 5-21. Operaciones del sistema 'Complete Engine [Send to Packing Line]'.

Tratándose de una operación simbólica breve que define el final del proceso completo.

A modo de resumen puede extraerse el siguiente desglose de operaciones y tiempos totales:

Tipo de Operación	Cantidad	Tiempo
Carga y posicionamiento	-	-
Desmontaje	-	-
Instalación/ Ensamblaje	1	2 min
Rotación del conjunto	-	-
Manipulación y traslado hacia la estación principal	-	-
Total	1 op.	2 min

Tabla 5-14. Tabla resumen del sistema 'Complete Engine [Send to Packing Line]'.

Completando la Planificación del proceso íntegro de montaje del motor Garrett TPE 331-10R.

Llegados a este punto, recalcar dos funciones bastante útiles en lo que al proceso de revisión se refiere, estas son las de *Systems Assignment Assistant* y *B. I. Essentials*. La primera, empleada de forma genérica a cualquier sistema ya definido nos mostrará los componentes definidos en el MBOM que quedan por asignar, siendo bastante útil para ver si hemos pasado por alto algún elemento.

La segunda función mencionada es el apartado *System Update Status* de la herramienta *B. I. Essentials* que nos permite verificar mediante una intuitiva paleta de colores, el estado de las asignaciones entre los elementos del MBOM y las baldosas o *tiles* generadas en *Process Planning*. Esta herramienta ha sido importante en el presente proyecto ya que parte de la definición del MBOM se ha realizado de forma iterativa, incluso en etapas avanzadas del proyecto, por lo que esta herramienta nos ha avisado si había alguna asignación no actualizada, ya fuese por estar “rota” o porque pudiese dar problemas tras haber modificado el MBOM.

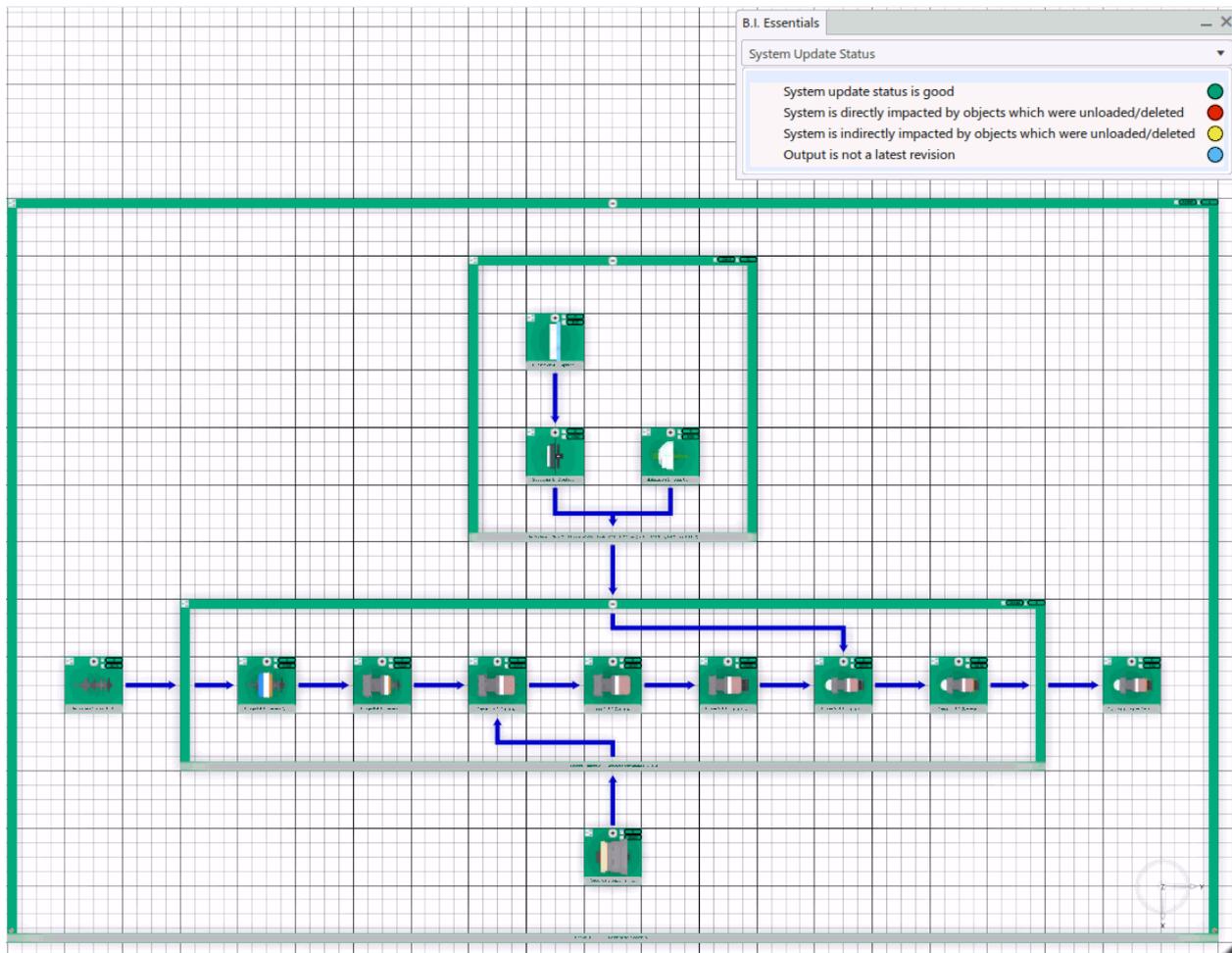


Figura 5-22. Comprobación mediante *B. I. Essentials* de que las asignaciones están actualizadas.

Como puede verse en el breve ejemplo de la Figura 5-22, todas las piezas están asignadas correctamente y además el *scope* está creado con éxito. Esta herramienta nos ofrece un plus de seguridad a la hora de continuar con las posteriores etapas del modelo.

5.4 Análisis de la carga de trabajo en las estaciones

Previo a continuar con la siguiente etapa del trabajo, se va a realizar un sencillo análisis que ofrece la aplicación *Process Planning*, sobre la carga de trabajo en las distintas estaciones en las que se ha dividido el proceso. Este se realizará mediante la herramienta *Workload Balancing*, la cual permite visualizar el estado de carga de trabajo existente en uno o varios sistemas, pudiendo extraer distintas reflexiones acerca del reparto propuesto y/o gestionar dicho reparto entre sistemas, buscando optimizar conforme a algún parámetro.

En esta herramienta, es interesante el parámetro *Cycle Time* o tiempo de ciclo, el cual no es otra cosa que el cociente entre un periodo de tiempo disponible y las unidades a fabricar en el mismo. A partir de la definición de este parámetro se puede estudiar el nivel de utilización de cada sistema y redistribuir las operaciones en el caso de que alguno de los citados sistemas se sobrecargue demasiado.

Sin embargo, no se han tenido suficientes datos de partida para poder definir correctamente este parámetro *Cycle Time*, por lo que el objetivo de este apartado se enfoca en mostrar de forma breve la carga de trabajo que generan las operaciones descritas en el manual, indicando como posible continuación futura la aplicación de este tipo de análisis más avanzado de utilización y/o redistribución de las operaciones.

Si aplicamos la citada herramienta *Workload Balancing* sobre el sistema “raíz” se obtienen los resultados mostrados en la Figura 5-23, donde cada uno de los elementos que aparecen apilados representa una operación, cuya duración es proporcional a la altura.

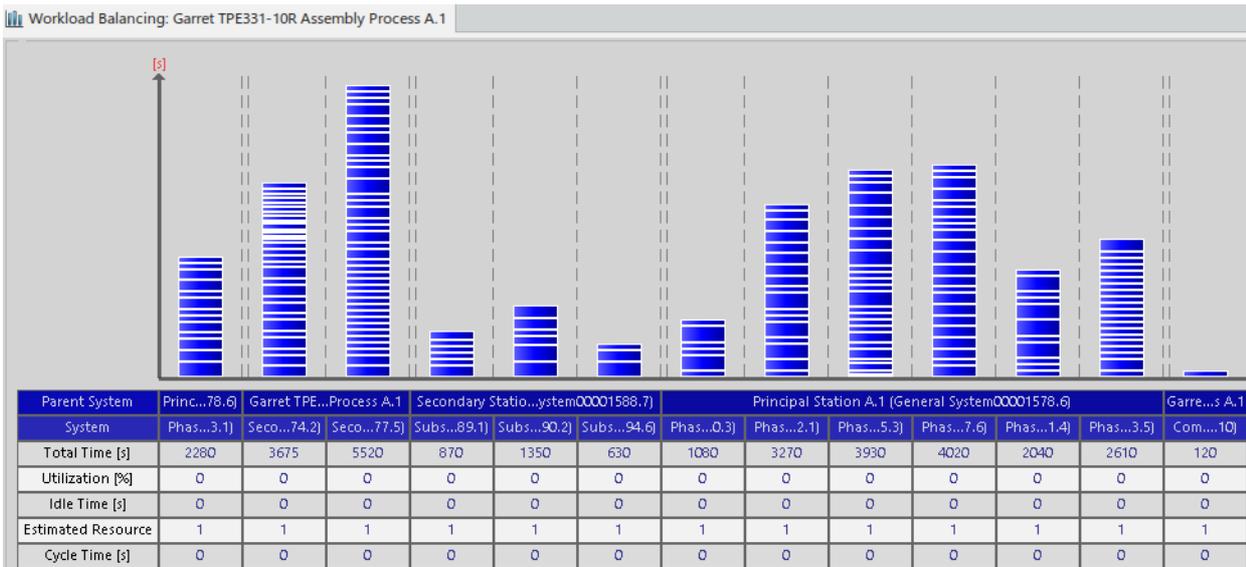


Figura 5-23. Carga de trabajo de todos los sistemas definidos.

A continuación, se procede a analizar cada una de las estaciones de trabajo, con el objetivo de ofrecer una mejor representación visual, por separado, del diagrama anterior.

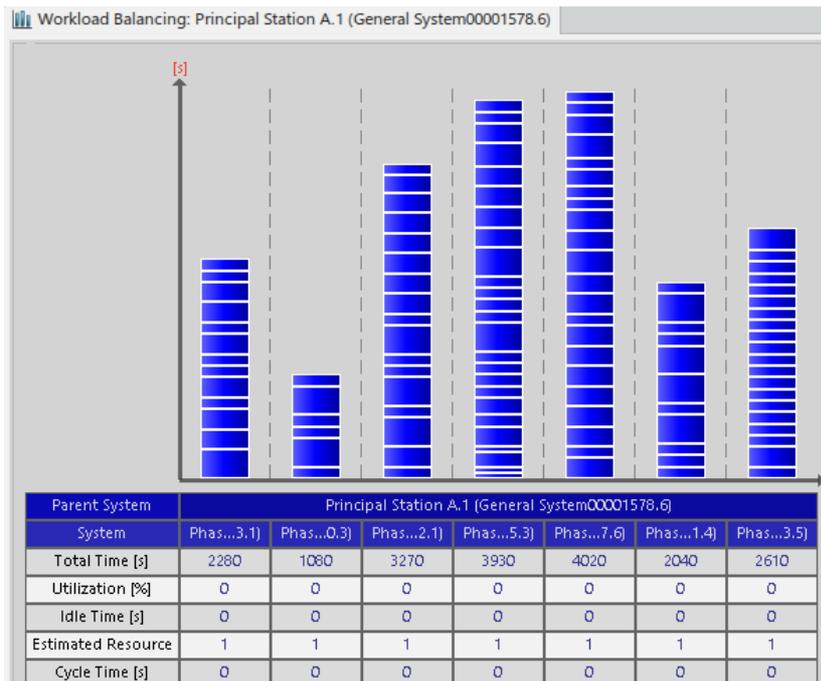


Figura 5-24. Carga de trabajo de *Principal Station* y sus distintas Fases.

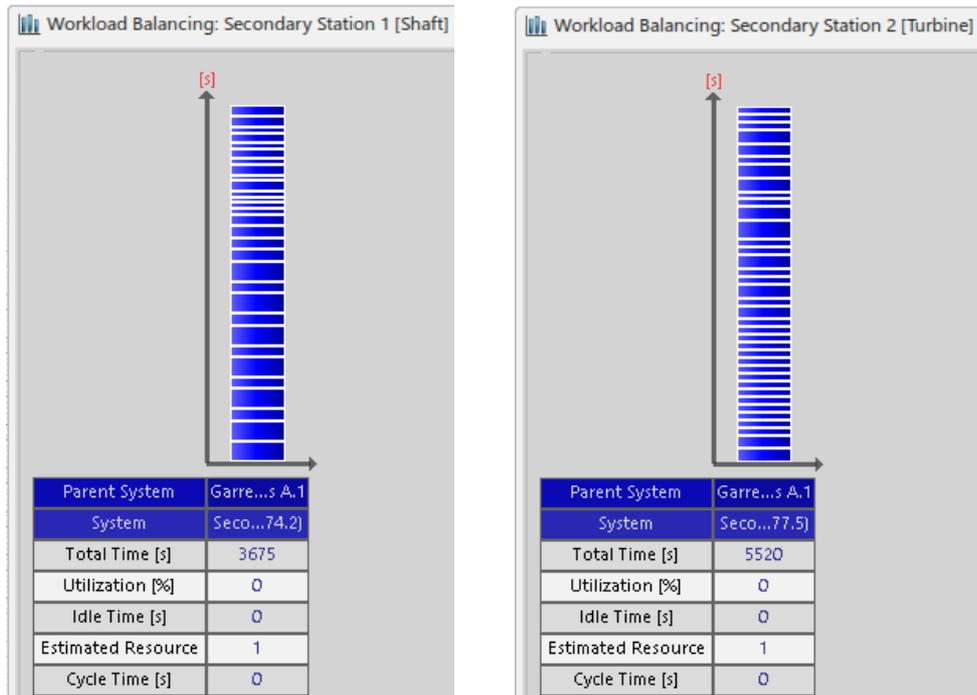


Figura 5-25. Carga de trabajo de *Secondary Station 1 [Shaft]* (izquierda) y *Secondary Station 2 [Turbine]* (derecha).

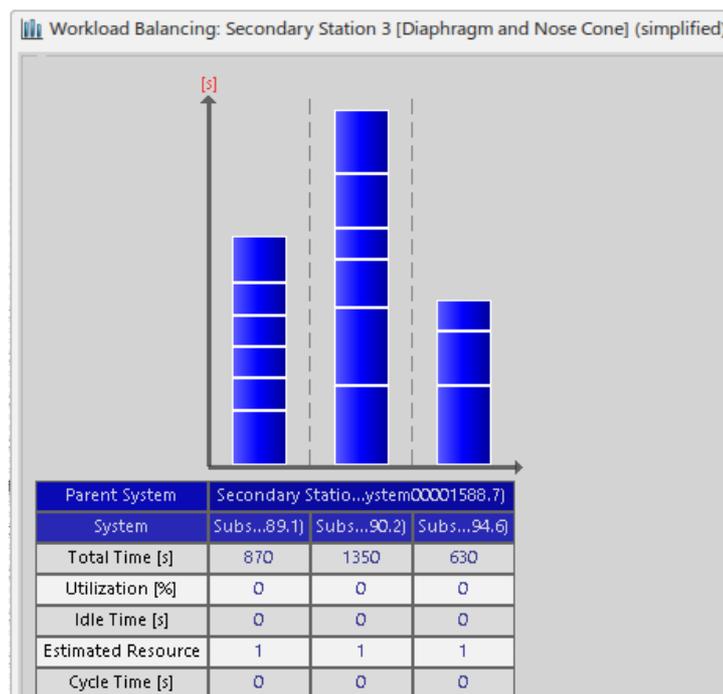


Figura 5-26. Carga de trabajo de *Secondary Station 3 [Diaphragm and Nose Cone]*.

De estos análisis puede extraerse el desglose en operaciones y tiempos que se emplea en cada estación.

Tras esta serie de comprobaciones y análisis, hemos alcanzado satisfactoriamente un objetivo más del proyecto, habiendo definido la Planificación del proceso de montaje del motor. Por lo tanto, ya tenemos definido tanto el MBOM como la distribución temporal y en estaciones de trabajo de las operaciones.

El próximo paso lógico será el de distribuir espacialmente las estaciones de trabajo y las operaciones, así como definir y asignar los recursos necesarios para llevarlas a cabo. Esta tercera etapa se detallará en el próximo Capítulo 6.

6 RECURSOS Y DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

El presente capítulo está dedicado a desarrollar la tercera etapa del proyecto, cuyo objetivo es la definición de los recursos necesarios para un desempeño correcto de las operaciones definidas en la etapa anterior, así como la distribución espacial tanto de estas como de los elementos del MBOM a los que van asociadas. Por último, se persigue asignar los recursos definidos a las operaciones, de forma que tengamos un modelo funcional de planta de montaje, con sus distintos puestos o estaciones de trabajo, operarios y herramientas o utillaje necesario para que estos desarrollen correctamente las distintas secuencias de operaciones hasta obtener el producto final.

Este proceso se desarrollará mediante la aplicación de 3DEXperience llamada *Equipment Allocation*. Esta aplicación permite la definición y el importado de recursos de muy variada tipología, abarcando desde la propia fábrica hasta bancos de trabajo, herramientas, operarios y estantes de almacenamiento. Estos recursos se organizarán espacialmente de forma que simulemos una pequeña factoría, dividida en estaciones de trabajo con sus operarios asignados para, posteriormente, generar los vínculos entre recursos y operaciones, de forma que dichas asignaciones representen de la forma más fidedigna posible el proceso real de montaje del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R en un taller aeronáutico. De forma complementaria, la citada aplicación también permite la gestión de recursos buscando optimizarlos, o un apartado bastante completo de simulaciones del proceso de montaje, con el objetivo de verificar la viabilidad del proceso definido.

6.1 Aplicación “Equipment Allocation”

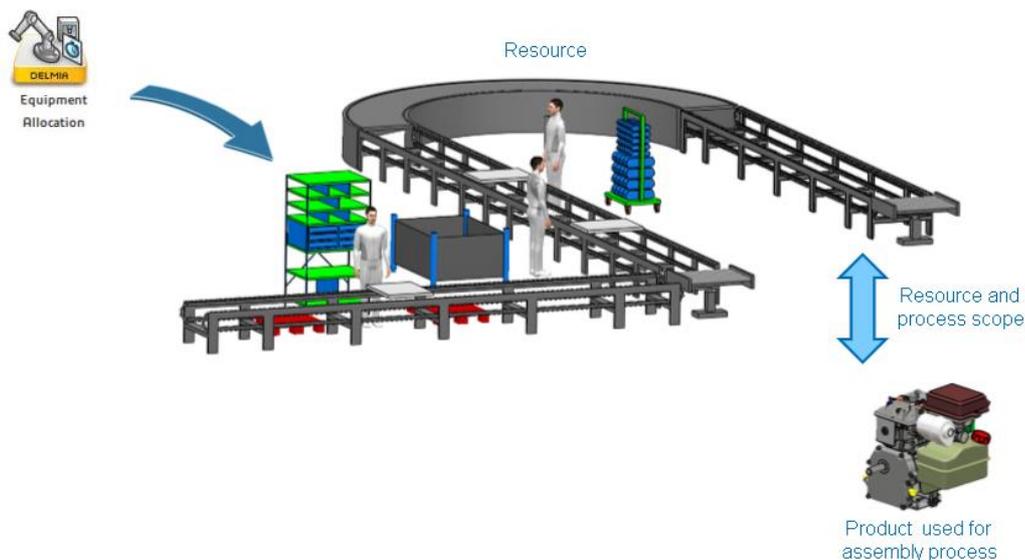


Figura 6-1. Imagen explicativa de la utilidad de los recursos en *Equipment Allocation* [7].

En esta tercera etapa nuestro objetivo es el de definir una serie de recursos, estructurarlos y asignarlos a las operaciones generadas previamente en la segunda etapa, mediante la aplicación de 3DEXperience *Equipment*

Allocation. Estas operaciones a su vez actúan sobre una serie de elementos del MBOM, definidos en la primera etapa. Por lo tanto podemos ver que el proceso de fabricación está totalmente interrelacionado, desde las primeras etapas o cimientos hasta las últimas.

3DExperience enfoca estas relaciones de manera muy sencilla e intuitiva, siguiendo el propio flujo de etapas del sistema real, anteriormente explicado.

Sin embargo, surge la pregunta ¿qué es? o ¿en qué consiste un recurso?, y ¿por qué estos son tan relevantes en el contexto de un sistema de fabricación como el de montaje del Garrett TPE 331-10R?.

Pues bien, un recurso puede definirse en el ámbito de los sistemas de fabricación como cualquier artefacto o elemento (robot, humano, herramienta,...) empleado en el proceso o línea de ensamblado, con el propósito de fabricar un producto [13].

Estos procesos pueden ser de tipos muy variados, siendo catalogados por la aplicación *Equipment Allocation* dentro de las siguientes tipologías recogidas en la Tabla 6-1.

Resource Type	Icon	Function	Programmable	Implement Link
Area		Organizational	Non-Programmable	Where
Manufacturing Cell		Organizational	Non-Programmable	Where
Worker		Working	Programmable	Who
Robot		Working	Non-Programmable	Who
Transport		Working	Programmable	Who
NC Machine		Working	Programmable	Who
Industrial Machine		Working	Non-Programmable	Who
Resource Type	Icon	Function	Programmable	Implement Link
Inspect		Working	Programmable	Who
Conveyor		Working	Non-Programmable	Who
Tool Equipment		Non-Working	Non-Programmable	With
Storage		Non-Working	Programmable	With
Control Equipment		Working	Programmable	Who
Logic Controller		Working	Non-Programmable	Who
Sensor		Non-Working	Non-Programmable	With
User Defined Resource		Non-Working	Non-Programmable	With

Tabla 6-1. Tipos de recursos que pueden definirse en la app *Equipment Allocation* [7].

Nuevamente, y al igual que pasaba entre el MBOM y el modelo de partida, o entre el MBOM y la

Planificación del proceso; la estructura de recursos que generemos ha de estar vinculada al sistema de fabricación que define la secuencia de operaciones. Se podrán realizar uno o varios *scope*, dependiendo del proceso que persigamos seguir, como podemos ver en el ejemplo de la Figura 6-2.

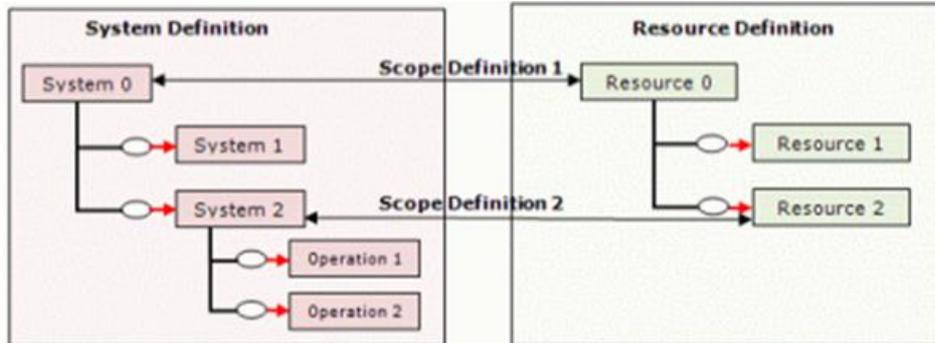


Figura 6-2. Ejemplo de estructuración de un plan de fabricación [7].

Nos queda claro entonces que el primer paso será realizar una reflexión sobre los recursos que va a necesitar nuestra secuencia o sistema de operaciones, para posteriormente estructurarlos a modo de árbol y finalmente vincularlos a las distintas operaciones. Estos recursos, aunque pueden generarse desde distintas aplicaciones de 3DExperience, se han decidido modelar en CATIA V5 y posteriormente exportarlos hacia *Equipment Allocation* en formato *CATProduct* o *CATPart*, con el objetivo de optimizar el tiempo disponible.

Por lo tanto se procederá a importar una factoría externa, la cual se readaptará a las necesidades del presente proyecto, creando un nodo “raíz” *Factory* que encabezará la estructura de recursos. Dentro de este se introducirá tanto la propia superficie de la factoría como los distintos bancos de trabajo, utillaje, trabajadores y demás ; atendiendo a la tipología explicada en la Tabla 6-1.

Una forma alternativa de catalogar estos recursos es reflexionando sobre la pregunta que resuelven, si solventan la cuestión ‘¿dónde?’ serán recursos de área mientras que si responden a las preguntas ‘¿quién?’ o ‘¿con qué?’, lo serán de tipo trabajador o herramienta respectivamente. Esta simple reflexión es bastante útil a la hora de clasificar los recursos importados.

Estos recursos han de estar asignados a las operaciones correspondientes. Al igual que en etapas anteriores, esto puede realizarse mediante la sencilla técnica manual (*‘drag and drop’*), arrastrando cada una de las operaciones al recurso o recursos necesarios para que dichas operaciones se lleven a cabo de forma correcta. Nuevamente existen herramientas alternativas para desempeñar esta tarea, como puede ser la de *Assignment Manager*, indispensable si queremos gestionar grandes cantidades de elementos.

Al margen de la distribución espacial de los recursos y de la asignación de estos, en esta etapa también es relevante la distribución temporal de los mismos, que puede contemplarse en un diagrama de Gantt de la utilización de los recursos. Esto puede llegar a ser bastante relevante en factorías donde hay un limitado número de algunas herramientas, que deben compartirse entre varias operaciones, pudiendo surgir conflictos y cuellos de botella si no se ha gestionado bien la secuenciación temporal de las operaciones.

Es interesante como cada vez el proceso de fabricación se vuelve más y más complejo, incluso partiendo de un concepto simple, y que cada vez involucra más variables a tener en cuenta. Esto ensalza la gran utilidad de plataformas multidisciplinares e integradas como 3DExperience, capaz de llevar a cabo análisis que involucran una o varias etapas de la fabricación a la vez.

Estos estudios pueden realizarse en *Equipment Allocation* mediante análisis de la utilización de recursos y opciones de medir la eficiencia y equilibrar, tanto los recursos como las operaciones. Estos análisis, aun quedando fuera del alcance del proyecto, como se ha indicado varias veces, son de gran utilidad en las primeras etapas de diseño de un proceso de montaje, pudiendo ser la diferencia entre el éxito o el fracaso de un proyecto.

La herramienta *B. I. Essentials* vuelve a ser relevante en esta etapa, pudiendo mostrar mediante una simplificada paleta de colores, opciones como la de ver si tenemos las operaciones asignadas a recursos de tipo *Working*, es decir a trabajadores o robots; o por otro lado nos puede indicar si están vinculados a recursos de tipo *Non-working*, como pueden ser las herramientas específicas para cada operación.

6.2 Tutoriales en la plataforma Eduspace

Al igual que en las anteriores etapas y una vez que tenemos claro qué son los recursos y qué objetivo perseguimos en esta etapa, es momento de realizar los tutoriales recomendados para practicar con la herramienta. Estos tutoriales están recogidos en [7], en concreto en *Process Planner*>*DELMIA Manufacturing Equipment Allocation Essentials*.

El primero de ellos, sirve para introducir tanto los recursos como los distintos tipos de estos que pueden definirse en la aplicación (reflejados en la Tabla 6-1), habiéndose importado un robot desde los catálogos propios de la plataforma 3DEXperience, para posteriormente posicionarlo junto con otra serie de herramientas.

Una vez que se ha definido y posicionado correctamente esta simplificada estructura de recursos, se ha procedido a vincularla mediante el ya conocido *scope* al modelo de motor a pistón *3.5HP_Engine*, practicándose también el posicionamiento del motor, tanto mediante coordenadas como mediante el movimiento directo del sistema de ejes del elemento. Este último es bastante práctico y se puede emplear usando ‘click derecho’ en el sistema coordinado inferior izquierdo que aparece y seleccionando la opción *Snap Automatically to Selected Object*.

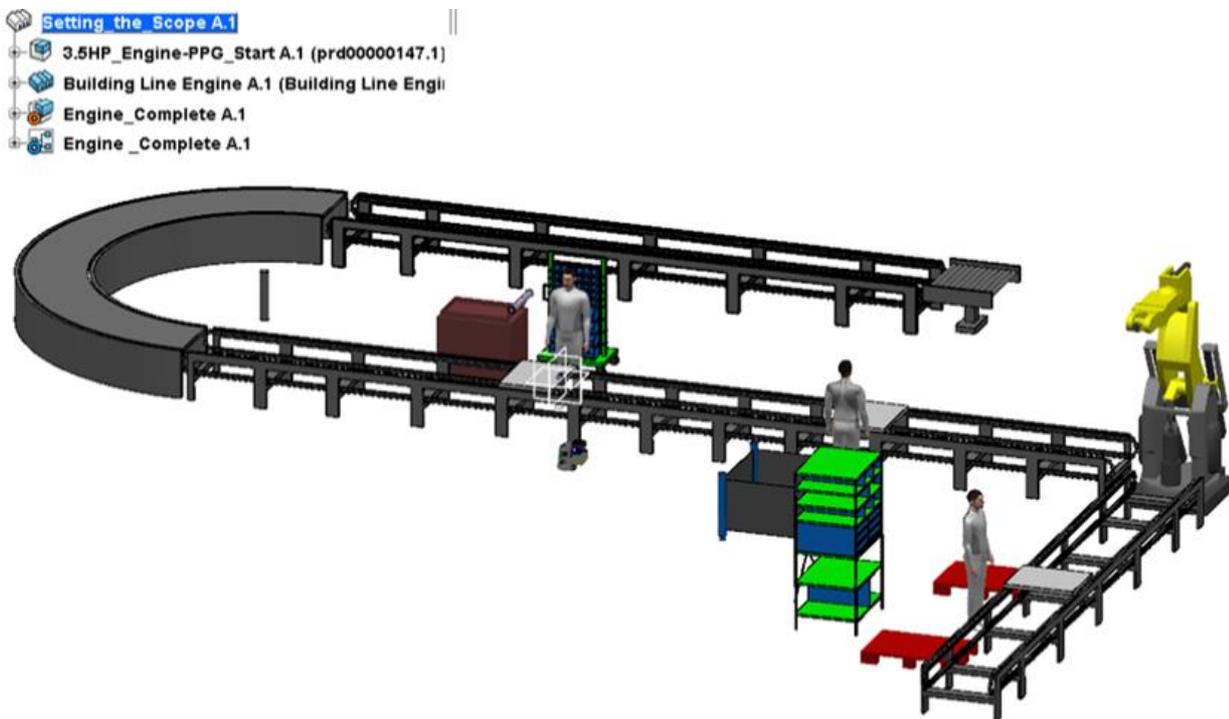


Figura 6-3. Tutorial de ejemplo para la definición de recursos, vinculación y posicionamiento.

A continuación, se han efectuado una serie de casos prácticos en los que se ha explicado la asignación de operaciones a distintos tipos de recursos, como pueden ser trabajadores o recursos de almacenaje temporal. Esto se ha realizado con el mismo modelo anterior y se ha empleado el diagrama de Gantt de utilización de recursos para obtener una visión global del proceso definido y de las operaciones asignadas a cada recurso.

Como caso extra de análisis del sistema y del margen de posible mejora existente, se ha hecho un equilibrado de operaciones entre los recursos a los que estaban asignados. Para ello es crucial conocer previamente el sistema y tener definido un *Cycle time* o tiempo de ciclo del proceso.

Como herramienta a la hora de comprobar la utilización de cada uno de los recursos, se ha empleado la funcionalidad *B. I. Essentials*>*Resource Utilization*, obteniendo los resultados mostrados en la figura 6-4 y pudiendo sacar como conclusión que hay trabajadores con mayor carga de trabajo que otros, por lo que no vendría nada mal un estudio del sistema con el objetivo de equilibrarlo.

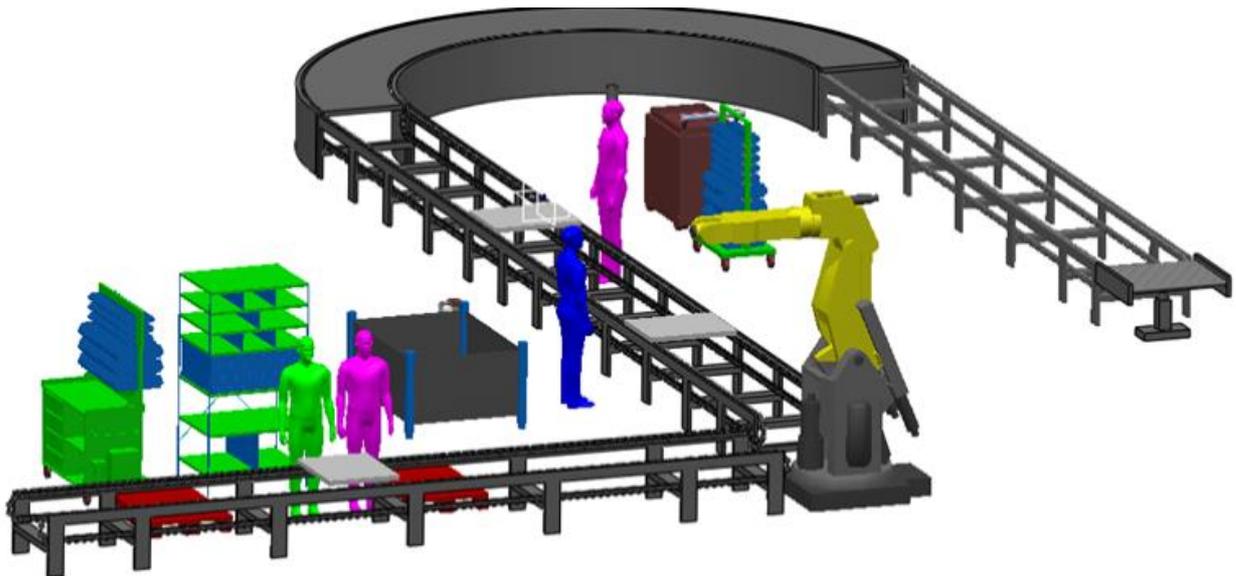


Figura 6-4. Chequeo de la utilización de cada recurso mediante *B. I. Essentials*.

Por último se han realizado dos casos prácticos más, enfocados a adquirir conceptos acerca del posicionamiento espacial de las operaciones y el simulado del proceso de montaje.

En el primero de ellos, se ha definido la posición final a la que llega una pieza tras una operación, mediante el comando *Operation position>Define position*, usando varios métodos para el posicionamiento como han sido:

- Posicionamiento mediante definición de coordenadas numéricas
- Posicionamiento mediante *Acumulative Snap*. Este método es bastante práctico, ya que es capaz de reconocer operaciones geométricas de posicionamiento, como puede ser el poner dos planos en contacto o colocar dos geometrías circulares de forma concéntrica.
- Posicionamiento mediante arrastrado del sistema de ejes asociado a la pieza, explicado previamente.

Estas posiciones definidas pueden copiarse mediante el comando *Operation Position>Copy Position* sobre la operación previamente posicionada, hacia una o más operaciones asignadas al mismo recurso. Esta estrategia de posicionamiento ha sido crucial para ahorrar tiempo en el caso del TPE 331-10R dado su número de piezas.

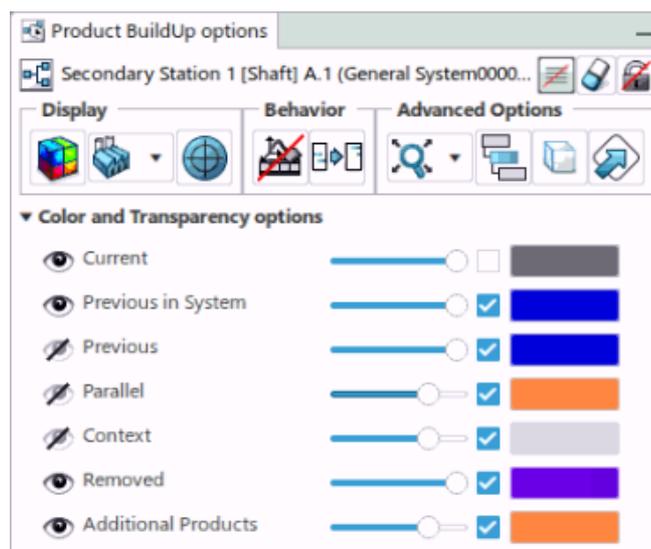


Figura 6-5. Opciones directas de simulación.

Por último se ha practicado las funcionalidades y opciones asociadas a la simulación del proceso de montaje, bastante valiosas a la hora de presentar los resultados obtenidos tras la definición del proceso, o a la hora de

comprobar si el propio proceso es correcto. Se pueden cambiar las opciones de visualización (Figura 6-5) para que muestre o deje de mostrar elementos, se puede rastrear en el árbol izquierdo la operación actual representada o simplemente cambiar la velocidad de simulación, entre otras opciones destacables.

Realizados ya todos los tutoriales relevantes a esta etapa de definición del proceso en *Equipment Allocation*, llega el momento de aplicar lo aprendido sobre nuestro modelo Garrett TPE 331-10R, cuyo proceso de montaje va cobrando cada vez mayor realismo. La definición y estructuración de los recursos, la asignación de los mismos y la comprobación de que esta asignación es correcta se explicará en el siguiente apartado.

6.3 Definición de recursos para el motor

Tras adquirir los conceptos generales de las herramientas presentes en el módulo *Equipment Allocation* y haber desarrollado los casos prácticos recomendados, en los tutoriales referentes al mismo, es momento de realizar un proceso similar aplicado a nuestro modelo; en el que ya tenemos definidos tanto el MBOM como los sistemas de fabricación y sus secuencias de operaciones asignadas.

Previo a la aplicación de los conceptos adquiridos, es necesaria una investigación del manual de Revisión general [2] y una posterior reflexión de cuáles son las herramientas, bancos de trabajo, tipo de factoría y resto de recursos necesarios, para desempeñar correctamente la secuencia de operaciones definida. Esta investigación ya se comenzó en la segunda etapa del presente trabajo, al usar el tipo de herramientas y banco de trabajo sobre el que desarrollar una operación concreta, como criterio para dividir el proceso de montaje en estaciones de trabajo distintas, así como otra serie de criterios para predefinir un *layout* de tipo taller de posiciones fijas.

Tras el citado estudio, se ha realizado una criba de los recursos principales más relevantes en el proceso que nos concierne, los cuales se expondrán más adelante. Tal y como se indicará, algunos de ellos (que son más generales) se han importado desde bibliotecas digitales para optimizar el tiempo empleado, habiéndose diseñado únicamente los recursos específicos de los que se hace mención en el manual, mediante CATIA V5, para ser posteriormente importados en la aplicación.

Por lo tanto se han modelado únicamente las herramientas principales más importantes, para desempeñar las operaciones que hacen referencia a las piezas que incluye el modelo de motor. Quedan fuera de los objetivos del trabajo tanto las herramientas secundarias así como los *dummies*, utillaje que quedará planteado como posible continuación futura del presente trabajo.

Recordar que las herramientas específicas descritas en el manual se han modelado sin planos o medidas disponibles, únicamente a partir de una vista general ofrecida en el manual, por lo que se han diseñado mediante un proceso iterativo, de forma que las herramientas se adaptasen a las piezas y localizaciones en las que se posicionan para desarrollar su función. Dadas estas limitaciones, los modelos son simplificados y no se corresponden en su totalidad con los ofrecidos por los distintos fabricantes.

En términos generales, se han generado y reutilizado recursos de la siguiente tipología:

- *Area*: Recurso zonal que define la superficie completa de trabajo de la factoría importada.
- *Manufacturing Cell*: Recurso zonal que define bancos de trabajo o utillaje donde se desarrollan operaciones. Se ha empleado también para definir lugares de almacenamiento momentáneo, donde el trabajador pueda tener las piezas necesarias para las operaciones en curso a su alcance.
- *Storage*: Define recursos destinados puramente al almacenamiento de piezas o conjuntos.
- *Worker*: Define trabajadores, encargados de realizar las operaciones de montaje del motor.
- *Tool Equipment*: Recursos que definen utillaje/herramientas necesarias para el correcto desempeño de las operaciones.

Algunos de estos recursos modelados y/o importados se mostrarán a continuación, con una breve justificación de su utilidad, así como un resumen de las operaciones asignadas a los mismos. Se ha supuesto que la factoría tiene medios suficientes para disponer en cada estación de un recurso de cada tipo de los necesarios para sus operaciones, justificado con la alta inversión que se da en los talleres aeronáuticos.

6.3.1 Taller de trabajo y estructuración del árbol de recursos

Tras la investigación y selección del tipo de *layout* desarrollados en el Capítulo 5, se llegó a la conclusión de que el más apropiado sería uno de tipo taller de posiciones fijas para los bancos de trabajo, siendo interesante que dichos bancos se encuentren cercanos entre sí para optimizar el proceso de traslado de conjuntos hacia la Estación principal.

Para su definición, se ha importado una factoría existente en la biblioteca digital GrabCAD, en concreto de [16], la cual era bastante conveniente para el proceso buscado, y se ha modificado posteriormente con el objetivo de que esta se adaptase de forma correcta a la tipología y especificaciones propios del presente proyecto.

Nuevamente se ha usado el mismo criterio de colores para identificar las distintas estaciones de trabajo:

- En azul tendremos la *Principal Station*
- En negro la *Secondary Station 1 [Shaft]*
- En rojo la *Secondary Station 2 [Turbine]*
- En verde oscuro la *Substation A [Diaphragm 1]* y *Substation B [Diaphragm 2]* y en verde claro la *Substation C [Nose Cone]*
- En este caso, para ejemplificar el proceso terminado nos basta con el posicionamiento del modelo de partida en un banco de ejemplo a la derecha de la Estación principal. Por lo que se ha incluido la operación extra de motor terminado en la citada Estación Principal, como operación que indica la finalización del proceso de montaje.

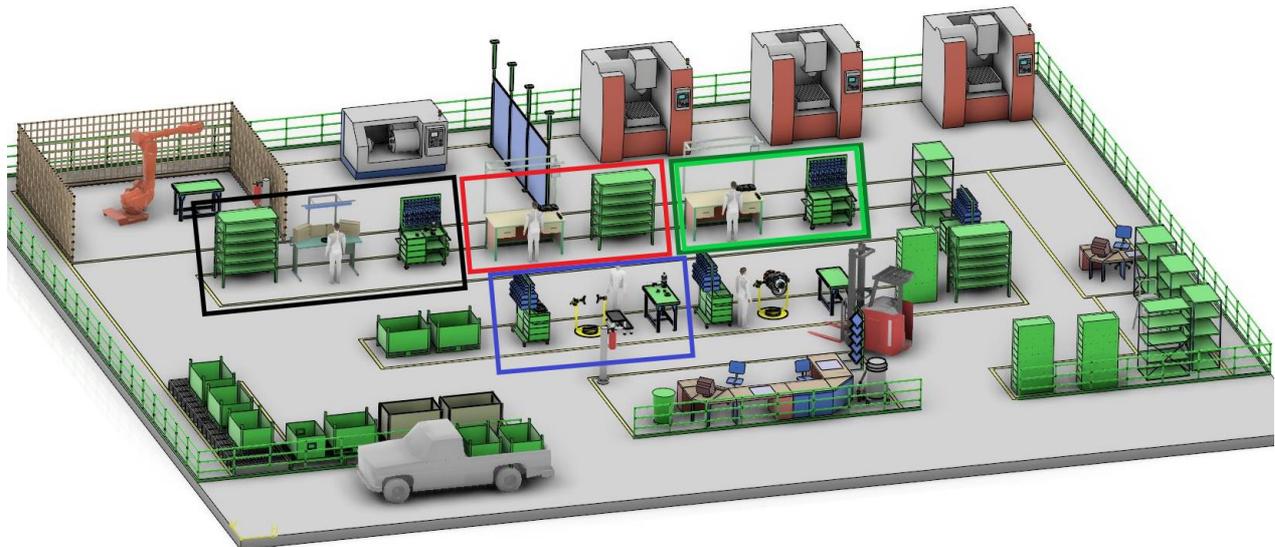


Figura 6-6. Taller y recursos totales definidos para el desarrollo de las operaciones.

Observando la Figura 6-6 podemos hacernos una idea general de la estructura definida para el árbol de recursos, que incluyen desde recursos de tipo *Area* como el que define la propia superficie de la factoría hasta los siguientes, listados a modo de resumen:

- Estación de Ensamblaje (*Assembly Station*), donde se desarrolla todo el proceso de montaje del motor.
 - Estación principal (*Principal Station*)
 - Operario de la Estación principal
 - Estante , donde se supondrán las piezas necesarias
 - Carro de trabajo, donde se sitúan parte de las herramientas específicas necesarias
 - Banco de trabajo *Maintenance Stand Assembly*, con posibilidad de rotar el conjunto

- Pequeña escalera (*Stairs*), para acceder a zonas altas del motor
- Herramienta *Bearing Press Holder Assembly*, para instalar los elementos del cojinete trasero del eje del motor
- Herramienta *Shaft Stetching Fixture*, para apretar las tuercas del eje principal
- Herramienta *Retaining Ring Guide*, que permite guiar y colocar elementos ensamblados en el Eje principal del motor
- Herramienta genérica *Torque Wrench*, para apretar el resto de elementos de sujeción
- Herramienta genérica *ToolBox*, de donde extraer cabezales para la *Torque Wrench*

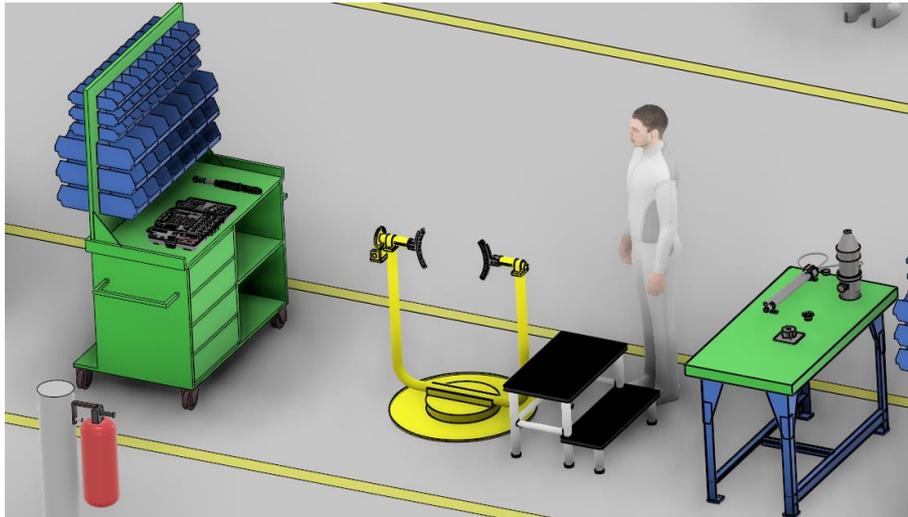


Figura 6-7. Estación principal.

- Estación dedicada al Eje (*Shaft Station*)
 - Operario de la Estación secundaria dedicada al Eje
 - Estante , donde se supondrán las piezas necesarias
 - Carro de trabajo, donde se sitúan parte de las herramientas específicas necesarias
 - Mesa de trabajo
 - Banco de trabajo *Rotating Assembly Holder*, instalado encima de la mesa y sobre el que se ensartan las distintas componentes del grupo rotatorio
 - Herramienta *Shaft Stetching Fixture*, para apretar la tuerca final del eje principal

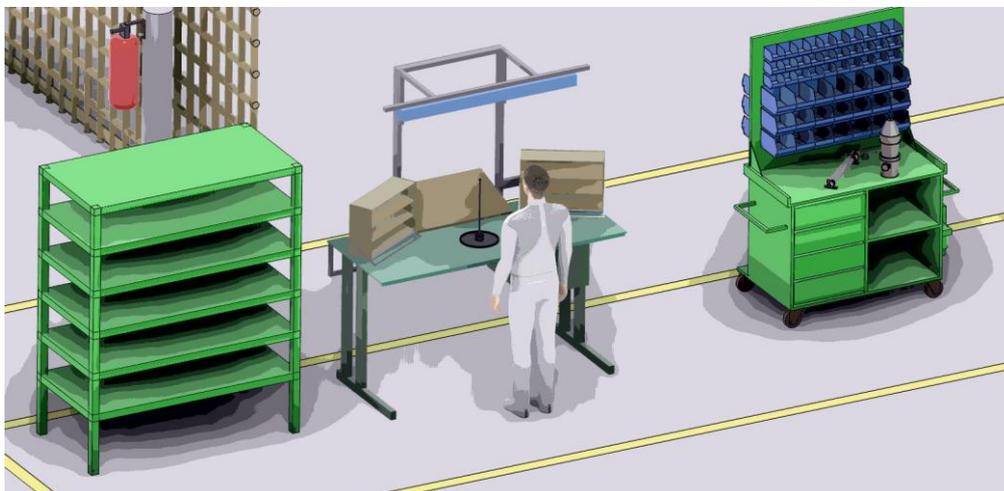


Figura 6-8. Estación secundaria 1 [Eje].

- Estación dedicada a la Turbina (*Turbine Station*)
 - Operario de la Estación secundaria dedicada a la Turbina
 - Estante , donde se supondrán las piezas necesarias
 - Mesa/Banco de trabajo
 - Herramienta genérica *Torque Wrench*, para apretar el resto de elementos de sujeción
 - Herramienta genérica *ToolBox*, de donde extraer cabezales para la *Torque Wrench*

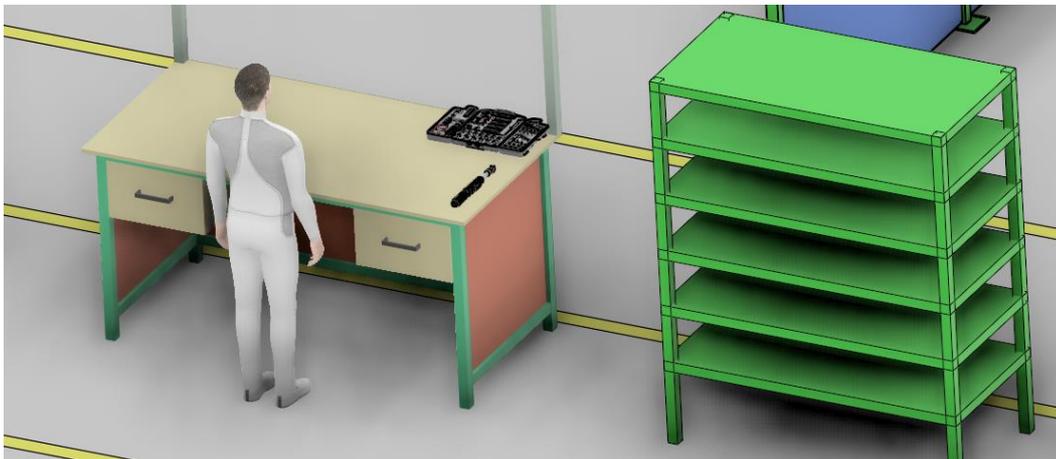


Figura 6-9. Estación secundaria 2 [Turbina].

- Estación dedicada al Diafragma y al *Nose Cone* (*Diaphragm and Nose Cone Station*)
 - Operario de la Estación secundaria dedicada al Diafragma y al *Nose Cone*
 - Carro de trabajo, donde se supondrán las piezas necesarias
 - Mesa/Banco de trabajo, que se supondrá reforzada dado el peso de las piezas
 - Herramienta genérica *Torque Wrench*, para apretar el resto de elementos de sujeción
 - Herramienta genérica *ToolBox*, de donde extraer cabezales para la *Torque Wrench*



Figura 6-10. Estación secundaria 3 [Diafragma y *Nose Cone*].

- Estación de Almacenaje (*Stores*), donde se almacena el resto de componentes y repuesto que se instalarán en futuros motores, trasladándolos previamente a los estantes de cada estación.
- Oficina (*Office*), donde se lleva a cabo toda la etapa de gestión de piezas y documentación relativa.
- Otros recursos, derivados del modelo importado de GrabCAD y que tienen una finalidad meramente visual, como pueden ser las vallas o elementos secundarios.

6.3.2 Maintenance Stand Assembly (Banco de trabajo de la Estación Principal)

Se trata del banco principal de trabajo de la Estación principal, el cual se instala al *Compressor Housing* y sobre el mismo, todos los elementos que definen operaciones en dicha estación. Este banco de trabajo permite además rotar los conjuntos que se van instalando sobre el mismo mediante una manivela.

El recurso *Maintenance Stand Assembly* está compuesto por dos agarres laterales, los cuales definen el eje horizontal de rotación y un pesado soporte instalado en el suelo de la factoría, tal y como puede verse en las siguientes Figura 6-11 y Figura 6-12.

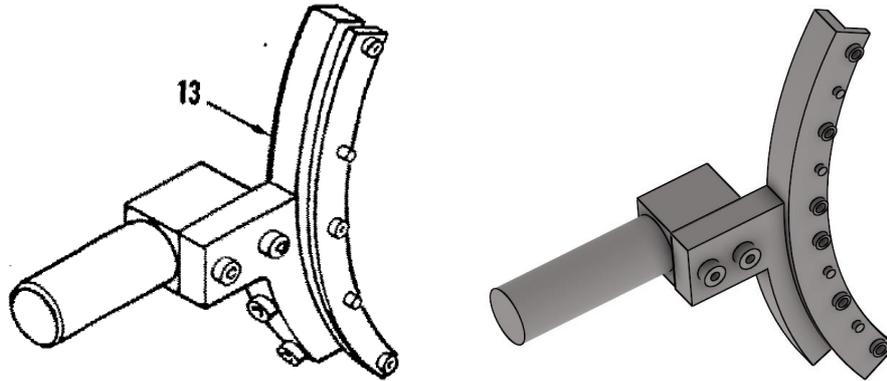


Figura 6-11. Comparación de los agarres en vista simplificada (izquierda) y modelo generado (derecha).

Comentar que las imágenes de la izquierda son vistas simplificadas en el manual, por lo que se ha tenido que realizar una investigación iterativa de las operaciones que afectan a dicho banco, para conocer realmente el número real de agarres que presenta (Figura 6-11) y las dimensiones aproximadas (Figura 6-12) que han de ser suficientes para que el motor pueda colocarse en vertical, pero no excesivas para que el operario pueda llegar a instalar los elementos con ayuda de la pequeña escalera *Stairs*.

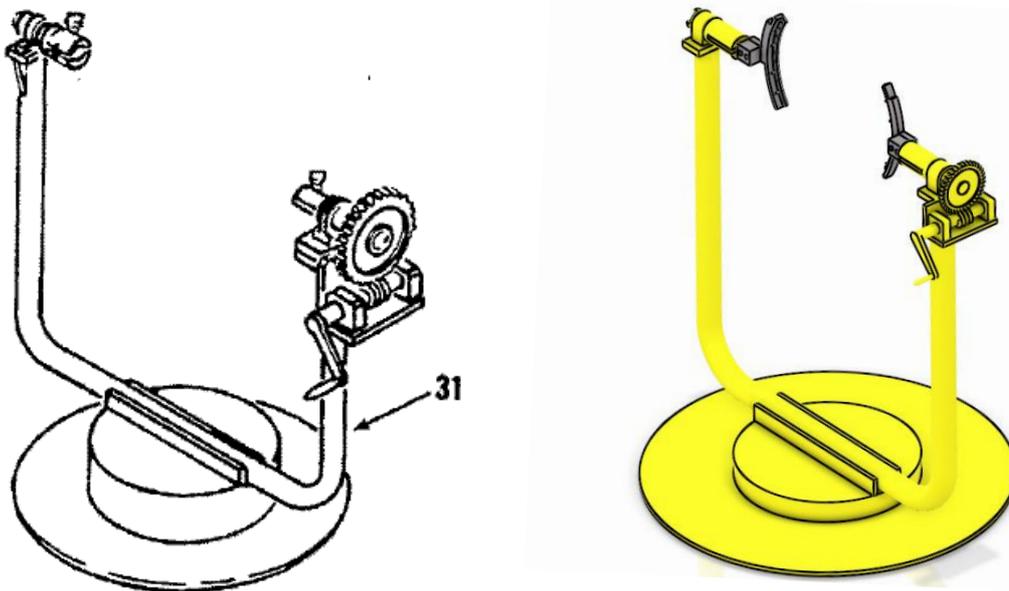


Figura 6-12. Comparación del soporte simplificado (izquierda) y modelo *Maintenance Stand Assembly* generado con los agarres ensamblados (derecha)

A modo de resumen, puede extraerse la siguiente clasificación y operaciones asignadas:

Tipo de Recurso	Operaciones asignadas
<i>Manufacturing Cell</i>	Todas las correspondientes a <i>Principal Station</i>

Tabla 6-2. Resumen del recurso *Maintenance Stand Assembly*.

6.3.3 Rotating Assembly Holder (Banco de trabajo de la Estación secundaria dedicada al Eje)

Este es el banco de trabajo o soporte sobre el que realizar las operaciones iniciales de ensamblaje y desmontaje parcial del grupo rotatorio, el cual se ensarta en el mismo, con el objetivo de no dar la complicada geometría del mismo (álabes afilados y alargados).

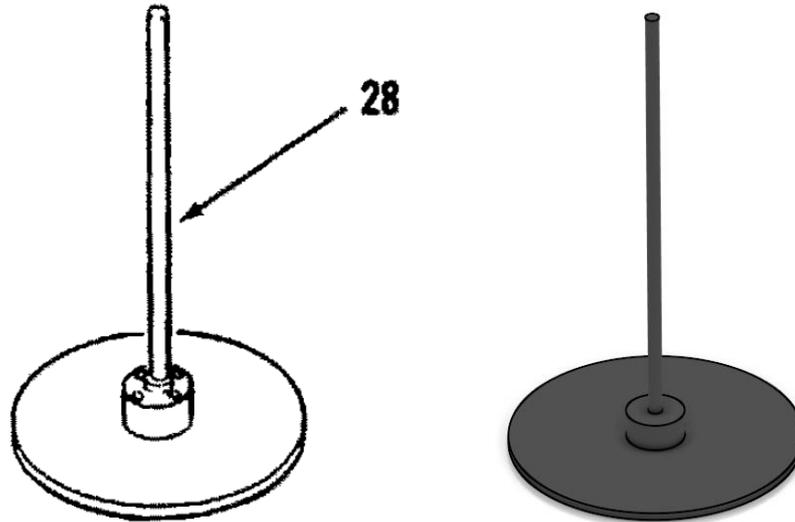


Figura 6-13. Comparación del *Rotating Assembly Holder* simplificado (izquierda) y modelo generado (derecha)

A modo de resumen, puede extraerse la siguiente clasificación y operaciones asignadas:

Tipo de Recurso	Operaciones asignadas
<i>Manufacturing Cell</i>	Todas las correspondientes a <i>Secondary Station 1 [Shaft]</i>

Tabla 6-3. Resumen del recurso *Rotating Assembly Holder*.

6.3.4 Stairs (Pequeña escalera)

Se trata de una pequeña escalera, que se ha modelado con reducida altura y gran alargamiento para aportar estabilidad. Esta será empleada por el operario en algunas de las operaciones que requieran colocar el motor en posición vertical en su banco, ya que serán de complicado acceso dada la altura de la zona de instalación.



Figura 6-14. Modelo generado *Stairs*.

A modo de resumen, puede extraerse la siguiente clasificación y operaciones asignadas:

Tipo de Recurso	Operaciones asignadas
<i>Manufacturing Cell</i>	Todas las correspondientes a <i>Principal Station: Phase V</i> Todas las correspondientes a <i>Principal Station: Phase VI</i>

Tabla 6-4. Resumen del recurso *Stairs*.

6.3.5 *Bearing Press Holder Assembly* (Herramienta para apretar y ensamblar el cojinete trasero)

Esta herramienta se encarga de aplicar presión sobre los elementos del cojinete trasero del eje del motor para poder instalarlos. Se ha modelado de forma iterativa y a partir de dos piezas distintas ensambladas, comprobando que los elementos que ensambla encajan a la perfección y por lo tanto la herramienta puede cumplir su función

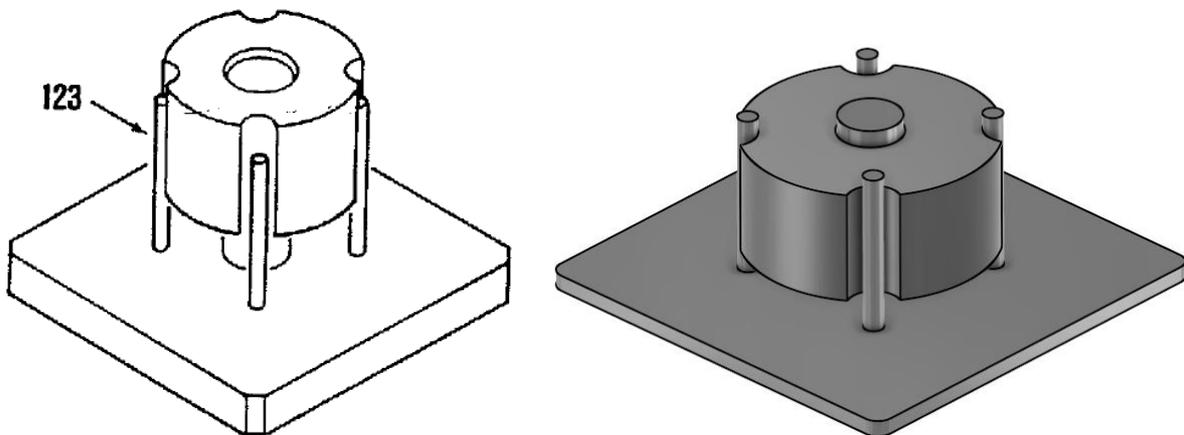


Figura 6-15. Comparación del *Bearing Press Holder Assembly* simplificado (izquierda) y modelo generado (derecha)

A modo de resumen, puede extraerse la siguiente clasificación y operaciones asignadas:

Tipo de Recurso	Operaciones asignadas
<i>Tool Equipment</i>	<i>Load Bearing Support Assembly (Principal Station: Phase V)</i> <i>Load Retainer (Principal Station: Phase V)</i>

Tabla 6-5. Resumen del recurso *Bearing Press Holder Assembly*.

6.3.6 *Shaft Stetching Fixture* (Herramienta para apretar las tuercas del Eje principal)

Esta herramienta es la encargada de apretar las tuercas del Eje principal. Para que esta instalación sea posible, la propia herramienta estira el eje aplicando un torque elevado.

Nuevamente se ha generado el modelo de forma iterativa y a partir de las dimensiones de los elementos instalados al final del eje y de la propia tuerca, para que sea posible su instalación. Por lo que nos hemos asegurado que la herramienta puede desarrollar correctamente su función.

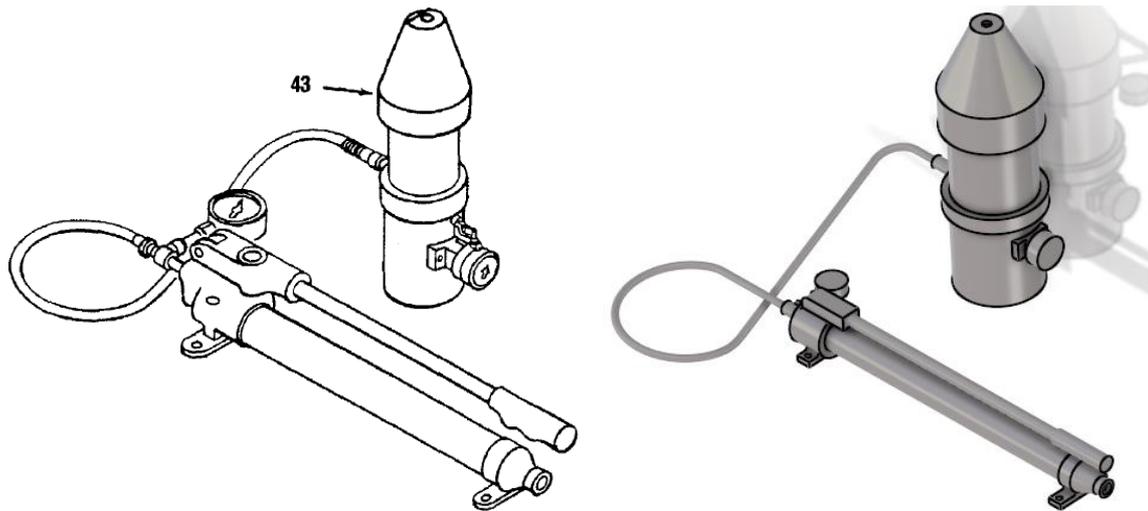


Figura 6-16. Comparación del *Shaft Stetching Fixture* simplificado (izquierda) y modelo generado (derecha)

A modo de resumen, puede extraerse la siguiente clasificación y operaciones asignadas:

Tipo de Recurso	Operaciones asignadas
<i>Tool Equipment</i>	<i>Install Main Shaft Mounted Bearing Support and Nut (Principal Station: Phase III)</i> <i>Load Nut (Secondary Station 1 [Shaft])</i> <i>Unload Nut (Secondary Station 1 [Shaft])</i>

Tabla 6-6. Resumen del recurso *Shaft Stetching Fixture*.

6.3.7 Herramienta genérica *Retaining Ring Guide* (Guía de los cierres anulares)

Su objetivo es guiar y posicionar elementos como los Cierres en cada extremo del eje, los cuales van ensartados en el mismo. Permite aplicar presión sobre dicha herramienta en vez de hacerlo directamente sobre el elemento a instalar, los cuales se encontrarán ya ensartados.

De nuevo se ha modelado de acuerdo a las dimensiones del Eje principal y de los propios elementos a los que hace referencia en las operaciones en las que participa.

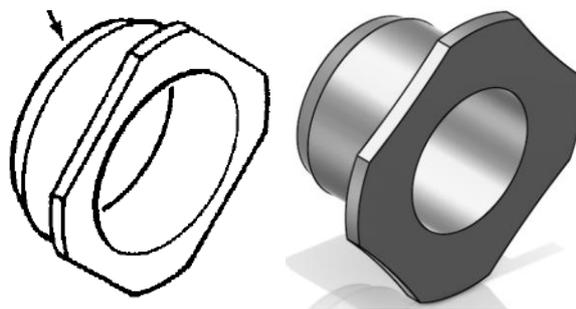


Figura 6-17. Comparación del *Retaining Ring Guide* simplificado (izquierda) y modelo generado (derecha)

A modo de resumen, puede extraerse la siguiente clasificación y operaciones asignadas:

Tipo de Recurso	Operaciones asignadas
<i>Tool Equipment</i>	<i>Load Inner Race (Principal Station: Phase III)</i> <i>Load Bearing (Principal Station: Phase III)</i> <i>Load Thrust Ring (Principal Station: Phase V)</i>

Tabla 6-7. Resumen del recurso *Retaining Ring Guide*.

6.3.8 Herramienta genérica *Torque Wrench* (Llave dinamométrica)

Esta herramienta genérica, encargada de aplicar un apriete concreto a los elementos de sujeción, no aparecía representada en el manual de Revisión general [2]. Se ha importado de la biblioteca GrabCAD [18].



Figura 6-18. Modelo de la herramienta *Torque Wrench* importado de [18].

A modo de resumen, puede extraerse la siguiente clasificación y operaciones asignadas:

Tipo de Recurso	Operaciones asignadas
<i>Tool Equipment</i>	Todas las que incluyan <i>Tighten Bolts/Nuts</i>

Tabla 6-8. Resumen del recurso *Torque Wrench*.

6.3.9 Herramienta genérica *ToolBox* (Caja de herramientas con cabezales y accesorios)

Esta segunda herramienta genérica o más bien conjunto de ellas, se encarga de proveer de cabezales a la *Torque Wrench*, así como de proporcionar accesorios y/o herramientas secundarias que se pudiese necesitar en las distintas operaciones de apriete de tornillos o tuercas. Al no estar tampoco representado en el manual de Revisión general [2], se ha importado también de la biblioteca GrabCAD [19].

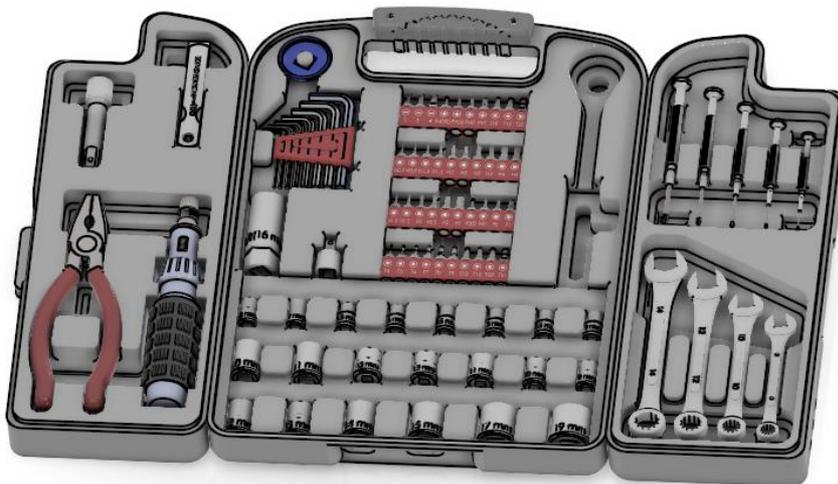


Figura 6-19. Modelo de la herramienta *ToolBox* importado de [19].

A modo de resumen, puede extraerse la siguiente clasificación y operaciones asignadas:

Tipo de Recurso	Operaciones asignadas
<i>Tool Equipment</i>	Todas las que incluyan <i>Tighten Bolts/Nuts</i>

Tabla 6-9. Resumen del recurso *ToolBox*.

Quedando definida la estructura completa de recursos y habiéndose realizado la asignación entre todas y cada una de las operaciones que definen el montaje del Garrett TPE 331-10R, con los recursos requeridos para ello.

También se ha realizado el posicionamiento espacial de las operaciones en la factoría, a partir de la definición de la posición final del elemento o conjunto de ellos a los que la operación va asignada. Han sido muy útiles las herramientas *Acumulative Snap*, con la que se facilita el posicionamiento al poder indicar superficies en contactos o círculos concéntricos por ejemplo, así como la opción *Copy Position* para copiar la posición final de una operación a todas aquellas operaciones que la compartiesen, con el requisito de que estas debían estar asignadas al mismo recurso (en este caso al mismo trabajador)

A continuación, se ha realizado un breve proceso de verificación de las asignaciones, nuevamente mediante las útiles herramientas *B. I. Essentials* y *Relations*. La primera nos permita ver rápidamente y mediante colores, qué operaciones están asignadas tanto a recursos de tipo *Working* (mediante *Operation to Working Resource Assignment Status*) como a recursos de tipo *Non-working* (mediante *Operation to Non-working Resource Assignment Status*), pudiendo percatarnos de alguna posible operación que se nos haya olvidado asignar.

La segunda, *Relations*, es algo menos intuitiva pero permite ver todas las asignaciones realizadas a cualquier elemento u operación, por lo que nos permite comprobar si estamos definiendo el proceso de forma correcta.

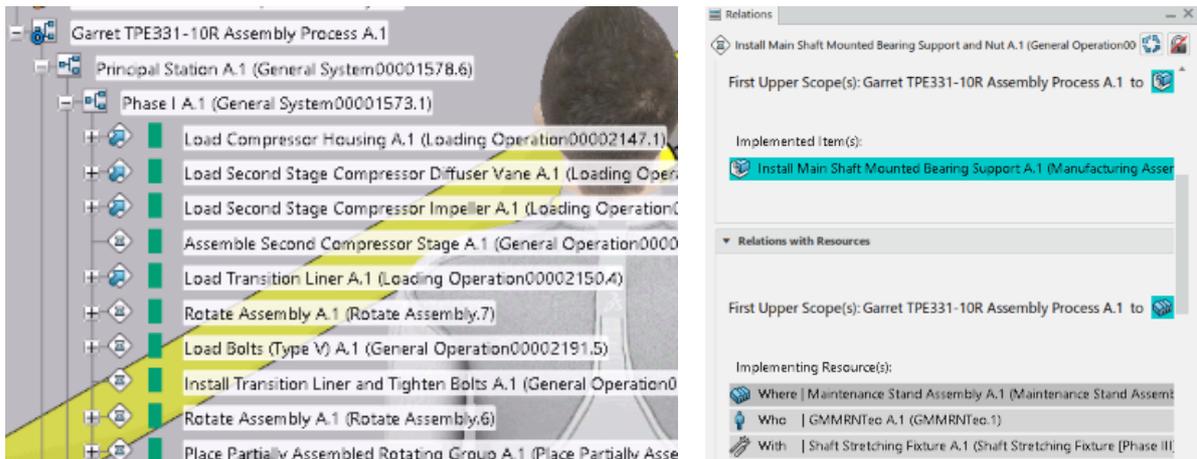


Figura 6-20. Uso de las herramientas *B. I. Essentials* (izquierda) y *Relations* (derecha).

Por último, se han realizado simulaciones mediante la herramienta *Experience Player*, situada en el centro de la brújula de 3DExperience, tanto con el objetivo de comprobar que el resultado es el buscado y además es correcto/viable, como para condensar los resultados de las etapas realizadas en una serie de simulaciones de gran calidad visual y que ofrecen multitud de opciones de visionado.

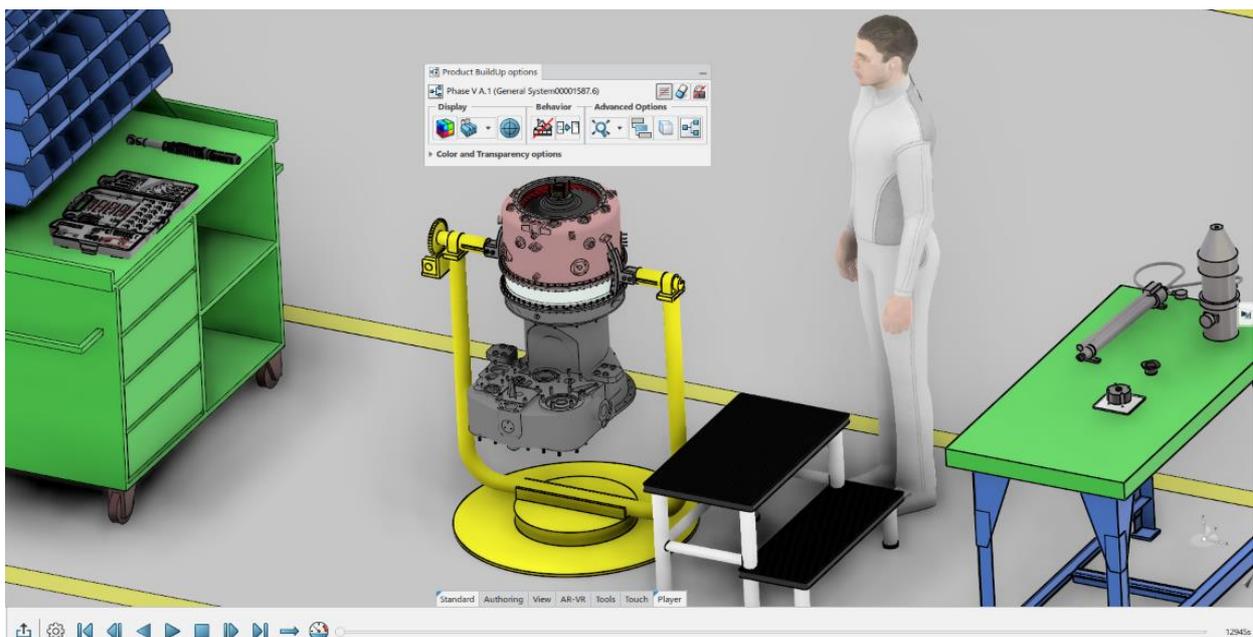


Figura 6-21. Realización de simulaciones en la app *Equipment Allocation*.

6.4 Análisis de la carga de trabajo de los operarios

Al igual que se hizo con las estaciones en el capítulo anterior, se procede a realizar un análisis breve sobre la carga de trabajo de los recursos de tipo *Working*, que en nuestro caso engloba a los 4 operarios definidos anteriormente y cuyo número estaba justificado con la especialización de los mismos en las distintas zonas del motor, entre otros criterios ya definidos.

Este análisis se realiza mediante la herramienta *Resource Balancing*, aplicada al elemento “raíz” del árbol de recursos generados. Al ejecutarla nos ofrece la siguiente Figura 6-22, donde cada uno de los elementos apilados representa nuevamente una operación, siendo la altura de los mismos proporcional a su duración. En rojo nos resalta las tareas que el operario realiza de forma paralela, con el objetivo de que reflexionemos si el operario puede realmente desarrollarlas en paralelo (en nuestro caso, vienen asociadas a la colocación de elementos repetidos, como arandelas, pudiendo el operario trasladarlas y colocarlas de forma que estas ya estén apiladas entre ellas, dada la naturaleza de la operación).

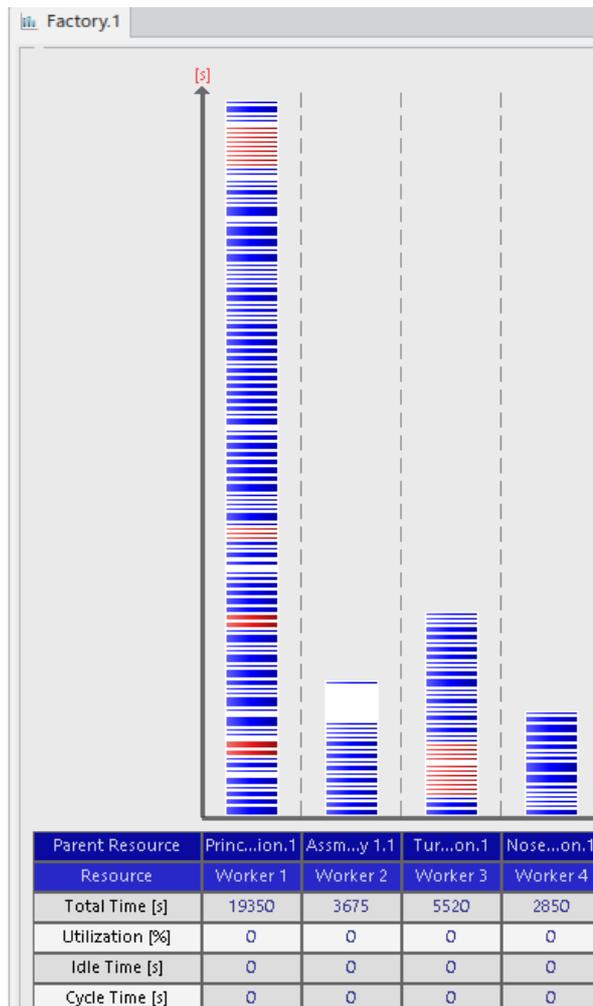


Figura 6-22. Carga de trabajo de cada uno de los operarios.

Al igual que antes, de este análisis se puede extraer el desglose en operaciones y tiempos que hemos asignado a cada operario. Además, nos invita a la reflexión acerca de una posible optimización en el número de operarios asignados a la factoría, pudiendo ser más rentable que los operarios de las estaciones secundarias tuviesen conocimiento amplio de distintas zonas del motor y eliminando así alguno de ellos, para aumentar la carga de trabajo de los restantes.

Mencionar que esta posible optimización implicaría un estudio más profundo del manual, tanto de las operaciones modeladas como de las restantes, así como de otros aspectos involucrados en el proceso real de montaje, como un desglose detallado de los tiempos por operación; por lo que se plantea como posible continuación futura del presente trabajo.

Nuevamente podemos afirmar que hemos alcanzado satisfactoriamente un objetivo más de los marcados inicialmente, habiendo generado, distribuido y dotado la línea de la estructura de recursos necesarios para desempeñar las operaciones definidas anteriormente, atendiendo a la forma habitual de *layout* de posición fija.

En este punto, queda únicamente generar el movimiento en las operaciones, con el objetivo de representar fielmente el proceso de montaje del TPE 331-10R. Esto se realizará en el próximo Capítulo 7.

7 SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DEL ENSAMBLAJE

En el presente capítulo, cerraremos el proyecto con la Evaluación del proceso de montaje, mediante la aplicación de 3DExperience denominada *Assembly Evaluation*. Esta aplicación es la encargada de implementar trayectorias a las distintas operaciones y sus elementos del MBOM asociados, de forma que puedan representar de forma correcta el proceso real dentro de la factoría, previamente definida.

De forma secundaria, *Assembly Evaluation* ofrece opciones útiles, como la detección de inclusiones al recrear la trayectoria de un objeto hasta su posición final o la de computar el denominado *Swept Volume*, que no es otra cosa que el volumen que ocupa un objeto durante toda su trayectoria. Esta última herramienta es bastante útil tanto en el proceso de montaje real, como en un futuro mantenimiento del mismo, en el caso en el que el producto vaya instalado en un compartimento de difícil acceso como puede ocurrir al instalar un elemento y carenarlo en una aeronave, analizando la viabilidad del proceso de instalación de elementos.

Aunque esta etapa se está redactando en el Capítulo 7, esto no implica que sea una etapa final, ya que se emplea también sobre los cimientos del proyecto, permitiendo comprobar la viabilidad del modelo de montaje que define nuestro MBOM. Sin embargo como ya se conocía en su mayor parte el citado proceso de montaje, ya que se ha tenido acceso al manual de Revisión general del motor [2], se ha empleado en las etapas iniciales únicamente de manera puntual, para cerciorarnos de que el proceso de montaje de las piezas distintas a las que aparecen en el manual (dada la diferencia de versiones) se definía de forma viable.

Es por este motivo que este proceso de evaluación se detalla en el presente capítulo final, ya que principalmente se ha empleado *Assembly Evaluation* para generar las trayectorias una vez tenemos generada la factoría y distribuidas espacialmente tanto las operaciones (y los elementos del MBOM asociados), como los recursos asociados.

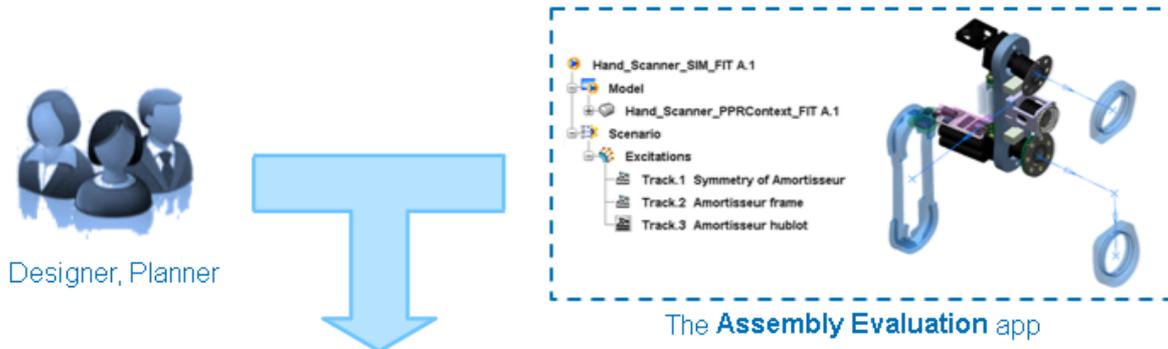
7.1 Aplicación “Assembly Evaluation”

Con las secuencias de operaciones ya definidas, y teniendo esta asociadas tanto los elementos del MBOM a los que afectan, como los recursos y la posición espacial en planta correspondiente; la siguiente etapa lógica del proyecto es definir la trayectoria que cada operación genera sobre los elementos a los que afecta.

Esta etapa es de gran importancia a la hora de representar un proceso de forma fidedigna, pudiendo además simular el proceso completo y exportar las simulaciones, de alto valor representativo tanto en el ámbito académico, para comprender la secuencia de montaje de un producto, como en el ámbito profesional para instruir a los distintos trabajadores sobre las operaciones que van a realizar.

Se puede decir que 3DExperience es un software puntero en este aspecto, ya tiene bastantes herramientas enfocadas a la producción de resultados gráficos y simulaciones, tanto convencionales como en realidad aumentada y realidad virtual. Donde el trabajador por medio de sistemas específicos como gafas virtuales puede identificar en tiempo real tanto la operación a realizar, como las piezas y recursos necesarios para llevarlas a cabo (así como la forma en la que debe realizarla).

Algunas de las herramientas enfocadas a este salto innovador que desarrolla la plataforma se encuentran dentro de la aplicación *Assembly Evaluation*, la cual permite generar trayectorias o *tracks* asociadas a las distintas operaciones, pudiendo además configurar totalmente tanto la representación visual como los elementos a los que afecta, y permitiendo además toda una gama de funcionalidades secundarias destinadas al análisis de dichas trayectorias.



Designer and Planner can simulate part motions to:

- Define and simulate assembly and disassembly procedures
- Validate the product assembly
- Perform assembly feasibility studies
- Validate maintenance and manufacturing feasibility

Figura 7-1. Imagen explicativa de la utilidad de la aplicación *Assembly Evaluation* [7].

Assembly Evaluation permite generar *tracks* o trayectorias de movimiento entre puntos o *Tpoints*, que podemos definir en el espacio tanto manualmente, como mediante coordenadas o el ya citado en anteriores etapas *Acumulative Snap*. Estas trayectorias pueden ser generadas sobre los elementos del MBOM o directamente sobre las operaciones que gestionan dichos elementos, pudiendo ser los *tracks* de distinto tipo:

- *Linear tracks*: Método de interpolación simplificado, en el que las trayectorias se generan como rectas entre los distintos puntos intermedios definidos.
- *Spline tracks*: Método de interpolación algo más avanzado, en el que las trayectorias se generan como curvas que interpolan los distintos puntos intermedios definidos.
- *Composite Spline tracks*: Método que mezcla los anteriores, pudiendo definirse segmentos rectos o curvos.

Estos *tracks* pueden posteriormente editarse, revertirse e incluso exportarse e importarse, de forma que se facilita el proceso de definición de los mismos, no siendo único el camino hasta conseguir un mismo objetivo.

Además *Assembly Evaluation* nos abre todo un abanico de opciones para gestionar el proceso de simulación, pudiendo almacenar y editar estados o generar análisis de gran relevancia en el proceso de fabricación. Entre estos análisis citados se pueden encontrar los siguientes:

- Computación del espacio ocupado por una operación, mediante *Swept Volume*.
- Análisis de inclusiones entre las trayectorias de las operaciones o *Dynamic Clash*.
- Generado de secciones, mediante *Section Probe*.
- Análisis de distancias entre los elementos o superficies, mediante *Measure Between Probe*.

Nuevamente, resaltar que esta aplicación va a tener dos enfoques o usos principales en el transcurso del proyecto, siendo el segundo bastante más relevante en cuanto a tiempo invertido:

1. Comprobación en etapas iniciales de la viabilidad del proceso de montaje que pretende modelarse, con su MBOM asociado.
2. Definición de la trayectoria de las operaciones sobre la factoría, de forma que estas ejemplifiquen el proceso de montaje del producto. Para llevarla a cabo deben estar realizadas previamente las tres etapas anteriores del proyecto (Capítulos 4, 5 y 6).

La herramienta *B. I. Essentials* también ofrece dentro de esta aplicación la opción de comprobar que todo el sistema generado está actualizado, o de si por el contrario hay trayectorias con asignaciones “rotas” hacia alguna operación o elemento objetivo.

7.2 Tutoriales en la plataforma Eduspace

Con el objetivo en mente ya definido, y bajo la recomendación por parte del tutor de realizar algunos ejemplos prácticos, se procede en la presente sección a realizar una serie de tutoriales para conocer la aplicación *Assembly Evaluation* y sus herramientas implementadas. Estos tutoriales vuelven a estar recogidos en la web Eduspace, en concreto en *DELMIA Assembly Evaluation Essentials* [7].

Estos tutoriales tienen un enfoque distinto a los anteriores ya que, a diferencia de los realizados previamente, que iban concatenados definiendo distintas etapas de un proceso; este se presenta como un tutorial independiente que no se centra en una única etapa del proceso, por lo que es bastante completo y presenta una visión alternativa de algunas fases ya desarrolladas en capítulos anteriores del presente documento.

El primer tutorial realizado ha sido para practicar con la creación de trayectorias o *tracks*, ligadas a las operaciones de montaje de un asiento de coche. Para ello se ha comenzado con la definición de una *Manufacturing Simulation* asociada al mismo, para proseguir con la citada definición de *tracks* como puede verse en la Figura 7-2.



Figura 7-2. Tutorial de ejemplo para la definición de una simulación (izquierda) y las trayectorias asociadas a cada una de las operaciones de montaje (derecha).

La generación de estos *tracks* se ha practicado siempre de forma simple y lineal, empleando distintas opciones de posicionamiento como han sido las de colocación por introducción de coordenadas de desplazamiento, la opción *Acumulative Snap* o el arrastre manual del sistema de referencia asociado al elemento.

Otro tutorial interesante ha sido el dedicado a gestionar y modificar los *tracks* previamente definidos, siendo relevantes las opciones de *Reverse Tracks*. Normalmente al comienzo de la definición de la trayectoria de una operación, las piezas a las que esta va vinculada aparecen en su posición final, por lo que es mucho más práctico definir las trayectorias como si la operación fuese de desmontaje (alejando la pieza de su posición final de la que se ha partido) y después aplicar la opción de revertir la trayectoria (si la operación fuese realmente de desmontaje este último paso no sería necesario).

También se han realizado ejercicios prácticos destinados a computar el volumen ocupado por los elementos asignados a una operación durante toda su trayectoria. Esto se realiza mediante la herramienta *Swept Volume*, obteniendo resultados como los mostrados en la siguiente Figura 7-3, realizadas sobre *L2_S4_Ex1_Start*.

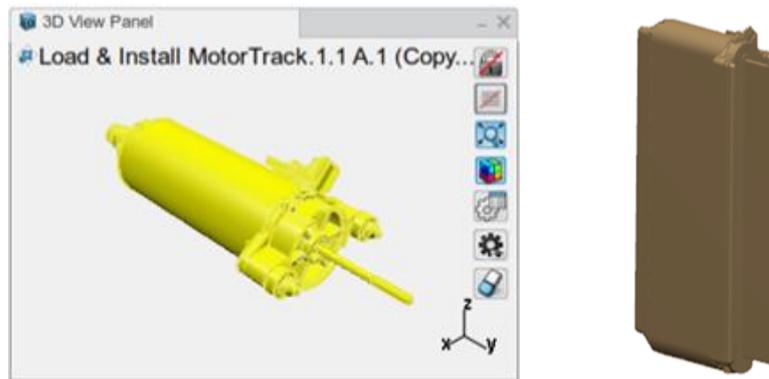


Figura 7-3. Caso práctico de la operación *Swept Volume* aplicado sobre un pequeño motor (derecha), obteniendo el resultado mostrado a la izquierda para un desplazamiento vertical del mismo.

Por último, señalar una serie de casos prácticos realizados con el propósito de simular un proceso y analizar algunos aspectos del mismo, al objeto de verificar que el mismo es correcto y localizar posibles fallos.

El primero de ellos ha consistido en abrir la interfaz del *Experience Player* (situado en el centro de la brújula de 3DEperience) y probar a simular un conjunto de operaciones con sus trayectorias asignadas, variando distintas opciones de visualización y observando su repercusión sobre la simulación.

El segundo de estos últimos tutoriales citados se ha centrado en análisis de los resultados con herramientas como *Dynamic Clash Probe*, donde se ha activado la detección dinámica de inclusiones y se ha simulado primero el comportamiento de la secuencia bien definida, la cual ha concluido sin mayor problema. A continuación, se ha modificado la trayectoria de algunas operaciones de forma que se produzca la penetración de una pieza dentro de otras en su trayectoria hasta la posición final, se ha vuelto a simular y, por último, se ha comprobado que el sistema detecta la inclusión, avisándonos de que algo posiblemente no estaba definido de forma correcta. Este tutorial puede verse reflejado en la Figura 7-4.

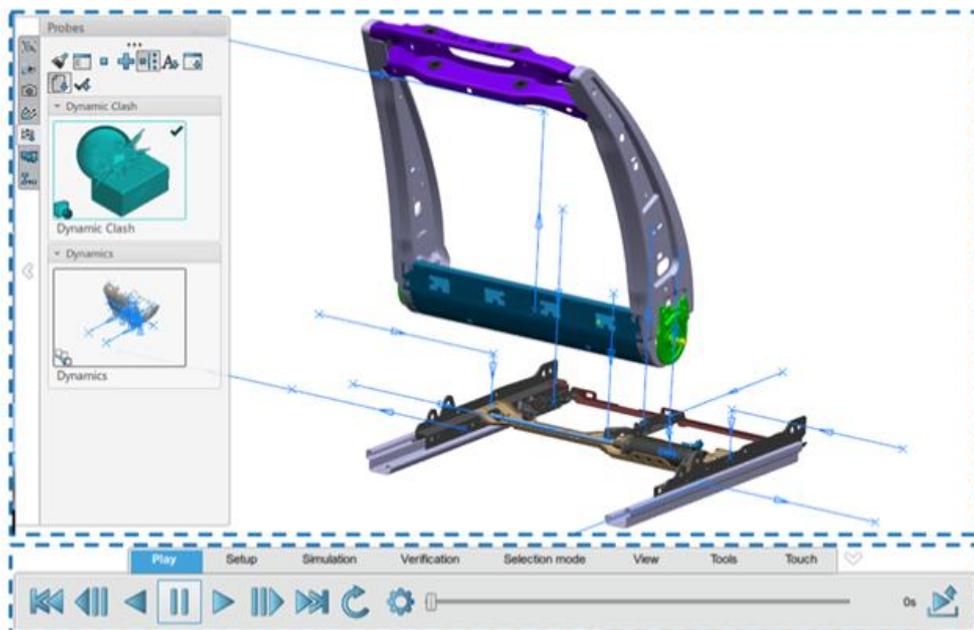


Figura 7-4. Caso práctico de detección de inclusiones mediante *Dynamic Clash Probe*.

Este análisis es bastante útil a la hora de comprobar si hemos definido el proceso de montaje de forma correcta, pudiendo detectar secuencias de operaciones o trayectorias de las mismas que sean inviables, tanto en etapas tempranas del proyecto como en etapas finales del mismo.

Llegados a este punto donde todos los tutoriales recomendados han sido realizados con éxito, es el momento de aplicar los conocimientos y técnicas adquiridos en nuestro modelo de motor turbohélice Garrett TPE 331-10R, lo cual se detallará en el siguiente apartado para las dos etapas del proyecto en las que se ha empleado.

7.3 Simulación y evaluación de la línea de ensamblaje del Garrett TPE 331-10R

En el presente apartado se aplicarán las funcionalidades aprendidas en los tutoriales, así como otra serie de herramientas descubiertas en el transcurso del proyecto, al modelo del proceso de montaje del TPE 331-10R.

En concreto, se ha empleado la aplicación *Assembly Evaluation* en dos etapas distintas del proyecto:

- Etapa de definición del MBOM asociado al modelo de motor: Donde se ha empleado *Assembly Evaluation* de forma breve y simplificada para comprobar la viabilidad del montaje, de cara a las operaciones que se iban a implementar sobre los distintos elementos.

Fruto de este análisis en etapas tempranas fue la subsanación de un error en el modelo, relativo a la instalación de la Turbina en el *Plenum* (subsanación comentada anteriormente con más detalle). De la misma forma, ha servido de apoyo a la hora de definir la secuencia de operaciones de los elementos distintos a los presentes en las secuencias de montaje recogidas en el manual de Revisión general [2].

Comentar que durante esta etapa, se ha usado únicamente de forma puntual ya que, a diferencia de cuando diseñamos un proceso de montaje desde 0, se conocía la mayor parte del proceso de montaje gracias al propio manual y a la experiencia propia de haber asistido a parte del proceso de desmontaje y posterior montaje del motor en cuestión.

- Etapa final de simulación y exportación de resultados: Una vez que tenemos distribuidos espacial y temporalmente tanto las operaciones como los recursos y elementos del MBOM a los que están vinculadas, se ha procedido a generar las trayectorias simplificadas propias de cada operación para darle aún más realismo al proceso. De esta forma, un hipotético operario que tenga acceso a las simulaciones, partirá a la realización de las mismas con una idea completa del proceso en la cabeza, no únicamente con las especificaciones y la redacción de las operaciones que suelen aparecer en los manuales. Aunque de forma más secundaria, en esta etapa del modelo también se ha usado las herramientas presentes en *Assembly Evaluation* para comprobar la secuencia de operaciones.

De forma general, se han definido *tracks* sobre todas aquellas operaciones, de cada una de las estaciones de trabajo, en las que se colocase, trasladase o rotase algún elemento a los que estuvieses asociadas. Estas trayectorias se han definido de forma simplificada dada la limitación temporal del proyecto, pero no por ello menos realistas, ya que se ha intentado representar la forma aproximada en la que se instalan los elementos. Por ejemplo, se ha respetado la posición hipotética desde la que el operario posiciona la pieza, ya sea desde la parte delantera, desde abajo o incluso subido a la pequeña escalera, para poder acceder a las partes más altas del motor cuando este se encuentra en posición vertical.

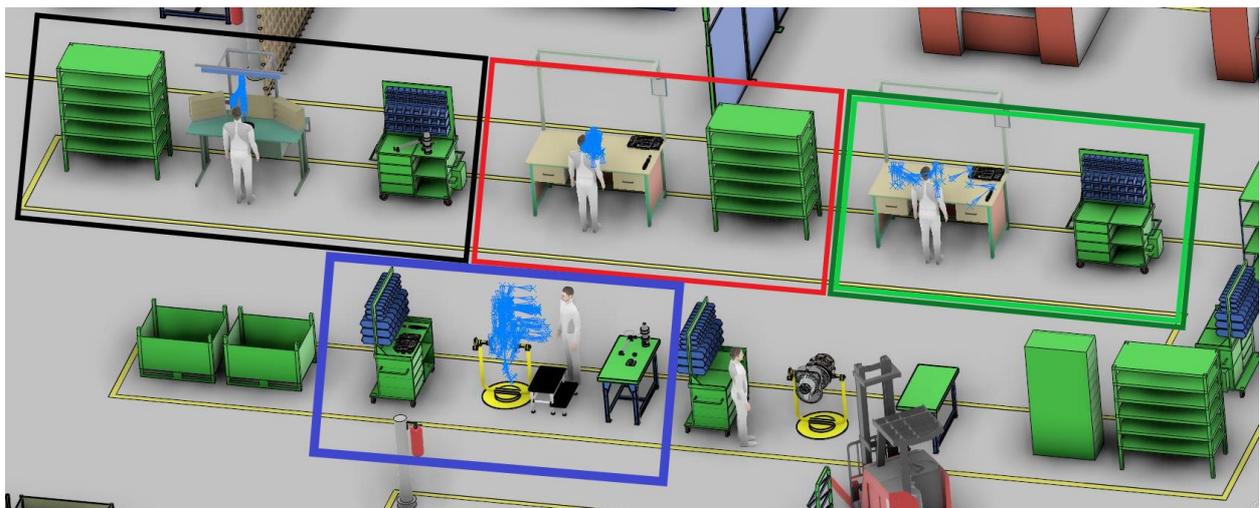


Figura 7-5. Vista general de todas las trayectorias definidas en la factoría.

De nuevo, en la Figura 7-5 se ha usado el mismo criterio de colores para identificar las distintas estaciones de trabajo:

- En azul tendremos la *Principal Station*
- En negro la *Secondary Station 1 [Shaft]*
- En rojo la *Secondary Station 2 [Turbine]*
- En verde oscuro la *Substation A [Diaphragm 1]* y *Substation B [Diaphragm 2]* y en verde claro la *Substation C [Nose Cone]*

Estas trayectorias se han generado en su mayor parte definiendo los *Tpoints* mediante desplazamiento por introducción de coordenadas relativas, realizando un proceso iterativo de definición-simulación para comprobar su validez.

Algunos parámetros empleados a la hora de definir las trayectorias han sido:

- Posición del trabajador
- Altura de la zona de instalación, teniendo en cuenta la altura del trabajador. En algunos casos se ha definido la trayectoria partiendo desde la escalera, simulando que el trabajador se encuentra subido a la hora de realizar la instalación
- Tipo de operación de montaje, teniendo en cuenta si los elementos se colocaban hacia abajo, hacia arriba o de forma inclinada

A continuación, se mostrará un desglose resumido de las distintas trayectorias definidas por estación, de forma que podamos hacernos una idea de la cantidad de trayectorias generadas, así como de la forma cualitativa en que se instalan los elementos.

7.3.1 Principal Station

En el banco principal de trabajo quedan definidas las trayectorias en función de la localización de la zona de instalación, así como de la posición del motor en el banco girado (que definen las Fases). Es por ello que se define la instalación y desinstalación de elementos tanto desde la parte frontal, como desde la trasera, así como desde la parte superior, donde en algunos casos habrá que usar la escalera para poder llegar con seguridad a la zona de instalación.

Como casos excepcionales, habrá algunas piezas que se instalen desde abajo, como puede ser el del Eje de torsión, que se instala interno al Eje principal.

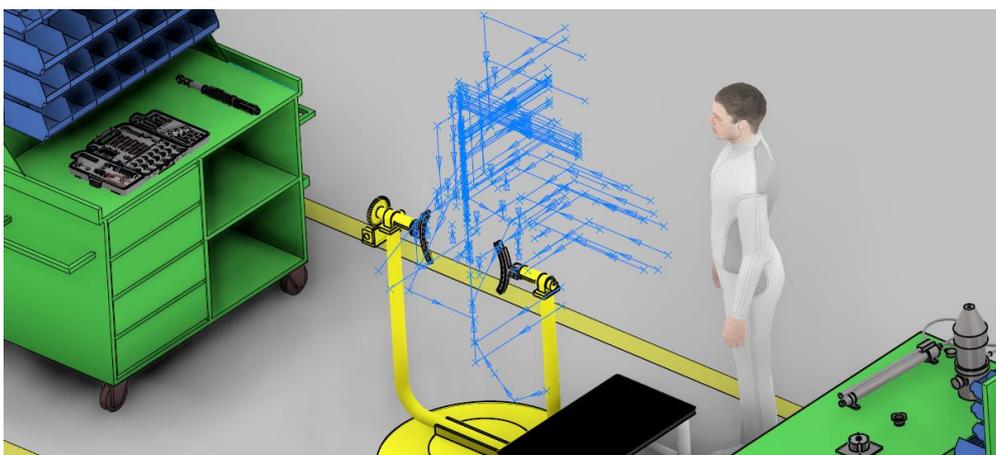


Figura 7-6. Trayectorias definidas en la *Principal Station*.

7.3.2 Secondary Station 1 [Shaft]

En la Estación secundaria dedicada al montaje y desmontaje parcial del grupo rotatorio, se han modelado todas las trayectorias de forma simplificada pero respetando la forma del soporte o banco de trabajo, así como la forma en que se desarrollan las operaciones. En estas, se ensartan los elementos desde la parte superior (trasera) del Eje principal, para posteriormente desmontar algunos de estos elementos de similar manera.

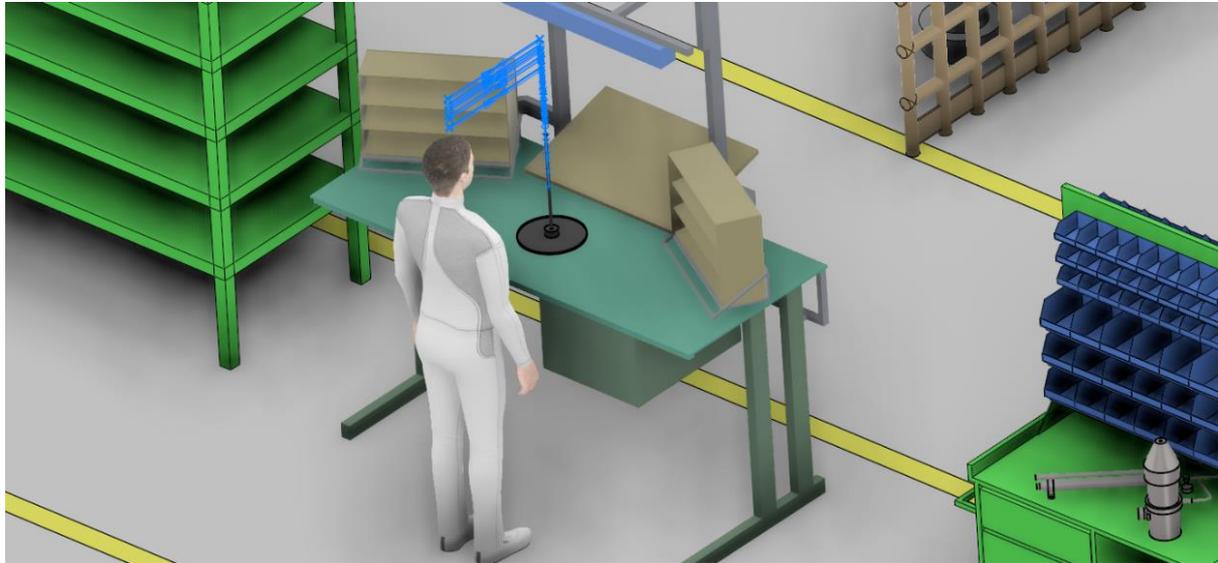


Figura 7-7. Trayectorias definidas en la *Secondary Station 1 [Shaft]*.

Nº de trayectorias	29
--------------------	----

7.3.3 Secondary Station 2 [Turbine]

Al igual que en la estación anterior, en esta Estación secundaria asociada al montaje de la Turbina, la mayor parte de los elementos se posicionan desde arriba, por lo que las trayectorias son las mostradas en la siguiente Figura 7-8. Como excepción, se realizará desde abajo el posicionamiento del lote de tornillos para unir el Soporte a la Primera etapa de la Turbina.

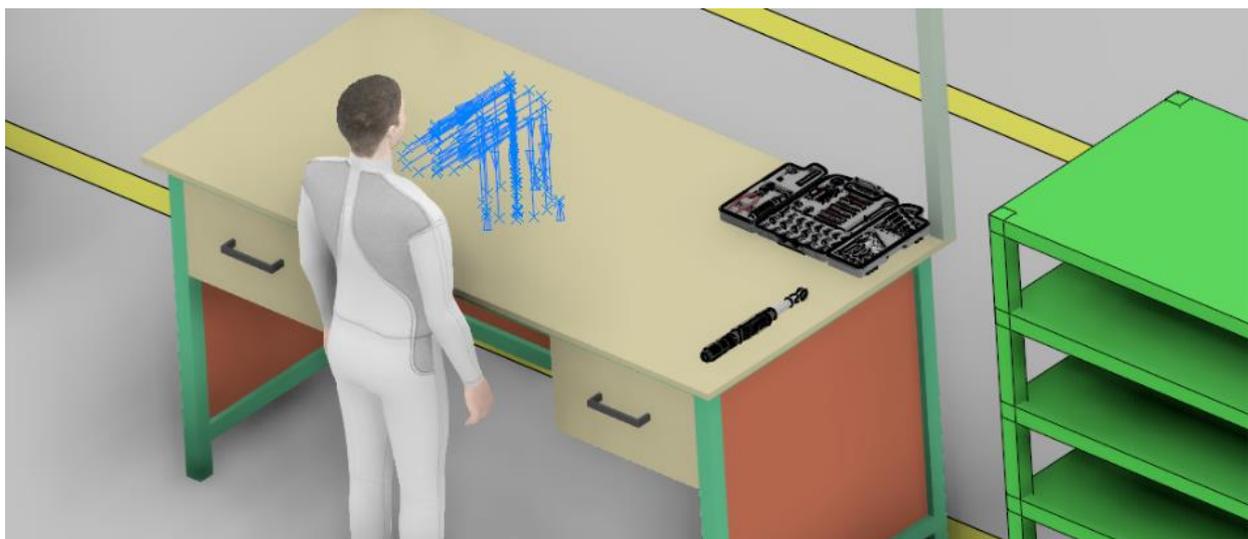


Figura 7-8. Trayectorias definidas en la *Secondary Station 2 [Turbine]*.

Nº de trayectorias	31
--------------------	----

7.3.4 Secondary Station 3 [Diaphragm and Nose Cone]

En esta última Estación secundaria, dedicada al montaje (simplificado) tanto del Diafragma como del *Nose Cone*, vemos que las trayectorias parten del trabajador hacia tres posiciones distintas, que definen al montaje parcial del Mecanismo planetario, el montaje del Diafragma (donde hay una operación de instalación del Mecanismo planetario anteriormente ensamblado) y una última posición donde se monta el *Nose Cone*, independiente al Diafragma anteriormente citado.

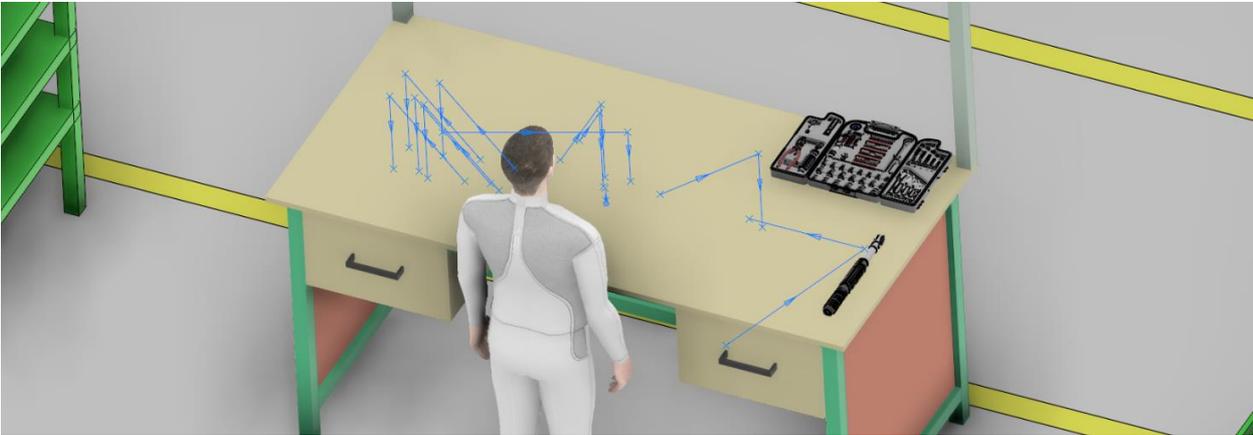


Figura 7-9. Trayectorias definidas en la *Secondary Station 3 [Diaphragm and Nose Cone]*.

Nº de trayectorias	11
--------------------	----

Quedando definidas todas las trayectorias que complementan a las operaciones, que a su vez definen el montaje del motor Garrett TPE 331-10R, aportando realismo a la par que se comprueba su viabilidad.

Llegados a este punto, nos queda realizar y exportar las varias veces nombradas simulaciones del proceso. Para ello, se hace uso de la herramienta *Experience Player*, subrayando la gran importancia de la configuración que es posible definir en la misma, reflejada en la Figura 7-10.

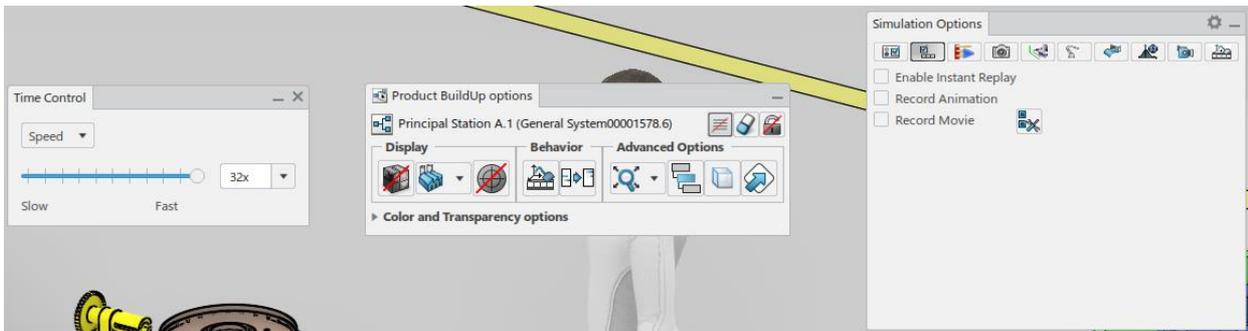


Figura 7-10. Distintas opciones con las que configurar las simulaciones

Con la configuración ya realizada, se procede finalmente a simular el proceso completo de ensamblaje del motor, exportando cada una de las simulaciones por estación. De forma que en cada estación pueda escogerse el punto de vista óptimo para observar las operaciones. Destacar que durante la exportación de la simulación se han ocultado los soportes o agarres del banco de trabajo principal, ya que no se ha conseguido indicarles movimiento dependiente del momento de simulación. De esta simulación final se han realizado las distintas capturas de la Figura 7-11.

Terminando así esta última etapa para la definición y simulación con 3DEXPERIENCE de la maqueta digital industrial para el ensamblaje del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R, alcanzando de forma muy satisfactoria los objetivos propuestos inicialmente y concluyendo con el presente Trabajo Fin de Máster.

Para acabar la presente memoria, se expondrá en el siguiente Capítulo 8 una serie de conclusiones extraídas de la realización del proyecto, así como un conjunto de propuestas de continuación futura del trabajo.

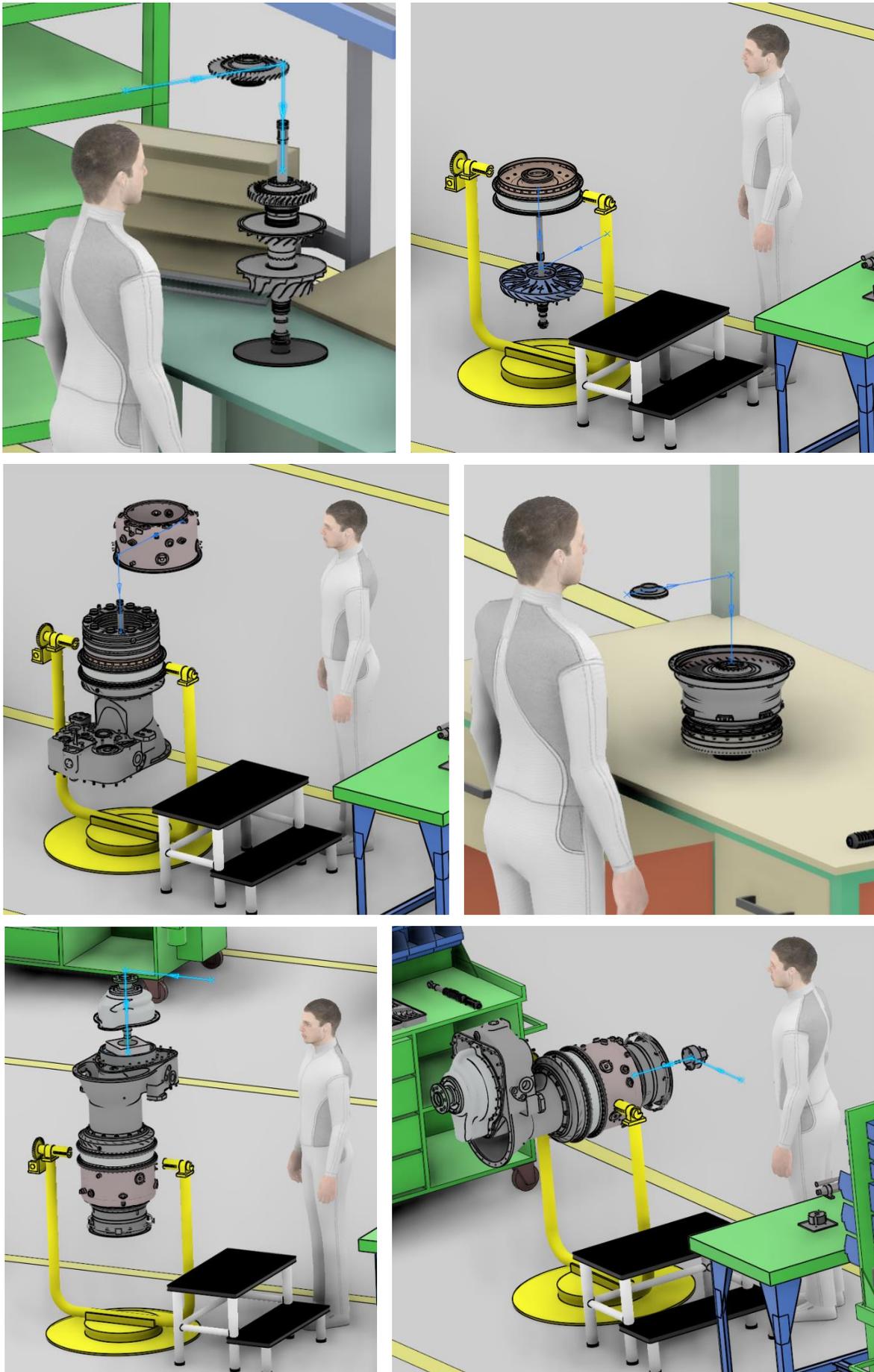


Figura 7-11. Capturas realizadas en distintos instantes de simulación de las distintas estaciones.

8 CONCLUSIONES

Para terminar el presente proyecto, se expone la siguiente reflexión acerca del trabajo realizado, de las experiencias y conocimientos adquiridos y de las mejoras y aplicaciones futuras que se plantean sobre el proceso definido, así como una breve opinión personal acerca de la plataforma 3DExperience utilizada.

En este trabajo se pretende definir y simular la maqueta digital industrial para el ensamblaje del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R, objetivo que se ha dividido en varias etapas de acuerdo con la estructura de funcionamiento del software empleado, la conocida plataforma 3DExperience.

Para ello, se comienza con una introducción del trabajo y el modelo de inicio, reflejando una serie de simplificaciones e hipótesis de las que se ha partido, las cuales si bien confieren un carácter académico al trabajo realizado, son indispensables para la viabilidad del mismo.

Al objeto de comprender tanto el modelo de motor de partida como el software empleado, se ha proseguido con dos capítulos algo más teóricos, en los que se pretende ofrecer al lector una visión general de las herramientas y el modelo disponible, del que se ha hecho una breve introducción histórico-tecnológica.

Así mismo, se ha desarrollado descriptivamente el listado de piezas o BOM que conforma el modelo de TPE 331-10R del que partimos, representando de forma gráfica la localización de cada elemento dentro del motor.

A continuación se ha llevado a cabo un recorrido sobre la evolución histórica y la utilidad de la plataforma colaborativa y multidisciplinar 3DExperience y del concepto CAD/CAM, desde sus orígenes hasta nuestros días, describiendo las aplicaciones empleadas en el presente proyecto.

Terminada la introducción teórica, se ha procedido a detallar cada una de las etapas que nos llevan desde el modelo de partida hasta la definición completa de la maqueta digital para el montaje del motor, estas etapas conforman desde la definición del MBOM mediante *Manufactured Item Definition*, con su posterior asignación de la secuencia de operaciones que hace posible el proceso de montaje y división de este en estaciones de trabajo de las mismas, haciendo uso de *Process Planning*; para a continuación, definir los recursos necesarios durante el proceso y distribuir espacialmente todos los elementos en la factoría, hasta llegar a la etapa final de asignar trayectorias a las distintas operaciones y simular el proceso, obteniendo una serie de vídeos muy representativos del montaje y de elevado valor académico.

En todas estas etapas se ha realizado una breve introducción de la herramienta de 3DExperience empleada, así como una exposición detallada de las investigaciones realizadas, de los conceptos adquiridos de los tutoriales realizados y de la aplicación de estos conceptos adquiridos en el proceso modelado sobre el motor Garrett TPE 331-10R.

Los objetivos planteados al inicio de este proyecto se han visto cumplidos en su totalidad, si bien en algunos momentos he sentido la necesidad de disponer de más tiempo para poder adquirir un conocimiento más amplio y profundo de la herramienta. Es por ello que se han incluido comentarios de las soluciones encontradas a ciertas problemáticas que han surgido en el transcurso del proyecto, con el objetivo de que un lector interesado en realizar un procedimiento similar pueda optimizar su tiempo antes estas pequeñas adversidades, pudiendo llegar igual o aún más lejos que el autor de la presente memoria.

8.1 Opinión personal

Al objeto de valorar cualitativamente la plataforma 3DExperience empleada, se procede a formular una opinión abierta acerca de la misma, exponiendo tanto las ventajas y facilidades que se ha encontrado frente a otros softwares empleados (en concreto frente a la CATIA V5), como los grandes escollos con los que ha tocado lidiar.

Para empezar y como posible resumen de mi opinión personal, he de constatar que el software que ofrece esta plataforma ha superado mis expectativas en casi todos los sentidos. Es excesivamente intuitivo, con una interfaz gráfica limpia y sencilla, que genera confianza al usuario al proponer contadas herramientas en el panel de acciones, es decir, frente a CATIA V5 se ha decidido reducir el número de herramientas y las opciones que existían dentro de cada una, de forma que se puede conseguir alcanzar metas mayores con un conocimiento menor de la herramienta.

Esto sin embargo trae una serie de inconvenientes asociados, ya que al descargar el peso en opciones de las herramientas disponibles, se ha sobrecargado el de las opciones del sistema, siendo ya menos intuitivo la relación entre ciertas opciones y las modificaciones en el modelo que queremos generar. En CATIA V5 por ejemplo, si bien hacía falta más experiencia para usar correctamente las herramientas y toda la serie de opciones que cada herramienta ofrecía a la hora de realizar una operación, era más fácil configurar de forma avanzada estas opciones, de manera que se veía la relación directa entre cambiar una opción asociada a una herramienta y el resultado que ofrecía.

En el transcurso del presente trabajo han sido varias las veces que han surgido problemáticas derivadas de este cambio, todas ellas al intentar realizar una operación algo más avanzada a las predefinidas, siendo indispensable acudir varias veces a las opciones del sistema, las cuales no son demasiado intuitivas.

Sin embargo, siguen siendo mayores las ventajas encontradas en esta innovadora plataforma, capaz de sumergir y generar interés en el tema a un usuario que partía con conceptos bastante básicos de los sistemas de fabricación.

Otro gran avance experimentado viene asociado a la simplicidad y naturalidad con la que se generan las relaciones o vínculos entre los distintos elementos definidos en distintas etapas. Es un alivio para el usuario poder modificar o eliminar elementos en etapas tempranas sin que salte por los aires el modelo o sin tener que identificar el por qué de errores que puedan surgir, como ocurría frecuentemente en la herramienta CATIA V5.

Si bien no se ha experimentado el ámbito colaborativo de 3DExperience, ya que el proyecto se ha desarrollado en un ámbito privado, destacar la innovación y el acierto que supone enfocar este tipo de herramientas al entorno de trabajo de una constante interconexión, tanto con el resto de usuarios, como entre los ámbitos de trabajo para los que se puede emplear.

Se finaliza esta breve valoración personal con la sincera afirmación de haber disfrutado con la experiencia de usar esta plataforma y con el propósito de seguir formándome en un futuro cercano acerca de la misma.

8.2 Propuestas de mejora y continuación futuras

Estimo que son necesarias o al menos pueden ser consideradas como posibles vías de continuación del presente trabajo:

- Mejora del modelo de motor Garrett TPE 331-10R, pudiendo acceder a su despiece completo para aumentar el tamaño del BOM y reducir las simplificaciones ejecutadas sobre el mismo. Puede encontrarse más información en el propio trabajo referente a su modelado [1].
- Mejora de la secuencia de montaje basándose en el manual del TPE 331-10R, al que no se ha podido conseguir acceso, que reemplazaría la definición iterativa de las operaciones catalogadas como distintas al manual disponible, de la versión 331-5
- Aumento de la complejidad de la secuencia de operaciones, incluyendo todas aquellas intermedias que no se han abordado por partir de un modelo simplificado. De igual manera se propone acometer el modelado del resto de utillaje secundario y/o *dummies* con acceso a planos o medidas reales de los

mismos, al objeto de hacer más completo y realista todo el proceso de montaje

- Aplicación del proceso modelado a un mayor número de herramientas existentes en la plataforma 3DExperience, como pueden ser las de *Work Instructions* o *Process Flow Simulation*, entre otras, de las cuales aunque se ha adquirido conceptos mediante tutoriales o investigación previa, no se ha abordado la aplicación al caso práctico que nos concierne por la limitación temporal existente
- Abordar un enfoque de análisis del proceso definido, mediante las distintas herramientas presentes en las distintas aplicaciones empleadas de 3DExperience, de forma que se pueda buscar una optimización del proceso o ,al menos, una comparación justificada de las implicaciones de los cambios realizados.

Tras adquirir un conocimiento más profundo acerca de la plataforma 3DExperience y de algunas de sus aplicaciones integradas, puedo concluir con la clara constatación sobre las innumerables posibilidades que esta plataforma incluye ya que, si bien no he rascado más que la punta del iceberg, ha sido suficiente para corroborar el increíble salto tecnológico que la compañía *Dassault Systèmes* ha realizado respecto a los softwares que he utilizado con anterioridad, como puede ser CATIA V5. Esto además ha contribuido tremendamente a mi formación en este tipo de herramientas, objetivo personal perseguido desde la finalización de mi anterior trabajo Fin de Grado.

Todo ello me lleva a sentirme profundamente agradecido por la posibilidad brindada y la experiencia realizada en este Trabajo Fin de Máster.

REFERENCIAS

- [1] J. Rendón Rodríguez deMolina, Modelado del motor turbohélice Garrett TPE 331-10R mediante CATIA V5, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2019.
- [2] A. Aerospace, «Overhaul Manual Report,» Phoenix, Arizona, 1996.
- [3] G. Álvarez Murcia, Planificación con 3DExperience del proceso de ensamblaje de las compuertas del tren de aterrizaje del Airbus A380, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2018.
- [4] R. Nogales Del Valle, Definición con 3DExperience de la secuencia de montaje del cajón del ala de una aeronave, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2020.
- [5] S. Serrano Aranda, Modelado y simulación con 3DExperience del proceso de montaje del tren de aterrizaje del Airbus A380, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2020.
- [6] A. Aerospace, «Illustrated Parts Catalog,» Phoenix, Arizona, 1998.
- [7] D. Systèmes, «Eduspace,» [En línea]. Available: <https://eduspace.3ds.com/CompanionManager/public/#/>.
- [8] H. Aerospace, «EVOLUTION OF THE HONEYWELL TPE331,» 22 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://aerospace.honeywell.com/en/news-listing/2018/january/evolution-of-the-honeywell-tpe331>. [Último acceso: 16 mayo 2019].
- [9] Hustvedt, «A cutaway of a Garrett TPE-331 turboprop aircraft engine.,» 7 Junio 2008. [En línea]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/69/Turboprop_cutaway.jpg.
- [10] J. Albarrán Ligeró, *Fundamentos del KBE (Knowledge Based ENgineering). Aplicación al diseño de engranajes de ejes paralelos con CATIA V5*, Sevilla, 2008.
- [11] I. P. M. M. P. A. Sergio Casas Yrurzum, «OpenCourseWare Universidad de Valencia,» 2015. [En línea]. Available: <http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/expresion-grafica/material-de-clase/>. [Último acceso: 12 5 2021].
- [12] D. Systemes, «Dassault Systemes, sección de Historia,» [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/acerca-de-3ds/historia/>. [Último acceso: 28 mayo 2019].
- [13] 3DExperience, «Dassault Systèmes,» [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/3dexperience>. [Último acceso: 26 4 2021].
- [14] Encyclopedia of Production and Manufacturing Management, Springer, «Process Planning,» Springer Link, 2000. [En línea]. Available: https://doi.org/10.1007/1-4020-0612-8_721. [Último acceso: 18 5 2021].
- [15] D. Wiki, «Distribución en planta por posición fija,» [En línea]. Available: http://evaluador.doe.upv.es/wiki/index.php/Archivo:Det_dis_plant_vol_y_var.png#file. [Último acceso: 28 5 2021].

- [16] A. SUMANTH, «GrabCAD, Virtual Factory v1.0,» 30 5 2015. [En línea]. Available: <https://grabcad.com/library/virtual-factory-v1-0-1>.
- [17] J. Romero Correa, «GrabCAD, Digital Torque Wrench (Torquimetro Digital),» 15 8 2020. [En línea]. Available: <https://grabcad.com/library/digital-torque-wrench-torquimetro-digital-1>.
- [18] J. Romero Correa, «GrabCAD, Tool Box (Caja de herramientas),» 9 7 2020. [En línea]. Available: <https://grabcad.com/library/tool-box-caja-de-herramientas-1>.
- [19] Honeywell, «TPE331-10 TURBOPROP ENGINE,» [En línea]. Available: <https://aerospace.honeywell.com/en/~~/media/aerospace/files/brochures/n61-1491-000-000-tpe331-10turbopropengine-bro.pdf>. [Último acceso: 20 mayo 2019].