

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

DISEÑO Y EQUILIBRADO DE UNA
LÍNEA DE FABRICACIÓN DE
TANQUES DE COMBUSTIBLE PARA
EL EUROFIGHTER TYPHOON

Autor: Eduardo Domínguez Guerrero

Tutor: José David Canca Ortiz

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

DISEÑO Y EQUILIBRADO DE UNA LÍNEA DE FABRICACIÓN DE TANQUES DE COMBUSTIBLE PARA EL EUROFIGHTER TYPHOON

Autor:

Eduardo Domínguez Guerrero

Tutor:

José David Canca Ortiz

Profesor titular

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera:

DISEÑO Y EQUILIBRADO DE UNA LÍNEA DE FABRICACIÓN DE TANQUES DE COMBUSTIBLE PARA EL
EUROFIGHTER TYPHOON

Autor: Eduardo Domínguez Guerrero

Tutor: José David Canca Ortiz

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos:

A mi familia por apoyarme, a mi pareja por insistirme y a mi tutor por ayudarme.

1. ÍNDICE

1.	ÍNDICE	7
1.1.	Índice de Figuras	9
1.2.	Índice de Tablas	11
2.	OBJETIVO Y ALCANCE:.....	12
3.	MARCO DEL PROYECTO:	14
3.1.	La compañía	14
3.2.	Nuestros productos	14
3.3.	Descripción de la planta y actividad.	17
3.4.	Descripción detallada de los procesos de fabricación de depósitos.	21
3.4.1.	Proceso de fabricación de depósitos anteriores.	24
3.4.2.	Proceso de fabricación de depósitos posteriores.....	25
3.4.3.	Proceso de integración de depósitos.....	26
4.	VSM.....	27
4.1.	Definición:.....	27
4.2.	Los 7 desperdicios.....	28
4.3.	VSM Actual: Situación actual de producción.....	29
4.4.	VSM futuro: Mejora de la producción	37
5.	DISEÑO Y EQUILIBRADO DE LA LÍNEA DE MONTAJE.....	49
5.1.	Introducción: Estado del arte de las líneas de montaje.	49
5.1.1.	Conceptos y definiciones:	50
5.1.2.	Clasificación de las líneas de montaje	51
5.1.3.	Problemas de equilibrado de líneas de montaje.	54
5.1.4.	Algoritmos de resolución de problemas de equilibrado de líneas.	58
5.2.	Diseño de la línea.....	59
5.2.1.	Línea de depósitos anteriores.....	60
5.2.2.	Línea de depósitos posteriores.....	63
5.3.	Equilibrado de la línea	65
5.3.1.	Resolución por heurística: método de Helgeson & Birnie.....	66
5.3.1.1.	Resolución problema depósitos posteriores:	67
5.3.1.2.	Resolución problema depósitos anteriores:.....	81
5.3.2.	Resolución por algoritmo exacto: modelo de William W. White	84
5.3.2.1.	Resolución del problema de depósitos anteriores	85

5.3.2.2.	Resolución del problema de depósitos posteriores	101
5.4.	Análisis de Resultados.....	114
5.4.1.	Resultados línea de montaje depósitos anteriores	114
5.4.2.	Resultados línea de montaje depósitos posteriores.....	117
6.	CONCLUSIONES.....	121
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	125

1.1. Índice de Figuras

Figura 1: góndola	14
Figura 2: flap	15
Figura 3: pértiga de repostaje	15
Figura 4: consola MRTT	16
Figura 5: caza Eurofighter	16
Figura 6: representación de la planta	17
Figura 7: nave 1	18
Figura 8: nave 2	20
Figura 9: depósitos de combustible 1000L	21
Figura 10: depósito anterior	22
Figura 11: depósito central	22
Figura 12: depósito posterior	22
Figura 13: esquema de las partes que integran un depósito	23
Figura 14: plano de la nave 1	30
Figura 15: layout planta actual	31
Figura 16: estantería de despachos	32
Figura 17: diagrama VSM actual	36
Figura 18: sincronización de línea	38
Figura 19: Layout planta futuro	39
Figura 20: ejemplo de maletín de normales	40
Figura 21: carro de herramientas	41
Figura 22: carro de despacho	42
Figura 23: ejemplo de la tarea 60 de una Instrucción de trabajo	43
Figura 24: lector de códigos de barra	43
Figura 25: ejemplo de una orden de producción con códigos de barras	44
Figura 26: diagrama VSM futuro	47
Figura 27: diagrama de precedencia	51
Figura 28: Tipos de líneas de montaje	54
Figura 29: Problemas de equilibrado de líneas de montaje	56
Figura 30: representación de los pulsos en la línea de anteriores	61
Figura 31: Representación gráfica de la línea de anteriores	62
Figura 32: representación de los pulsos en la línea de posteriores	63
Figura 33: representación gráfica de la línea de posteriores	64
Figura 34: Grafo de precedencia de tareas en depósitos posteriores	69
Figura 35: grafo de precedencias depósito anterior	82
Figura 36: grafo de precedencia de tareas en depósitos anteriores	86
Figura 37: Tareas y variables del problema	89
Figura 38: variables del problema	90
Figura 39: función objetivo, restricción de asignación unitaria y tiempo de ciclo	91
Figura 40: restricciones de precedencia	92
Figura 41: variables en Analytic solver	93
Figura 42: restricciones	94
Figura 43: restricciones	95

Figura 44: función objetivo.....	96
Figura 45: motor de la herramienta	97
Figura 46: resultado.....	98
Figura 47: resultado problema anteriores.....	99
Figura 48: resultado restricciones	100
Figura 49: resultado restricciones	100
Figura 50: grafo de precedencia de tareas en depósitos posteriores	103
Figura 51: variables del problema	105
Figura 52: función objetivo, restricción de asignación unitaria y tiempo de ciclo	106
Figura 53: restricciones de precedencia.....	107
Figura 54: función objetivo, variables y restricciones del problema.....	108
Figura 55: motor de la herramienta	109
Figura 56: resultado.....	110
Figura 57: resultado problema posteriores.....	111
Figura 58: resultado restricciones	112
Figura 59: resultado restricciones	113
Figura 60: representación gráfica de la línea de anteriores con fases de sellante	116
Figura 61: representación gráfica de la línea de posteriores con fases de sellante.....	120
Figura 62: horas por tipo de producto	123

1.2. Índice de Tablas

Tabla 1: media de tiempos invertidos	36
Tabla 2: tiempos medidos por elemento	45
Tabla 3: Tareas montaje depósito posterior	67
Tabla 4: Tareas montaje depósito posterior ordenadas por pesos.....	70
Tabla 5: estación 1.....	72
Tabla 6: candidatos.....	72
Tabla 7: estación 1.....	72
Tabla 8: candidatos.....	73
Tabla 9: estación 1.....	73
Tabla 10: candidatos.....	73
Tabla 11: estación 1.....	73
Tabla 12: candidatos.....	74
Tabla 13: estación 1.....	74
Tabla 14: candidatos.....	74
Tabla 15: estación 1.....	75
Tabla 16: candidatos.....	75
Tabla 17: estación 1.....	75
Tabla 18: candidatos.....	76
Tabla 19: estación 1.....	76
Tabla 20: candidatos.....	76
Tabla 21: estación 1.....	77
Tabla 22: candidatos.....	77
Tabla 23: estación 2.....	78
Tabla 24: candidatos.....	78
Tabla 25: estación 2.....	78
Tabla 26: Resultado equilibrado depósitos posteriores.....	79
Tabla 27: Tareas montaje depósito anterior	81
Tabla 28: Tareas montaje depósito anterior ordenadas por pesos	82
Tabla 29: resultado equilibrado depósitos anteriores	83
Tabla 30: tareas montaje depósito anterior.....	85
Tabla 31: tareas montaje depósito posterior.....	101
Tabla 32: comparativa tareas por estación anteriores.....	114
Tabla 33: tiempos ociosos anteriores.....	115
Tabla 34: comparativa tareas por estación posteriores.....	117
Tabla 35: tiempos ociosos posteriores.....	119
Tabla 36: tiempos anteriores a la implantación de la línea de montaje	122
Tabla 37: tiempos posteriores a la implantación de la línea de montaje	122

2. OBJETIVO Y ALCANCE:

El presente proyecto se desarrolla en una empresa de montaje de estructuras perteneciente al sector aeronáutico, cuyo nombre se omite por motivos de confidencialidad. Se trata de un trabajo real, realizado por quien suscribe, como parte de su actividad laboral en el departamento de ingeniería de la empresa. El proyecto se engloba dentro del proceso de mejora continua que se lleva a cabo en todos los programas, en este caso concreto, en la producción de tanques de combustible para el caza Eurofighter Typhoon.

Como se describirá más adelante, el proceso de producción de tanques de combustible se compone de dos etapas: fabricación de depósitos anteriores y posteriores, y ensamblado de los mismos para formar un tanque de 1000 litros de capacidad. En este proyecto se realizará un análisis del proceso completo y se desarrollará una línea de montaje para la fabricación de manera óptima de depósitos anteriores y posteriores, por ser éstos los elementos que emplean la mayor parte de la carga de trabajo.

Los objetivos específicos que se pretenden alcanzar con este proyecto son los siguientes:

- Implementar mejoras en el área productiva que permitan reducir los tiempos de fabricación y sus costes.
- Reducir la tasa de defectos y su correspondiente tiempo de retrabajos.
- Mejorar la imagen de la empresa con el cliente final.
- Establecer una línea de montaje basada en estaciones de trabajo, que se adapte a las condiciones del área de fabricación.
- Equilibrar la línea de montaje para que el movimiento de material se realice mediante pulsos, y así satisfacer la demanda del cliente.

Se comenzará el proyecto realizando un análisis de todo el proceso de fabricación mediante un Mapeo del flujo de valor (VSM). Con esta herramienta se pretende encontrar los desperdicios que se producen durante todo el proceso y que agregan tiempo sin valor añadido al producto. Una vez estudiados, se implementarán mejoras para reducir estos tiempos.

A continuación, se realizará una introducción a los diferentes tipos de líneas de montaje encontradas actualmente en la literatura y se discutirán las características que mejor satisfagan los requisitos de fabricación de los depósitos de combustible.

Una vez elegido el tipo de línea de montaje, se diseñará la misma partiendo de los tiempos de fabricación de los depósitos anteriores y posteriores y teniendo en cuenta las limitaciones en forma de restricciones que suponen el proceso de aplicación de sellante y el paso obligatorio de los depósitos por las gradas de taladrado.

Por último, se expondrán las variables del problema de equilibrado de la línea y se resolverá el mismo utilizando en primer lugar el método heurístico de Helgeson y Birnie, y en segundo lugar mediante programación lineal binaria, empleando el método exacto de W.W. White. De esta forma, se podrá comparar los resultados y elegir el que mejor convenga a las necesidades productivas de la empresa.

3. MARCO DEL PROYECTO:

3.1. La compañía

La compañía en la que se desarrolla el proyecto (se omite el nombre por motivos de confidencialidad) es una empresa creada en 2004, y dedicada a la gestión integral de montaje aeronáutico, incluyendo la compra de suministros y procesos finales. Su cliente principal es Airbus DS, aunque también trabaja para otros clientes nacionales del sector aeronáutico.

3.2. Nuestros productos

Los productos que se fabrican en las instalaciones de la compañía son los siguientes:

Góndolas para el avión militar C295: son las carenas que cubren el tren de aterrizaje principal.

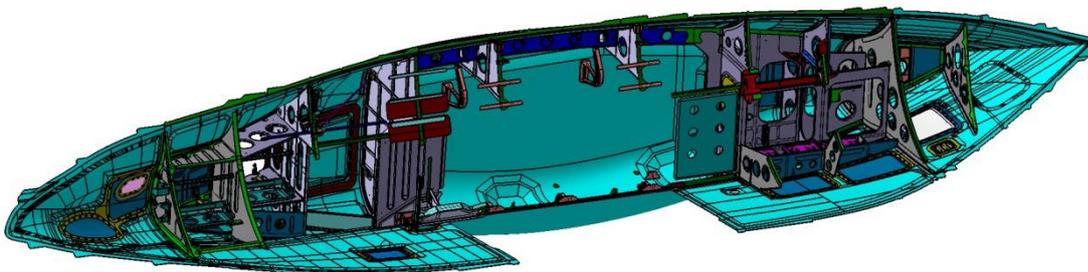


Figura 1: góndola

Flaps interiores y exteriores para los aviones militares C295 y C235: forman parte del ala del avión, y sirven para aumentar la sustentación del mismo durante el despegue y aterrizaje.

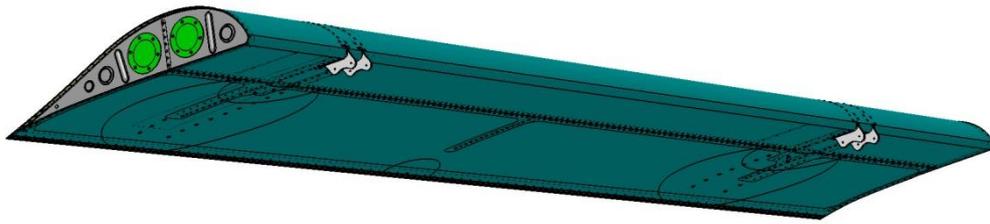


Figura 2: flap

BOOM para MRTT (acrónimo en inglés de Multi Role Tanker Transport, "Avión de transporte/cisterna multipropósito"): es la pértiga para repostaje en vuelo que se instala en los aviones cisterna.



Figura 3: pértiga de repostaje

Consolas para MRTT y aviones C295: dispositivos destinados al control de diferentes elementos del avión (e.g. BOOM de MRTT) por parte de la tripulación.

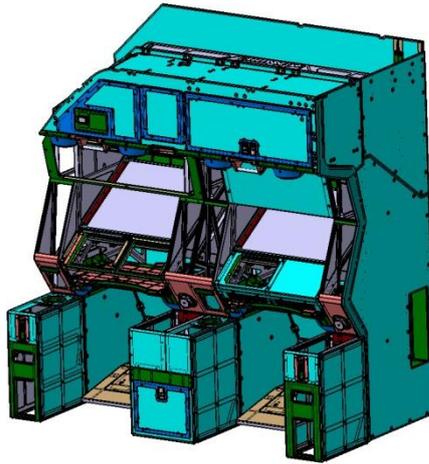


Figura 4: consola MRTT

Tanques de combustible de 1000 litros para el caza de combate Eurofighter.



Figura 5: caza Eurofighter

En la Figura 5 se puede ver un caza que lleva instalados dos depósitos de 1000 litros bajo el ala.

3.3. Descripción de la planta y actividad.

La planta se divide en 2 naves.

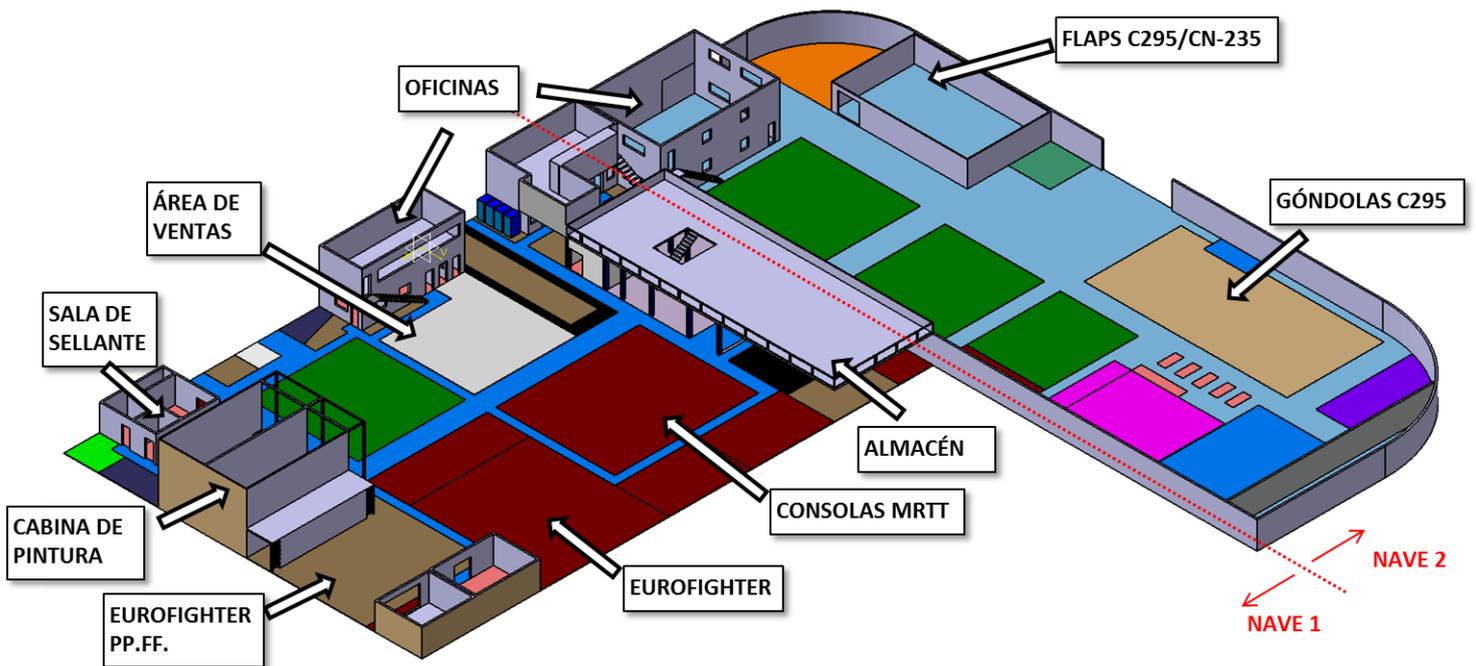


Figura 6: representación de la planta

En la nave 1, además de la zona de fabricación de depósitos de combustible, objeto de este proyecto, se encuentran las siguientes zonas:

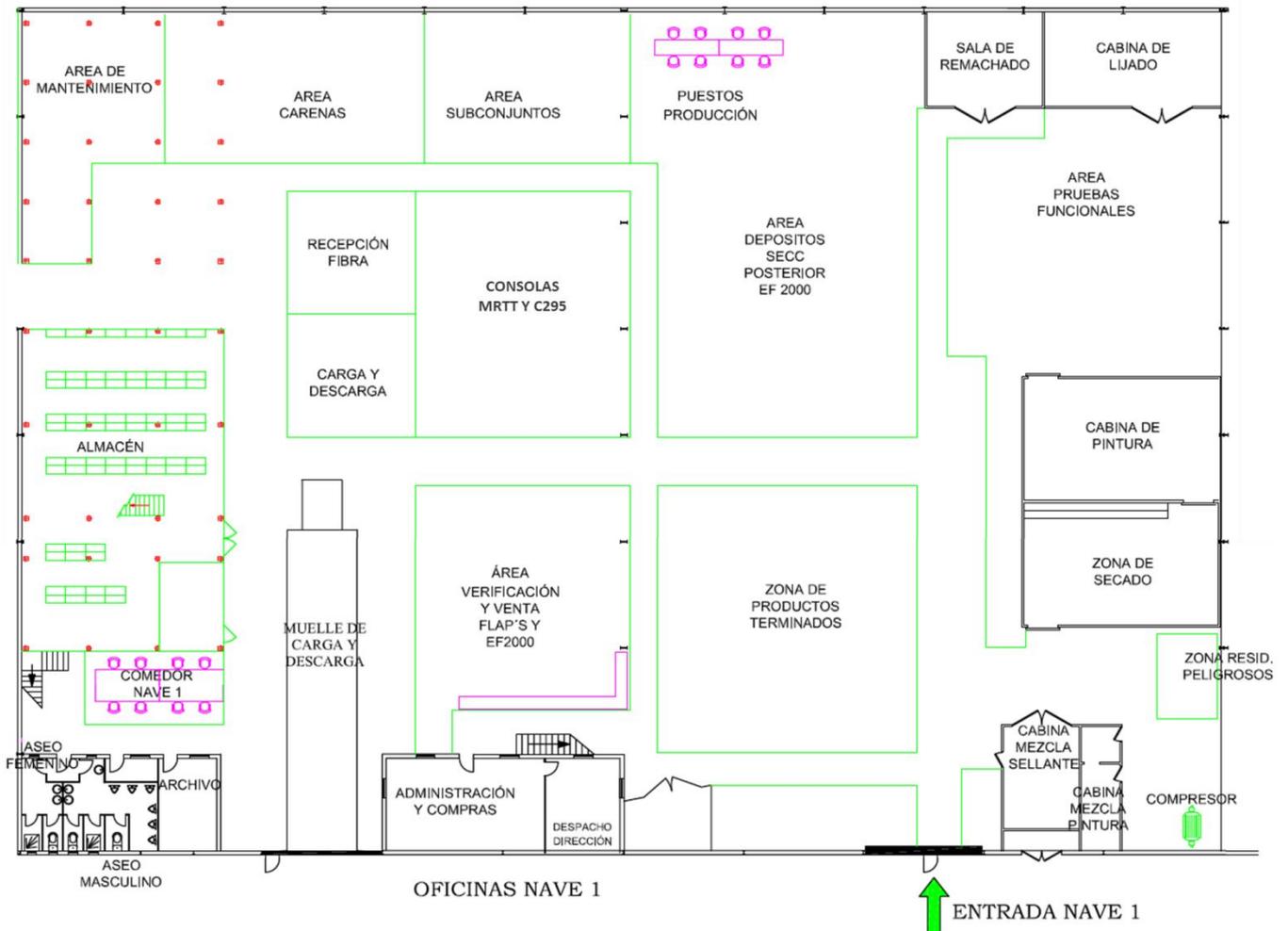


Figura 7: nave 1

Almacén: área de almacenaje de las piezas elementales que llegan a las instalaciones. Es común para las 2 naves.

- Consolas MRTT y C295: zona de montaje de consolas.
- Área de verificación y venta: área destinada a la verificación y venta de flaps, tanques de combustible, elementos del boom y consolas. Las góndolas por sus dimensiones deben ser verificadas y vendidas en grada.
- Área de pruebas funcionales de depósitos: área dotada de un banco eléctrico y un banco de combustible para la realización de pruebas funcionales en los tanques de combustible.

- Cabina de pintura y Sala de sellante: habitáculos dotados de sistemas de ventilación específicos para poder realizarse las funciones de pintura y sellado de cualquier elemento producido en la empresa.
- Muelle de carga: muelle habilitado para la descarga de piezas elementales y productos químicos, y carga de pequeños conjuntos. Los conjuntos de mayores dimensiones se cargan por la entrada de camiones de la nave 2.
- Oficinas: albergando los departamentos de administración y compras.

En la nave 2 se encuentran las siguientes zonas:

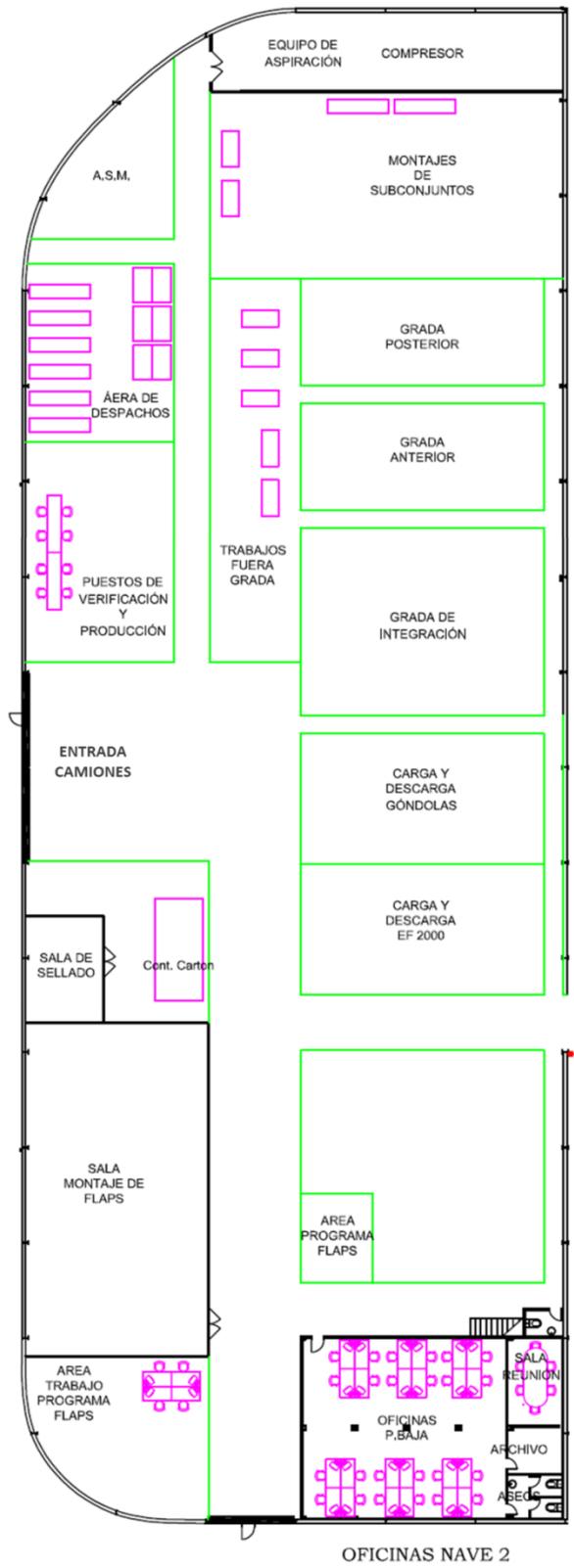


Figura 8: nave 2

- Área de montaje de góndolas: dividida en montaje de subconjuntos, gradas de montaje de anteriores y posteriores de góndola, área de trabajos fuera de grada, y grada de integración.
- Zona de carga y descarga: en esta área, debido a la proximidad a la puerta de entrada de camiones, se encuentra el puente grúa. Aquí se cargan los camiones que por sus dimensiones no caben en el muelle de carga de la nave 1.
- Sala montaje Flaps: sala semi-limpia¹ destinada al montaje de flaps interiores y exteriores, evitando la contaminación de la fibra de carbono y vidrio de los mismos.
- Oficinas: albergando el resto de departamentos.

3.4. Descripción detallada de los procesos de fabricación de depósitos.

Como se ha mencionado previamente, en las instalaciones de esta empresa se fabrican los depósitos de combustible de 1000 litros, que irán integrados en el caza de combate Eurofighter.



Figura 9: depósitos de combustible 1000L

¹ Sala en la que los parámetros de ambientales están controlados: partículas en aire, temperatura, humedad, flujo de aire e iluminación.

Los depósitos de combustible están formados por tres partes principales: depósito anterior, central y posterior. Estas tres partes se integran para formar el depósito completo (en adelante se le llamará integración).



Figura 10: depósito anterior



Figura 11: depósito central



Figura 12: depósito posterior

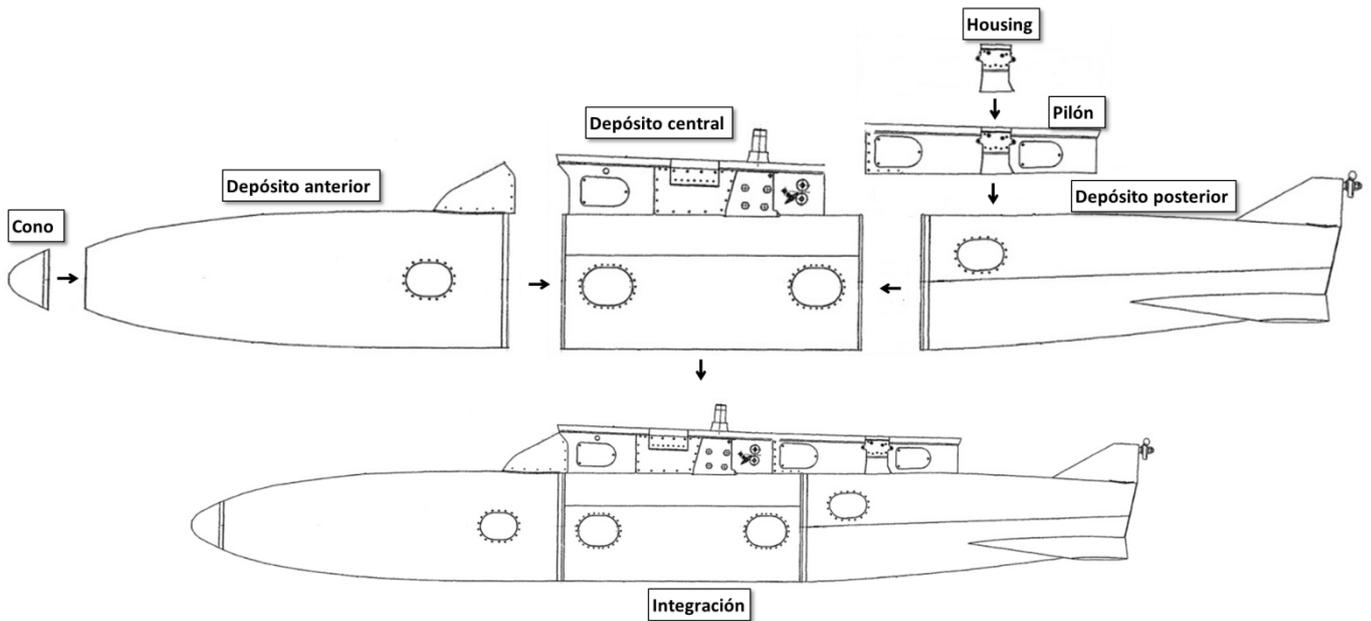


Figura 13: esquema de las partes que integran un depósito

Además de las 3 partes principales, en nuestras instalaciones se fabrican 3 subconjuntos que forman parte del elemento:

Cono: Pieza de acero que va instalada en la parte frontal del depósito anterior.

Housing: Pieza mecanizada de aluminio que va instalada sobre el depósito posterior.

Pílon: Cartelas de aluminio que recubren el Housing y que sirven de protección para los mazos de cable que conectan el depósito al ala. Va instalado primero sobre el Housing y posteriormente sobre el depósito posterior.

Actualmente hay dos empresas que integran depósitos: una se encuentra en Inglaterra (se omite su nombre por motivos de confidencialidad) y la otra es la empresa en la que se desarrolla este proyecto. En nuestra empresa se fabrican depósitos anteriores y posteriores (además de llevar a cabo la integración) y en la empresa inglesa se fabrican depósitos centrales e integraciones. Para proceder a la integración, la empresa inglesa envía una parte central terminada y la empresa española envía a cambio una parte anterior y una posterior. Por tanto, para cada integración que se fabrica en nuestra empresa, se necesitan haber fabricado dos partes anteriores y dos posteriores (una pareja para enviarla a Inglaterra y otra para integrarla aquí).

3.4.1. Proceso de fabricación de depósitos anteriores.

La fabricación de depósitos anteriores consta de las siguientes tareas:

Taladrado en grada: se sitúan en grada de taladrado la cuaderna frontera y la ojiva, y se pasan los taladros desde grada. Es imprescindible el uso de la grada porque es la que da la posición relativa entre los elementos y la situación exacta de los taladros.

Taladrado fuera de grada: se sitúan mediante útiles auxiliares y se taladran el resto de cuadernas, todos los soportes y la válvula de drenaje.

Remachado de primera fase: se remachan las cuadernas interiores y las tuercas remachables de la cuaderna soldada. Es necesario dividir el remachado y el sellado en 2 fases por motivos de falta de acceso: si se remacharan la cuaderna frontera y el soportado desde el principio, el sellador no tendría acceso al interior del depósito para poder sellar los elementos interiores.

Sellante de primera fase: en primer lugar se utiliza sellante del tipo B para cordonear las cuadernas instaladas previamente. El sellante de cordón debe dejarse curar durante 24 horas. A continuación, se realiza una primera capa de recubrimiento con sellante tipo A sobre todas las zonas remachadas que irán en contacto con el combustible. Este sellante de recubrimiento necesita otras 24 horas de curado. Por último, se aplica una segunda capa de sellante de recubrimiento, para asegurar que el depósito no sufrirá fugas de combustible por las zonas remachadas. Este sellante también necesita 24 horas de curado. Por tanto, el depósito necesita estar al menos 3 días en el proceso de sellante.

Remachado de segunda fase: en esta fase se termina de remachar el resto de elementos que componen el depósito.

Sellante de segunda fase: al igual que en la primera fase de sellante, se cordonean los elementos restantes y se aplican 2 manos de recubrimiento, necesitando este proceso otros 3 días.

Equipado: se instalan los aforadores (que marcarán el nivel de combustible del depósito) con sus correspondientes mazos eléctricos. En este punto además se instala el cono delantero que se fabricó a nivel de subconjuntos.

Pruebas funcionales: finalmente se aseguran en el banco eléctrico las conexiones de los mazos y en el banco de combustible la estanqueidad del depósito, introduciendo un líquido de propiedades similares al combustible, pero ignífugo, y comprobando que no se producen fugas.

3.4.2. Proceso de fabricación de depósitos posteriores.

Primera fase de taladrado en grada: al igual que con los depósitos anteriores, el proceso de fabricación comienza con el taladrado de la ojiva en grada. Se taladra la cuaderna frontera y las fijaciones de las aletas horizontales, la aleta vertical y el housing. En esta primera fase los taladros se realizarán a diámetro previo, ya que servirán de referencia en operaciones posteriores.

Taladrado fuera de grada: Se realizan el resto de taladros que no se pueden dar en grada por falta de acceso. En esta fase se taladran el resto de cuadernas y todos los soportes.

Primera fase de remachado: aquí se remachan las cuadernas interiores del depósito.

Sellante de primera fase: al igual que con los depósitos anteriores, en la primera fase de sellante se cordonearán y se aplicarán dos capas de sellante de recubrimiento en todas las zonas remachadas que van en contacto con el combustible. Será por tanto un proceso que necesitará 3 días.

Segunda fase de remachado: se remachará el tubo de drenaje, todos los soportes, y la cuaderna frontera.

Segunda fase de taladrado en grada: una vez remachadas todas las cuadernas, se lleva de nuevo el depósito a la grada de taladrado. En esta fase se pasan a diámetro definitivo los taladros que anteriormente se dejaron a diámetro previo.

Instalación de pilón y aletas: una vez realizado el taladrado a definitivo en grada, se instalan en esas posiciones las aletas y el pilón (el pilón se fabrica a nivel de subconjuntos).

Sellante de segunda fase: al igual que en la primera fase de sellante, se cordonean los elementos restantes y se aplican 2 manos de recubrimiento, necesitando este proceso otros 3 días.

Equipado: se instalan los aforadores con sus correspondientes mazos eléctricos, la válvula de sobrepresión, la válvula de drenaje y el tubo de trasvase de combustible.

Pruebas funcionales: de igual forma que en los depósitos anteriores, finalmente se aseguran las conexiones eléctricas y la estanqueidad del depósito, comprobando que no se producen fugas.

3.4.3. Proceso de integración de depósitos.

Unión de secciones anterior, central y posterior: se sitúan los 3 elementos en grada de integración y se unen a través de las cuadernas fronteras mencionadas previamente. Los bulones y tuercas utilizados para la unión se encapsularán con sellante tipo A, aunque en este caso no será necesario esperar al curado del sellante para poder continuar con el montaje (siempre que no se realice ninguna operación que pueda contaminar el sellante, se podrá trabajar sobre el elemento estando el sellante fresco).

Pruebas funcionales: se comprueba la correcta continuidad eléctrica entre las tres secciones del depósito.

Montaje de puertas de acceso: se realiza la limpieza interior del depósito para posteriormente instalar todas las tapas de acceso. A partir de este momento, calidad deberá asegurar que no se vuelven a abrir

Pruebas funcionales: una vez el depósito ha sido cerrado, se le realiza la prueba de estanqueidad siguiendo el mismo procedimiento que en los dos casos anteriores.

Equipado: se termina de equipar el depósito instalándole la tapa posterior, la carena anterior y los bulones de cogida al avión.

Pintura: se da una primera capa de imprimación sobre el depósito y se deja secar 24 horas. A continuación, se aplica una capa de pintura de baja reflexión (también llamada pintura anti-radar) y se deja secar otras 24 horas. El siguiente paso es aplicar una capa de pintura final que se dejará secar el mismo tiempo, y por último se realizan las serigrafías del depósito.

4. VSM

4.1. Definición:

El Mapeo del flujo de valor (VSM por sus siglas en inglés) es una herramienta Lean que sirve para analizar un proceso y ayuda a identificar sus desperdicios. En ella se muestra la secuencia y el movimiento de los materiales e información necesarios para la fabricación de un producto, partiendo desde los proveedores hasta el cliente final.

Los pasos necesarios para realizar un mapeo del flujo de valor son los siguientes:

1. Seleccionar un producto o familia de productos. El mapeo debe realizarse sobre un único producto o una familia limitada de productos. Incluir demasiados puede resultar en una sobrecarga de información.

2. Realizar un esquema detallado del proceso a analizar. Para la realización del esquema se utilizarán una serie de símbolos que suelen ser comunes en todas las literaturas. No obstante, cualquier símbolo que sea descriptivo del proceso que se quiere analizar podrá ser utilizado. Normalmente el esquema abarca desde la llegada de materiales del proveedor, hasta la entrega al cliente final. En él se deben incluir los procesos necesarios para transformar los materiales en productos requeridos por el cliente, detallando los flujos de material y de información.

3. Recopilación de información del proceso. Para completar el esquema anterior será necesario conocer la siguiente información:

- Tiempo de Ciclo (CT).
- Tiempo de trabajo disponible.
- Número de operarios.
- Lead time de fabricación (LT).
- Demanda del cliente (exacta o estimada)

4. Creación de un mapa futuro con el estado ideal. Una vez analizados los procesos actuales e identificados los desperdicios, se creará un mapa con el estado ideal al que se quiere llegar. De esta forma, será más fácil enfocar los procesos que se deben mejorar y definir las mejoras que se aplicarán. (<http://leanmanufacturingtools.org>)

4.2. Los 7 desperdicios

El objetivo que buscan todas las empresas es obtener un proceso que logre dar sólo lo que el cliente necesite, con la calidad que éste requiera y en el menor tiempo posible. Dentro de este proceso, cualquier reducción de costes aumentará el beneficio de la empresa.

Hay muchas formas de analizar e implementar una reducción de costes, desde el comienzo del diseño hasta la fabricación y ventas, y en todas el objetivo es el mismo: localizar los desperdicios y eliminarlos.

Los 7 tipos de desperdicios principalmente aceptados son los siguientes (TOYOTA PRODUCTION SYSTEM BASIC HANDBOOK):

1. **Defectos:** la necesidad de reprocesar elementos defectuosos (o incluso desecharlos), producto de una mala calidad en el proceso, requiere un coste adicional en mano de obra, materiales, instalaciones y transporte. Además, si estos defectos llegan al cliente final, es difícil de cuantificar el coste que provoca una mala imagen de la empresa o incluso la pérdida de clientes.

2. **Sobreproducción:** producir más cantidad de lo que el cliente requiere o antes de la fecha en que se requiere. La sobreproducción conlleva los costes de almacenamiento, mano de obra, manipulación adicional, controles extra, etc. Pero además debe tenerse en cuenta los costes financieros por el aumento del inmovilizado, como puede ser la pérdida de oportunidad en una mejor inversión.

3. **Esperas:** cualquier espera debida a averías, tiempos de preparación, retrasos, diseño deficiente de la línea o la de la secuencia de trabajo, los tiempos que una pieza debe esperar a otra para continuar su proceso o los tiempos que espera en cola. Todas estas esperas aumentan el tiempo de ciclo de la pieza sin aportar valor al producto.

4. **Transporte:** una inadecuada ubicación de los equipos y maquinaria conlleva a un exceso de transporte interno de materiales y personas, disminuyendo la productividad y aumentando la mano de obra y energía.

5. **Procesamiento excesivo:** mejoras realizadas sobre el producto que no son requeridas por el cliente y por las cuales no está dispuesto a pagar. Tareas que se realizan de forma independiente y que se podrían combinar para ahorrar tiempo.

6. **Inventarios:** cualquier suministro que excede los requerimientos del proceso para producir bienes. Puede referirse tanto a materiales en almacén, como a productos en proceso o terminados. Un exceso de inventario a menudo requiere equipos y mano de obra adicional para su manejo.

7. **Movimientos:** cualquier exceso de movimiento de gente en el aspecto ergonómico o de máquinas por ubicación errónea. Ello provoca pérdidas de tiempo, cansancio, fatigas musculares o frustraciones que originan una menor productividad.

Además de estos 7 desperdicios, en la literatura se pueden encontrar 2 más: **El desperdicio del talento, la capacidad y productividad humana.** Actuar pensando que las aportaciones del personal que vive el día a día con el proceso que nos ocupa no tienen valor o no dárselo, creyendo que sólo lo externo es mejor, desmotivará al equipo de trabajo y se perderán oportunidades de mejora continua (Cabrera Calva, 2014). **El diseño de bienes y servicios que no responden a las necesidades de los usuarios** (Jones & Womack, 2003)

4.3. VSM Actual: Situación actual de producción.

Para la realización del VSM nos centraremos en la producción de depósitos anteriores y posteriores, analizando los movimientos de material, información y personas que participan en el proceso. Se podría realizar un VSM individual para cada uno de los depósitos, pero al ser de la misma familia y tener procesos similares se ha decidido realizar uno solo. La fabricación de subconjuntos y de integraciones se omitirá en el análisis debido a que no sufrirán cambios con la realización de la línea a pulsos, aunque algunas de las mejoras que se explicarán más adelante se implementarán también en estas áreas.

El VSM debe diseñarse comenzando por el movimiento de material e información.

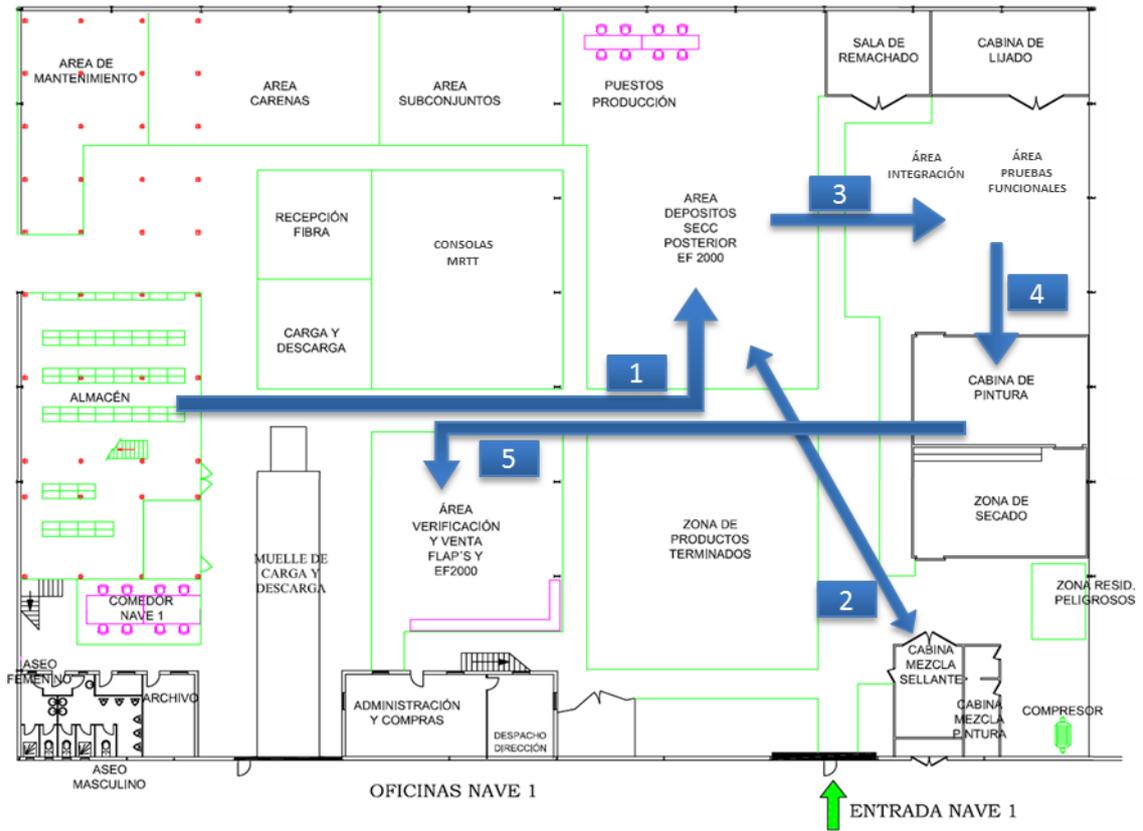


Figura 14: plano de la nave 1

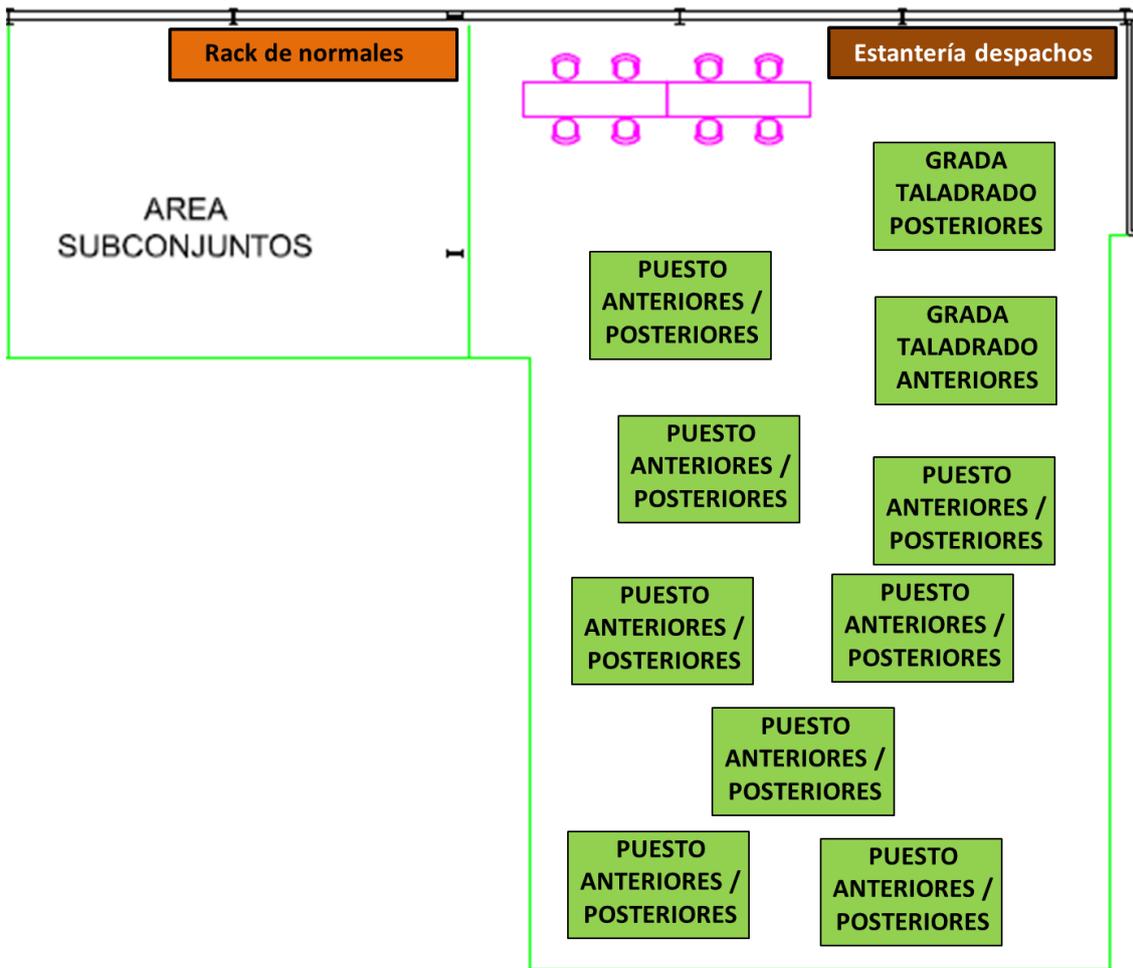


Figura 15: layout planta actual

La producción de depósitos anteriores y posteriores se sitúa en la nave 1, en la zona indicada en la Figura 14. Esta área se mantendrá en el VSM futuro una vez se mejore la distribución de las localizaciones.

Tanto las piezas elementales necesarias para la fabricación de depósitos, como las normales se reciben en el almacén directamente de los proveedores. Control de producción es responsable de hacer los pedidos considerando el lead time de entrega de los proveedores. Control de producción es también responsable de lanzar la fabricación de depósitos comunicándolo a almacén mediante un sistema MRP, interno de la organización, similar a SAP. Las órdenes de trabajo en papel se imprimen y se suministran directamente a cada puesto en taller.

Almacén realiza los despachos de piezas elementales por avión². Todo el material se acumula en la estantería al final del área de fabricación. A veces, se realizan despachos incompletos por falta de stock de piezas, y a medida que se van recibiendo se van colocando en la estantería. Cada operario se acerca a la estantería a coger las piezas que va necesitando para su montaje. Es habitual que en la estantería falten piezas, bien por inutilidades de las mismas, pérdidas, o simplemente porque no se han llegado a despachar. Esto provoca que el operario tenga que dedicar su tiempo a buscarlas y que finalmente tenga que parar la fabricación.



Figura 16: estantería de despachos

Rack de normales: los operarios cogen las normales necesarias para sus montajes del rack de normales situado al fondo del área. Cada vez que se acaba una caja de normales los operarios avisan a su coordinador para que éste a su vez avise a almacén para que reponga la caja. Esto provoca retrasos en la producción debido al tiempo de espera de las mismas. Además, hay que tener en cuenta el tiempo que se emplea en ir hasta el rack para coger las normales, que no aporta valor al producto.

² Cada depósito tiene asignado un número. El primer depósito que se fabricó corresponde al número 1 y correlativamente se numeran los siguientes. Este número se denomina número de avión.



El programa dispone de 10 operarios que se distribuyen en: 3 puestos para fabricación de depósitos anteriores, 5 puestos para fabricación de posteriores, 1 operario en subconjuntos y otro en integraciones. El maestro de taller es responsable de asignar cada día a cada operario en un puesto de trabajo, bien para continuar con el depósito que hubiera dejado el día anterior, para continuar con el depósito de un compañero, o para comenzar uno nuevo³. Como se explicó previamente, cada depósito tiene que entrar dos veces en grada de taladrado, por lo que es habitual que dos depósitos estén listos para entrar al mismo tiempo, y uno deba quedarse parado siendo necesario recolocar al operario.

Documentación: cada depósito lleva asignado una orden de producción que describe el montaje teórico haciendo referencia a planos. Los planos se encuentran en carpetas en taller, pero no todo el mundo sabe interpretarlos. Las órdenes de producción son antiguas, en la mayoría de los casos

³ Se empieza un depósito nuevo cuando un operario está parado, el despacho de piezas está realizado, y la grada de taladrado libre.

obsoletas, y no recogen el proceso de montaje real que se sigue. Los operarios tienen que dedicar parte de su tiempo a explicarse unos a otros el montaje de los depósitos.

Herramientas: Las herramientas son compartidas por todos los operarios del área. Suele suceder que varios operarios necesiten taladrar, remachar, etc. al mismo tiempo, y que no haya herramientas suficientes para todos, por lo que tienen que esperar a que queden disponibles taladros, brocas de un diámetro determinado, remachadoras, etc. que esté usando algún compañero. Otro punto a tener en cuenta es que ante la falta de herramientas se usen otras que no son las adecuadas, derivando en no conformidades en los depósitos que necesitan ser reprocesados con el consiguiente aumento en los costes de no calidad⁴.

El siguiente movimiento de material se produce entre el área de producción y el área de sellado. Durante la fabricación de depósitos es necesario que cada uno pase dos veces por la sala de sellante. Al igual que pasaba con las gradas de taladrado, es habitual que los depósitos vayan desordenadamente a esta sala, por lo que hay veces que deben quedarse parados esperando a que haya un sellador disponible⁵.

Una vez terminado el proceso de montaje y sellado, el depósito pasa al área de pruebas funcionales. Aquí se comprueba la continuidad eléctrica entre mazos eléctricos y entre elementos con requerimientos de continuidad y se prueba la estanqueidad del depósito (para asegurar que no habrá fugas de combustible). En caso de venderse como depósito suelto, tras las pruebas funcionales será inspeccionado por calidad y trasladado al área de ventas. En caso de asignarse para una integración, se trasladará a la grada de integración donde se unirá a un central recibido de la empresa de Inglaterra.

Para continuar con el análisis se calculará la capacidad de trabajo del área. Para el año 2017, la empresa tenía pedidos para fabricar 3 integraciones al mes, lo que implica tener que fabricar 6 depósitos anteriores y 6 posteriores cada mes (3 para integración propia y 3 para enviar a la empresa

⁴ Los costes de no-calidad se consideran aquellos derivados de la falta o ausencia de calidad, de la no conformidad o no cumplimiento de las necesidades de los clientes o, simplemente, de no alcanzar los niveles de calidad requeridos. (Cuatrecasas, 2005)

⁵ El proceso de sellado se lleva a cabo por selladores cualificados y certificados. Un operario no puede realizar labores de sellado.

de Inglaterra), con sus correspondientes 6 conos, 6 housing y 6 pilones. Con estos pedidos, se calcula el Tack Time⁶:

$$TT = \frac{5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} \cdot 4 \frac{\text{semanas}}{\text{mes}} \cdot 8 \frac{\text{horas}}{\text{turno}} \cdot 1 \frac{\text{turno}}{\text{día}}}{6 \frac{\text{aviones}}{\text{mes}}} = 26,67 \frac{\text{horas}}{\text{avión}}$$

Esto significa que cada 26,67 horas debe salir de la línea de producción una parte anterior y una posterior, ya sea para integrar o para enviar a Inglaterra. Para el cálculo se ha tenido en cuenta que sólo se trabaja a 1 turno de 8 horas diario.

Debido a la alta tasa de defectos que presentaban los elementos, con su correspondiente tiempo de retrabajos, y a los tiempos muertos y tiempos de espera descritos anteriormente, era difícil calcular el tiempo exacto necesario para fabricar un avión. No obstante, sabiendo el número de operarios se puede calcular el tiempo medio real invertido en cada elemento.

Número de horas en depósitos anteriores:

$$N^{\circ} \text{ horas anter} = \frac{N^{\circ} \text{ trab. anter} \cdot \text{Horas disponibles}}{N^{\circ} \text{ elementos}} = \frac{3 \cdot 160}{6} = 80 \text{ horas/avión}$$

Número de horas en depósitos posteriores:

$$N^{\circ} \text{ horas poster} = \frac{N^{\circ} \text{ trab. poster} \cdot \text{Horas disponibles}}{N^{\circ} \text{ elementos}} = \frac{5 \cdot 160}{6} = 133,3 \text{ horas/avión}$$

Número de horas en integraciones:

$$N^{\circ} \text{ horas integr} = \frac{N^{\circ} \text{ trab. integr} \cdot \text{Horas disponibles}}{N^{\circ} \text{ elementos}} = \frac{1 \cdot 160}{3} = 53,3 \text{ horas/avión}$$

Número de horas en subconjuntos (conos + housing + pilones):

⁶ El Takt time es el ritmo en el que se deben fabricar los productos en las plantas para que se pueda satisfacer a tiempo la demanda del cliente.

$$N^{\circ} \text{ horas subconj} = \frac{N^{\circ} \text{ trab. subconj} \cdot \text{Horas disponibles}}{N^{\circ} \text{ elementos}} = \frac{1 \cdot 160}{6} = 26,7 \text{ horas/avión}$$

En resumen:

	Horas/av.	Aviones/mes	Nº Operarios	Horas/mes
Anterior	80,0	6	3	480
Posterior	133,3	6	5	800
Integración	53,3	3	1	160
Subconjuntos	26,7	6	1	160
Horas totales:				1600

Tabla 1: media de tiempos invertidos

En la siguiente imagen se muestra un esquema detallado del VSM actual.

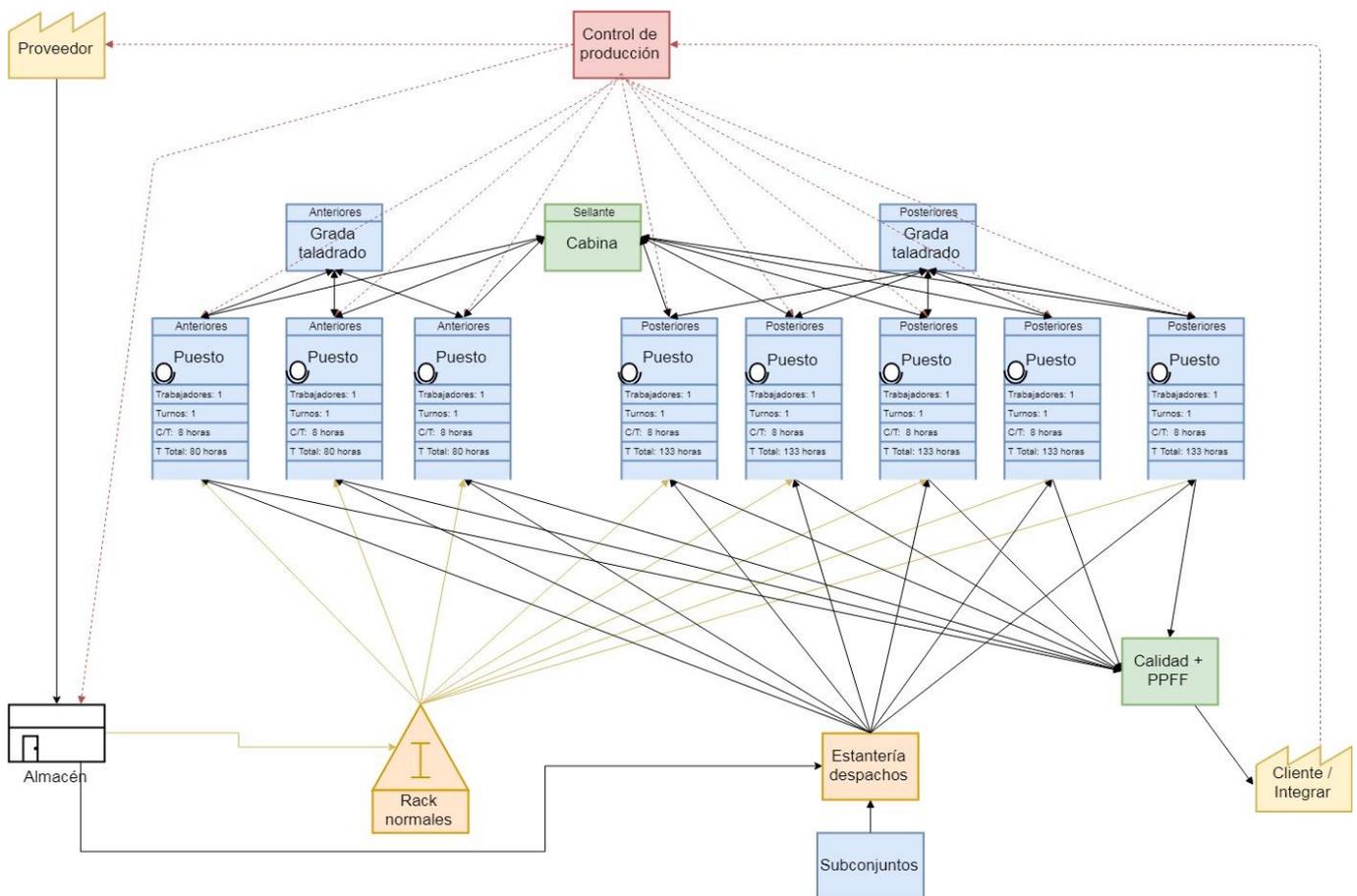


Figura 17: diagrama VSM actual

Los flujos de información y material están representados de la siguiente manera:

Las flechas negras representan el movimiento de material. El flujo de material comienza en los proveedores de piezas elementales, que las envían a nuestro almacén donde se acumulan. Almacén despacha las elementales a la estantería del área, desde donde los operarios las van cogiendo para cada puesto. Una vez ensamblados los depósitos, éstos se desplazarán tanto a las gradas de taladrado como a la cabina de sellante y al área de pruebas funcionales. Una vez terminados, se llevarán a la zona de ventas (las integraciones previamente pasarán por la cabina de pintura).

Las flechas amarillas simbolizan el movimiento de normales. De igual forma, el flujo comienza en el proveedor de las mismas, que las envía a nuestro almacén. Desde ahí se despachan al rack de normales y los operarios acuden a él a coger las que necesiten.

Las flechas rojas representan el movimiento de información. El flujo de información comienza con el pedido del cliente de un número determinado de depósitos por año (se puede considerar por tanto un sistema de producción Pull). Control de producción se encarga de planificar la producción anual, realizando los pedidos de elementales a los proveedores. El mismo departamento también comunica a almacén la necesidad de despachos y entrega las órdenes de trabajo a cada puesto en taller.

El resto de flujo de información se realiza en cada puesto, donde los operarios registran en las órdenes de trabajo las operaciones que van realizando, y termina con calidad registrando el visto bueno de esas órdenes y archivándolas.

El movimiento de personal está omitido en el esquema por simplicidad, pero como se ha explicado previamente los operarios deben acudir tanto a la estantería de despachos, como al rack de normales y generalmente en busca de herramientas.

4.4. VSM futuro: Mejora de la producción

Tras el análisis de los procesos de montaje de depósitos descrito en el punto anterior, y el estudio de los desperdicios que se cometían, se decidió que sería necesario implantar una línea a pulsos para la fabricación de depósitos anteriores y posteriores. El diseño de esta línea se mostrará en el punto

5.2. No se consideró necesario diseñar líneas a pulsos paralelas para la fabricación de subconjuntos e integraciones debido a sus reducidos tiempos de montaje y a que estos elementos se fabrican íntegramente en un solo puesto. No obstante, sí se consideró que la producción de estos elementos debía estar sincronizada con el resto de la línea (como se muestra en la Figura 18).

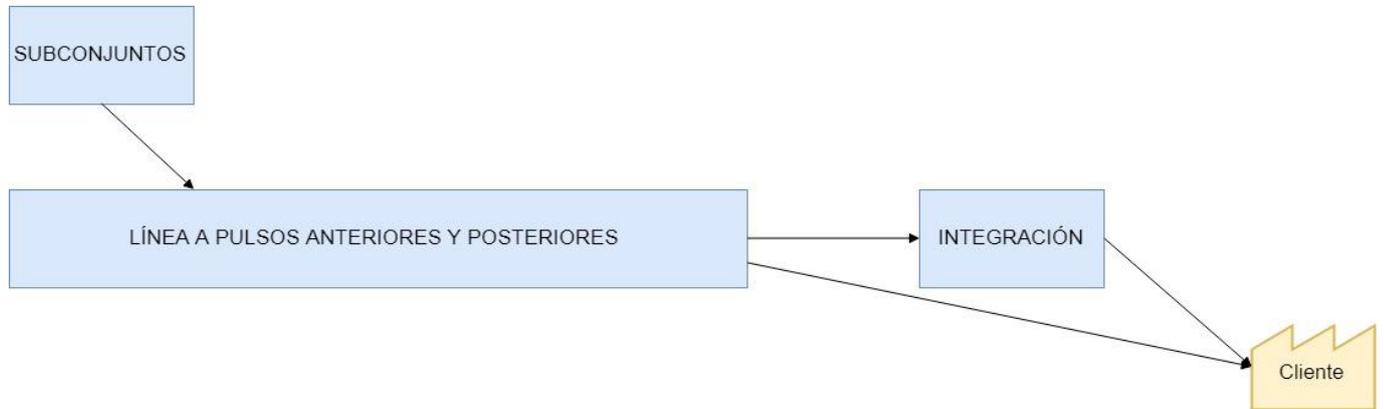


Figura 18: sincronización de línea

Para establecer la línea a pulsos se modificó el layout del área como se muestra en la Figura 19:

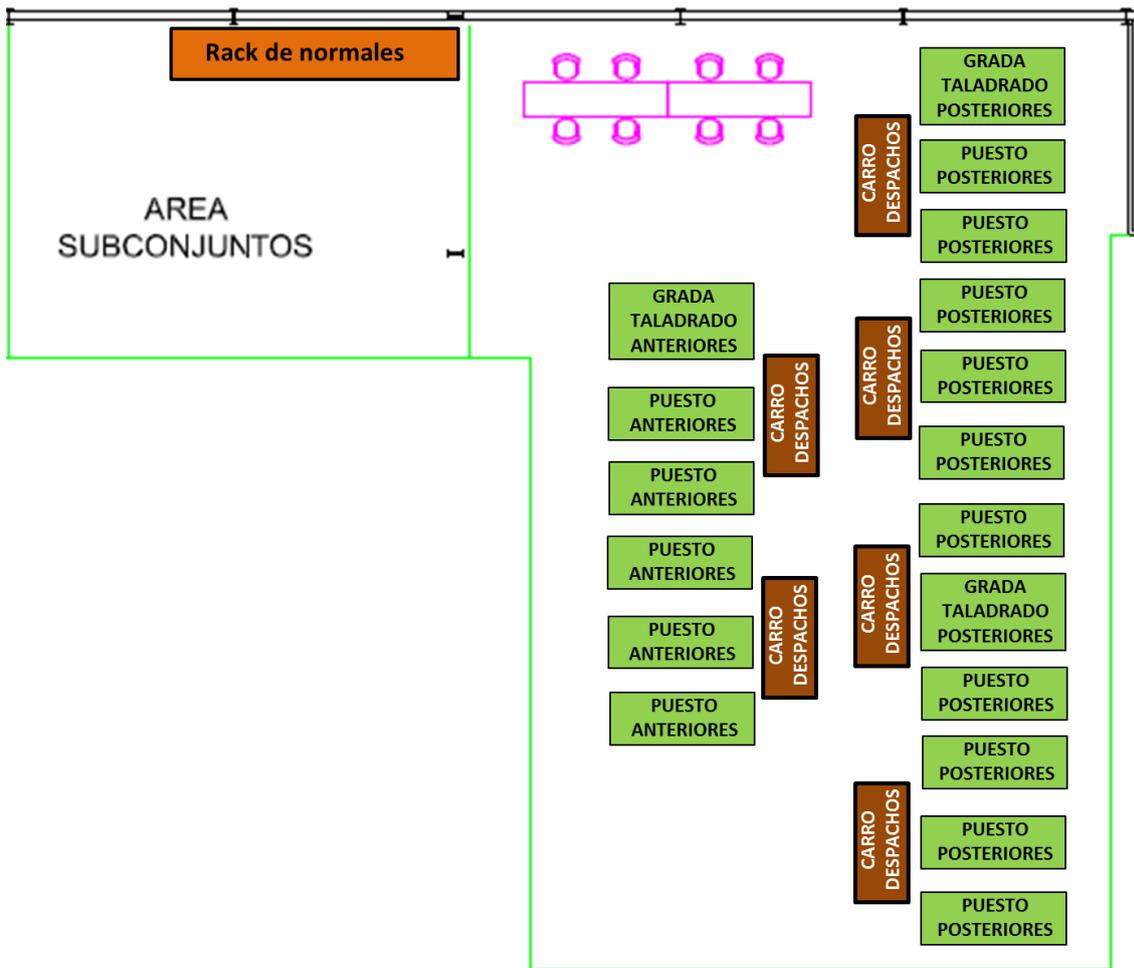


Figura 19: Layout planta futuro

Como se explicará en el punto 5.2, la línea de montaje de depósitos anteriores consta de 6 puestos de trabajo, y la línea de posteriores de 12. Según se explicó en el punto 3.4.2, los depósitos posteriores deben entrar 2 veces en grada de taladrado. Para evitar que esta grada se convirtiera en un cuello de botella se decidió duplicar la misma, instalándola en el puesto 8.

Junto con la línea a pulsos se implementaron las siguientes mejoras:

Cabina de sellante: con la línea a pulsos se consigue que cada día entren escalonadamente los elementos en la cabina de sellante, por lo que no habrá depósitos parados esperando a que quede un sellador disponible.

Maletines de normales: se diseñan maletines de normales (ver Figura 20), que se despachan directamente desde almacén a cada pulso. De esta forma se elimina el tiempo que invertían los operarios en ir hasta el rack. Durante la implantación de la línea se mantendrán simultáneamente maletines y racks, ya que los maletines llevarán las normales contadas y las mermas será necesario

reponerlas del rack. Un proyecto futuro que se sale del alcance de éste será cuantificar la merma de normales, para poder incluirlas directamente en los maletines y poder eliminar completamente el rack.



Figura 20: ejemplo de maletín de normales

Herramientas por pulsos: con la producción dividida por pulsos, las tareas que se realizan simultáneamente serán conocidas. Se asigna a cada estación un carro con las herramientas necesarias para las tareas que se desarrollan en la misma, por lo que se dejará de compartir herramientas y no habrá esperas debidas a ello. Además, se evita en gran medida la defectología producida por la utilización de herramientas no adecuadas.



Figura 21: carro de herramientas

Despachos: se despachan las piezas por avión, siempre con despachos completos. Éstos se colocan en carros con los números de avión asignados y que acompañarán al elemento por los diferentes pulsos (Figura 22). De esta forma se evitan las pérdidas de piezas elementales y se reduce el tiempo que invertirían los operarios en acudir y buscar las piezas a la estantería de despachos.



Figura 22: carro de despacho

Trabajo: con el trabajo distribuido por pulsos, los operarios tienen fijadas sus tareas desde primera hora. Cada día saben cuál es el pulso que les corresponde, por lo que no habrá personal parado por falta de trabajo. La figura del maestro de taller pasará de ser la persona encargada de repartir trabajo, a ser la persona encargada de solucionar cualquier problema que pueda generarse en la línea.

Documentación: se retiran las órdenes obsoletas de producción y los planos, y se sustituyen por Instrucciones de trabajo gráficas (Figura 23) y por órdenes que hacen referencia a las mismas. De esta forma cualquier operario puede realizar cualquier trabajo.

Además, como se mostrará más adelante, aprovechando las instrucciones gráficas se divide todo el trabajo en tareas. Cada tarea a su vez engloba un número reducido de operaciones a realizar sobre los elementos. De esta manera resulta más fácil controlar el trabajo que está realizando cada operario y medir el tiempo empleado.

INSTRUCCIÓN DE TRABAJO DE MONTAJE

**Depósitos
EFA**

ITM-01-A2810705-903A01100

Hoja nº 11
Revisión: B
Total Hojas: 27

060

TALADRADO VÁLVULA DE DRENAJE

Doc. aplicable:
A2811600

Útil aplic.:
MTAX-01-A28111-01-0003

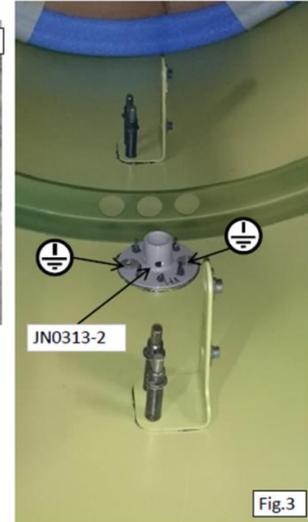
Normas aplic.:
I+D-P-320

Operaciones:

1. Situar adaptador A2811101-003 sobre taladro de válvula drenaje mediante posicionador MTAX-01-A28111-01-0003 s/ Fig.1 y 2 y detalle A. A continuación, transferir taladros previos de adaptador a revestimiento (8 Lugares).

2. Situar válvula de drenaje JN0313-2 centrada con adaptador A2811101-003 s/ Fig.3. Dar taladros a través de la válvula a diámetro definitivo 4 mm (8 lugares).
Desmontar, rebabar y avellanar a 100°.

3. Realizar ZM's s/ Fig.3



LISTA DE PARTES			
POS	P/N	DESIGNACIÓN	CANT.
	A2811101-003	ADAPTADOR	1
	JN0313-2	VÁLVULA	1

SECUENCIA DE TALADRADO			
PUNTO	ØPREVIO	ØFINAL	AVELLANADO
	2.5mm	4.00-4.075mm	100°

Figura 23: ejemplo de la tarea 60 de una Instrucción de trabajo

Control de tiempos: como se explicó previamente, no se tenían controlados los tiempos teóricos de fabricación de los diferentes elementos. Para solventar este problema se decidió instalar un sistema de control de presencia (<https://www.systempin.com/>), mediante el cual cada operario tuviera que picar el inicio y el fin de cada tarea. Para ello, se ubicó en cada sección un terminal dotado de una pistola lectora de códigos de barras, y se incluyó en las órdenes de producción el correspondiente código (ver Figura 25).



Figura 24: lector de códigos de barra

		>>> Smart <<<		Página 1 de 23	
		ORDEN DE PRODUCCION		Fecha:	
* Datos de la Pieza o Conjunto *			* Datos del Material *		
Pieza N°:	A2810705-903A01100		Código Material:		
Código Corto:	15798		Designación Material:		
Designación:	TANK ASSEMBLY FWD		Dimensión Material:		
Programa:	EF2000 DEPÓSITOS LANZABLE		Observaciones:		
* Datos del Lanzamiento *					
Ref.N°:	Pedido:				
	Posición:				
	Rev. ruta:	4			
Cantidad:	Fecha rev.:				
* Secuencia y descripción de las Operaciones *					
N° de Op.	S.G.M.	Descripción de la Operación / Util	Fecha	Verificación	
				Cantidad	Sello
0100	0	DOCUMENTACIÓN APLICABLE 			
		DOCUMENTACIÓN APLICABLE ITM-01-A2810705-903A01100 REV B			
0200	0	ATRIBUTOS 			
		*****ELEMENTO SERIABLE*****			
0300	0	COMPROBAR ELEMENTOS SERVIDOS 			
		COMPROBAR ELEMENTOS SERVIDOS. COMPROBAR ELEMENTOS SERVIDOS CON RESPECTO A LA LISTA DE COMPONENTES.			
0400	0	SITUAR EN GRADA 			
		***** ESTA OPERACIÓN REQUIERE PICADA *****			
		POSICIONAMIENTO DEL ELEMENTO EN GRADA Trazar eje sobre cuaderna frontera y situar en grada según tarea 010 de ITM-01-A2810705-903A01100			
		Situar revestimiento en grada según tarea 020 de ITM-01-A2810705-903A01100			
0500	0	TALADRAR 			
		TALADRADO DE CUADERNA SOLDADA Taladrar cuaderna soldada según tarea 030 de ITM-01-A2810705-903A01100			

Figura 25: ejemplo de una orden de producción con códigos de barras.

Con la información recogida por el sistema de control de actividades (y tras las mejoras implementadas descritas previamente), se comprobó que el tiempo real que se dedicaba a la fabricación de cada elemento era el mostrado en la Tabla 2. La diferencia de estos tiempos con respecto a los descritos en el punto 4.3 se puede considerar que eran desperdicios que no aportaban valor al producto.

	Horas	Aviones mes	Horas/mes
Anterior	44,3	6	265,8
Posterior	93,5	6	561
Integración	16	3	48
Pilón	9	6	54
Housing	7	6	42
Cono	3,5	6	21
		Horas totales:	991,8

Tabla 2: tiempos medidos por elemento

En el cálculo de horas se han excluido las de sellante y pintura, debido a que estas tareas se realizan fuera de la línea de producción. Las áreas de sellante y pintura son comunes a todos los programas de la empresa, por lo que se considerará que siempre habrá disponibilidad de cualquiera de ellas cuando un depósito las necesite.

Para continuar con el análisis se volverá a calculará la capacidad de trabajo del área. Para el año 2018, la empresa tiene los mismos pedidos para fabricar 3 integraciones al mes, lo que implicaba tener que fabricar 6 depósitos anteriores y 6 posteriores, con sus correspondientes 6 conos, 6 housing y 6 pilones. Con estos pedidos, se calcula el Tack Time:

$$TT = \frac{5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} \cdot 4 \frac{\text{semanas}}{\text{mes}} \cdot 8 \frac{\text{horas}}{\text{turno}} \cdot 1 \frac{\text{turno}}{\text{día}}}{6 \frac{\text{aviones}}{\text{mes}}} = 26,67 \frac{\text{horas}}{\text{avión}}$$

Al tener turnos de 8 horas, se redondea el TT al número múltiplo de 8 más cercano. En este caso tendríamos un **Tack Time de 24 horas por avión**. De esta forma, se consigue que el cambio de pulso se efectúe al final de la jornada de trabajo.

Una vez calculado el Tack Time se procede a calcular el número de trabajadores necesarios y el número de pulsos.

Número de pulsos en depósitos anteriores:

$$N^{\circ} \text{ Pulsos anterior} = \frac{N^{\circ} \text{ horas/avión}}{\text{Tack Time}} = \frac{44.3}{24} = 1.85 \approx 2 \text{ pulsos}$$

Número de pulsos en depósitos posteriores:

$$N^{\circ} \text{ Pulsos posterior} = \frac{N^{\circ} \text{ horas/avión}}{\text{Tack Time}} = \frac{93.5}{24} = 3.9 \approx 4 \text{ pulsos}$$

Número de trabajadores totales:

$$N^{\circ} \text{ trabajadores} = \frac{N^{\circ} \text{ horas productivas}}{\text{Horas disponibles}} = \frac{991.8}{160} = 6.2 \text{ trabajadores}$$

Redondeando al número entero más cercano se necesitarían **7 trabajadores**.

Número de trabajadores en depósitos anteriores:

$$N^{\circ} \text{ trab. anteriores} = \frac{N^{\circ} \text{ horas productivas}}{\text{Horas disponibles}} = \frac{265.8}{160} = 1.66 \approx 2 \text{ trabajadores}$$

Número de trabajadores en depósitos posteriores:

$$N^{\circ} \text{ trab. posteriores} = \frac{N^{\circ} \text{ horas productivas}}{\text{Horas disponibles}} = \frac{561}{160} = 3.51 \approx 4 \text{ trabajadores}$$

Número de trabajadores para el resto de trabajos:

$$N^{\circ} \text{ trab. resto} = \frac{N^{\circ} \text{ horas productivas}}{\text{Horas disponibles}} = \frac{165}{160} = 1.03 \approx 1 \text{ trabajadores}$$

El número de trabajadores para el resto de trabajos debería ser mayor que uno, puesto que el ratio sale 1,03. No obstante, las 5 horas que quedarían sin cubrir con un solo trabajador podrían realizarse con los tiempos ociosos de los otros 6 trabajadores de las líneas a pulsos.

Una vez conocidos todos los datos, se muestra un esquema detallado del VSM futuro.

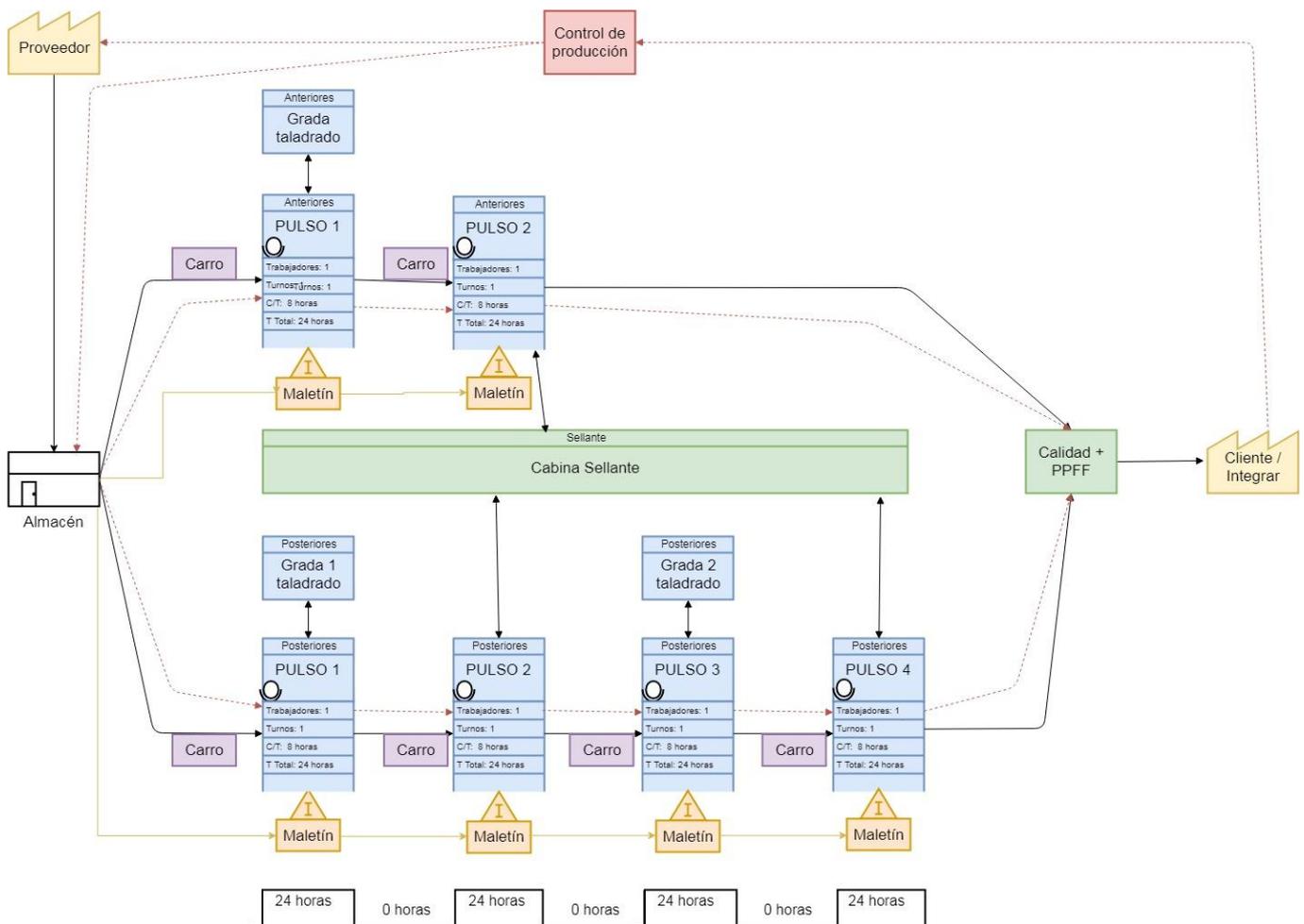


Figura 26: diagrama VSM futuro

Los flujos de información vuelven a estar representados con flechas rojas. Al igual que antes, el cliente realiza el pedido de un número determinado de depósitos por año. Control de producción se encarga de planificar la producción anual, realizando los pedidos de elementales a los proveedores. Además, comunica a almacén la necesidad de hacer despachos y entrega las órdenes de trabajo.

Estas órdenes se entregan al taller junto con el despacho de piezas y acompañan al elemento pulso por pulso, donde los operarios van registrando las operaciones, hasta que finalmente califica el visto bueno y las archiva.

Las flechas negras representan el movimiento de material. El flujo de material comienza en los proveedores, que envían las piezas a nuestro almacén. Éste prepara los carros y los despacha al primer puesto de cada línea. A medida que los depósitos cambian de puesto el carro los acompaña. La cabina de sellante está representada en medio del diagrama para indicar que los depósitos pueden acudir a ella cuando lo necesiten. Una vez ensamblados los depósitos, éstos se desplazarán al área de pruebas funcionales, y una vez terminados, se llevarán a la zona de ventas (las integraciones previamente pasarán por la cabina de pintura).

Las flechas amarillas simbolizan el movimiento de normales. Al igual que antes, el flujo comienza en el proveedor de las mismas, que las envía a nuestro almacén. En éste se preparan los maletines y se despachan a cada pulso. Almacén es responsable de recoger los maletines vacíos y de reponerlos llenos.

El movimiento de personal con esta nueva reorganización de la producción es mínimo. Gracias a los carros de despacho, los maletines de normales, y los carros de herramientas tendrán todo lo necesario a su disposición en su puesto, por lo que se elimina el tiempo que antes invertían en desplazamientos.

5. DISEÑO Y EQUILIBRADO DE LA LÍNEA DE MONTAJE

5.1. Introducción: Estado del arte de las líneas de montaje.

Las líneas de montaje son un elemento fundamental en muchos sistemas de producción en masa y a gran escala. Están compuestas por una secuencia de estaciones de trabajo conectadas frecuentemente por un sistema de manejo de materiales, con el propósito de ensamblar un producto final. El proceso consiste en una serie de operaciones, cada una compuesta por diferentes tareas, con un tiempo de ejecución asignado. El orden en el cual se llevan a cabo las diferentes tareas se define en función de relaciones de precedencia debido a las características del producto (López Aguilar, Riesco Ávila, Gallegos Muñoz, & Rodríguez Cruz, 2009). El problema de equilibrado de líneas consiste básicamente en asignar las tareas en una secuencia ordenada a las estaciones, de forma que se satisfagan las relaciones de precedencia y se optimice una función objetivo, como por ejemplo minimizar el número de estaciones (Capacho Betancourt & Pastor Moreno, 2004).

En 1799 fueron introducidas por Eli Whitney las primeras líneas de montaje en los sistemas de manufactura americanos, usando ideas de la división del trabajo y tolerancia en ingeniería, para crear ensamblados de partes de manera repetitiva (Capacho Betancourt & Pastor Moreno, 2004). Sin embargo, el caso más antiguo que marca la historia de la existencia de una línea de montaje está situado en el Arsenal de Venecia en siglo XIII. Allí, se empleaban almacenes de equipos dispuestos a lo largo de un canal por el que se hacía pasar a las galeras. De esta forma, eran las galeras las que acudían a los almacenes desde los que se abastecían con equipos y armas, agilizando de esta forma el equipamiento de las naves (Servin Ochoa, 2013). Ya en el siglo XX, en el otoño de 1911, Henry Ford disminuyó en un 90 por ciento la cantidad de esfuerzo necesario para el ensamblaje de su Modelo T, creando una línea móvil de montaje en la fase de ensamblaje final. Más tarde, amplió la línea organizando todas las máquinas necesarias para producir los componentes del Modelo T en la secuencia correcta y trató de conseguir que el flujo fuera total desde la materia prima hasta el envío del coche acabado (Jones & Womack, 2003)

5.1.1. Conceptos y definiciones:

A continuación se definen algunos conceptos que caracterizan a las líneas de montaje (Scholl & Becker, State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing, 2003).

- Tarea i : es una unidad de trabajo indivisible que tiene asociado un tiempo de proceso t_i . El trabajo total requerido para fabricar un producto se divide en un conjunto de n tareas $V=\{1, \dots, i, \dots, n\}$.
- Tiempo t_i : es el tiempo que tarda en realizarse la tarea i .
- Estación o puesto de trabajo k : es un puesto de la línea de montaje donde se ejecutan las tareas. Puede estar compuesta por un operador humano o robotizado y diferentes tipos de maquinaria y equipos.
- Tiempo de ciclo C : es el tiempo entre la salida de la línea de 2 unidades terminadas consecutivas. También es el tiempo disponible en cada estación para completar las tareas asignadas para una unidad de producto.
- Tasa de producción: número de unidades de producto fabricadas por unidad de tiempo. Se calcula como la inversa del tiempo de ciclo.
- Carga de trabajo S_k : es el conjunto de tareas asignadas a la estación k .
- Tiempo de cada estación: es la suma de los tiempos de todas las tareas asignadas a una estación.

$$t(S_k) = \sum_{i \in S_k} t_i$$

- Tiempo ocioso: es el tiempo que una estación está parada. Se define como la diferencia entre el tiempo de ciclo y el tiempo de estación.
- Relaciones de precedencia: definen el orden en el cual las tareas pueden o deben ser ejecutadas en la línea de montaje. De esta forma, una tarea no puede ejecutarse hasta que se

hayan procesado todas las que la preceden. Se representan gráficamente mediante los diagramas de precedencias.

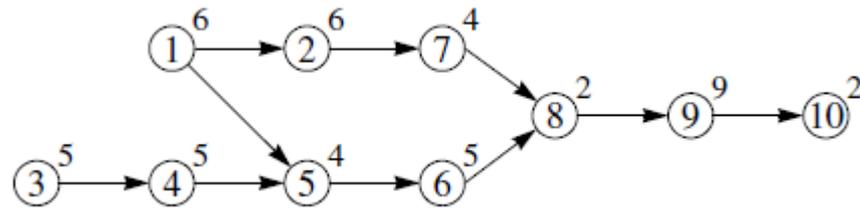


Figura 27: diagrama de precedencia⁷

5.1.2. Clasificación de las líneas de montaje

A continuación se muestra una clasificación de las líneas de montaje que resume las planteadas por (Scholl & Becker, State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing, 2003) (Scholl, Balancing and sequencing of Assembly lines, 1999) (Rekiek & Delchambre, Assembly Line Design: The Balancing of Mixed-Model Hybrid Assembly Lines with Genetic Algorithms, 2006):

- De acuerdo al tipo de producto:
 - Simples: se fabrica un único tipo de producto.
 - Mixtas: Se fabrican diferentes variantes de un producto básico. No se requieren tiempos de cambio de máquina entre una variante de producto y otra dado que se realizan las mismas operaciones básicas.
 - Multi-modelos: Se fabrican diferentes tipos de producto en una misma línea, pero en este caso los productos difieren significativamente entre ellos. Se realizará una fabricación por lotes y se considerarán los tiempos de cambio de máquina.
- De acuerdo a la variabilidad de los tiempos de las tareas:
 - Tiempos estocásticos: El tiempo de una o más tareas es aleatorio o probabilístico, por lo que no se puede conocer con exactitud el tiempo de duración de las mismas.

⁷ Extraído de (Scholl & Becker, State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing, 2003)

- Tiempos deterministas: todos los tiempos de proceso de las tareas son conocidos.
- Tiempos dependientes: Los tiempos de proceso dependen de factores como la estación a la que se asigna la tarea, el tipo de operador o la secuencia.
- De acuerdo al *layout* de la línea:
 - Estaciones en serie: se tienen estaciones simples colocadas en serie, y las tareas pasan consecutivamente de una estación a la siguiente.
 - Estaciones en paralelo: consiste en una sola línea con estaciones idénticas en paralelo, en las que se realizan las mismas tareas. La duplicidad de estaciones se utiliza para solucionar el problema que se presenta cuando el tiempo de alguna tarea es mayor que el tiempo de ciclo.
 - Líneas en paralelo: son líneas dispuestas en paralelo, muy útiles para el caso de modelos múltiples, ya que se puede asignar una línea para cada modelo o familia de modelos.
 - Líneas de dos lados: consisten en dos líneas en serie paralelas cuyas estaciones se disponen a pares opuestas. Permiten que se pueda trabajar simultáneamente por ambos lados de una misma pieza.
 - Líneas circulares/cerradas: líneas que incluyen una cinta por la que van circulando las piezas mientras son tomadas por los operadores (humanos o robots). Una vez terminadas sus tareas devuelven la pieza a la cinta, excepto quien realizar la última tarea que las deposita fuera de la cinta.
 - Línea en forma de U: este tipo de disposición de las estaciones hace más flexible el sistema de producción, ya que permite que desde un mismo puesto se trabaje en dos estaciones a la vez.
- De acuerdo al ritmo de flujo de las piezas:
 - Síncronas: todas las estaciones tienen un mismo tiempo de ciclo, por lo que las piezas pasan de una estación a otra a la vez.

- Asíncronas: En este caso las estaciones tienen tiempos de proceso diferentes, por lo que se necesitan *buffers* entre estaciones para almacenar las piezas que se han procesado previamente.
- De acuerdo al tipo de operador:
 - Líneas manuales: este tipo de línea tiene operadores humanos y los procesos pueden estar o no automatizados.
 - Líneas robotizadas: son líneas en las que los operadores son robots y los procesos son totalmente automatizados.
- De acuerdo a la disciplina de entrada de las piezas en la línea:
 - Línea de entrada fija: las piezas llegan a la línea a intervalos regulares. Si la línea es síncrona entonces la entrada de piezas será en función del tiempo de ciclo.
 - Línea de entrada variable: las piezas llegan a la línea en intervalos variables.

Los tipos de líneas descritos previamente se pueden resumir en la siguiente Figura 28:

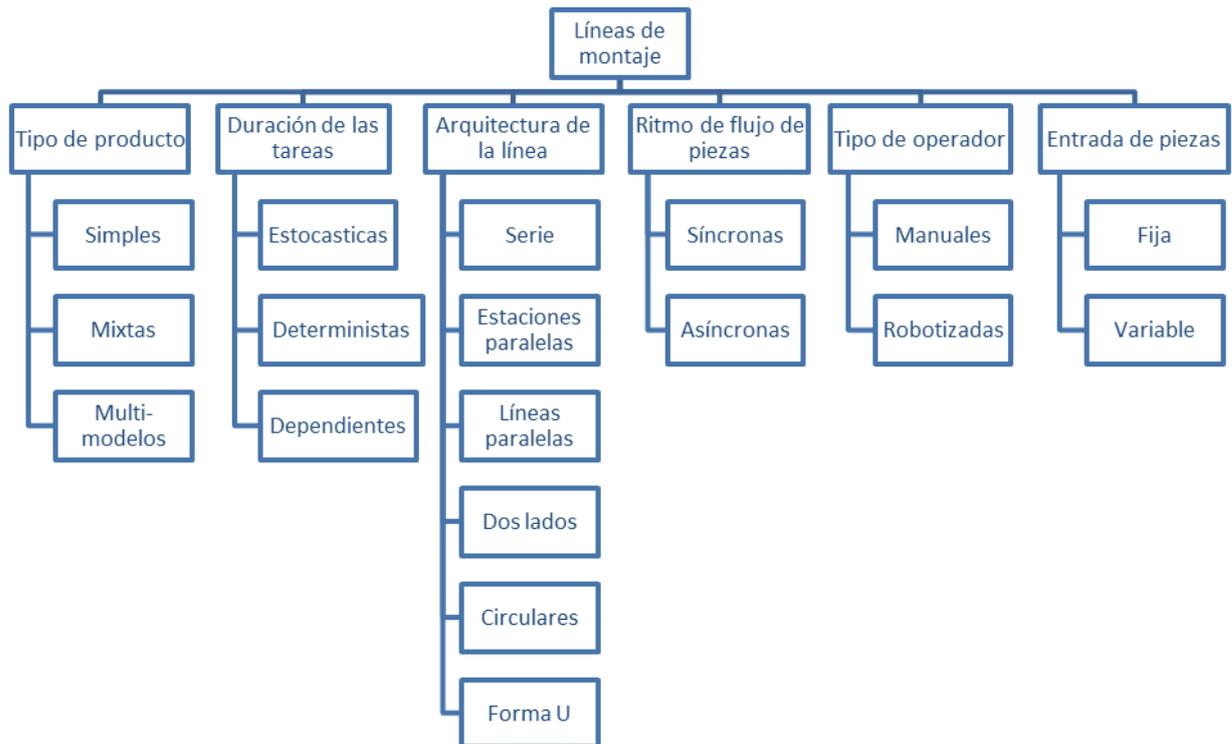


Figura 28: Tipos de líneas de montaje

Una vez vista la gran variedad de características e implicaciones que puede tener una línea de montaje, queda claro que la elección de los diferentes tipos determinará el tipo de problema que se necesita resolver. Los problemas más comunes encontrados en la literatura son los que se encargan del equilibrado (ALBP: *Assembly Line Balance Problem*) y los de diseño de líneas (ALDP: *Assembly Line Design Problem*). Sin embargo, también se pueden encontrar problemas en los que el objetivo es equilibrar líneas de desmontaje (DLBP: *disassembly line balancing problem*). Este proyecto se centrará solo en los problemas relacionados con diseño y equilibrado de líneas de montaje.

5.1.3. Problemas de equilibrado de líneas de montaje.

Los problemas de equilibrado consisten en distribuir las tareas necesarias para ensamblar un producto a través del conjunto de estaciones que componen la línea de montaje. Para llevar a cabo estas asignaciones se tendrán en cuenta varias restricciones y diferentes objetivos. En los problemas

clásicos el objetivo es encontrar el número mínimo de estaciones o el tiempo de ciclo mínimo requerido para procesar un cierto número de tareas, de manera que se optimice una medida de eficiencia específica mientras se mantienen las relaciones de precedencia (Capacho Betancourt & Pastor Moreno, 2004).

Según Baybars (Baybars, 1986), una línea se considerará equilibrada si la suma de los tiempos ociosos de las estaciones es el mínimo posible. Además, si las tareas pueden ser agrupadas de forma que el tiempo de ciclo de todas las estaciones sea el mismo, se dirá que la línea tiene un equilibrio perfecto. Por el contrario, se considera que la tasa de producción de la línea viene determinada por la estación más lenta, también conocida como estación cuello de botella.

Se pueden encontrar diversas clasificaciones de los problemas de equilibrado de líneas, pero dos son las más aceptadas: la propuesta por Baybars (Baybars, 1986) en la que se distinguen dos tipos de problemas: el problema de equilibrado más simple, SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*), y el problema general, GALBP (*General Assembly Line Balancing Problem*). Y la propuesta por Ghosh y Gagnon (Ghosh & Gagnon, 1989), en la que plantean cuatro categorías de modelos de equilibrado de líneas: simple determinista, simple estocástico, multi/mixto determinista y multi/mixto estocástico.

Con estas dos clasificaciones son muchos los autores que han clasificado el problema de equilibrado de líneas como se muestra en la Figura 29 y que se detallan a continuación (Ghosh & Gagnon, 1989) (Baybars, 1986) (Scholl, Balancing and sequencing of Assembly lines, 1999) (Scholl & Becker, A survey on problems and methods in generalized assembly line, 2003) (Scholl & Becker, State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing, 2003) (Rekiek, Dolgui, Delchambre, & Bratcu, 2002):

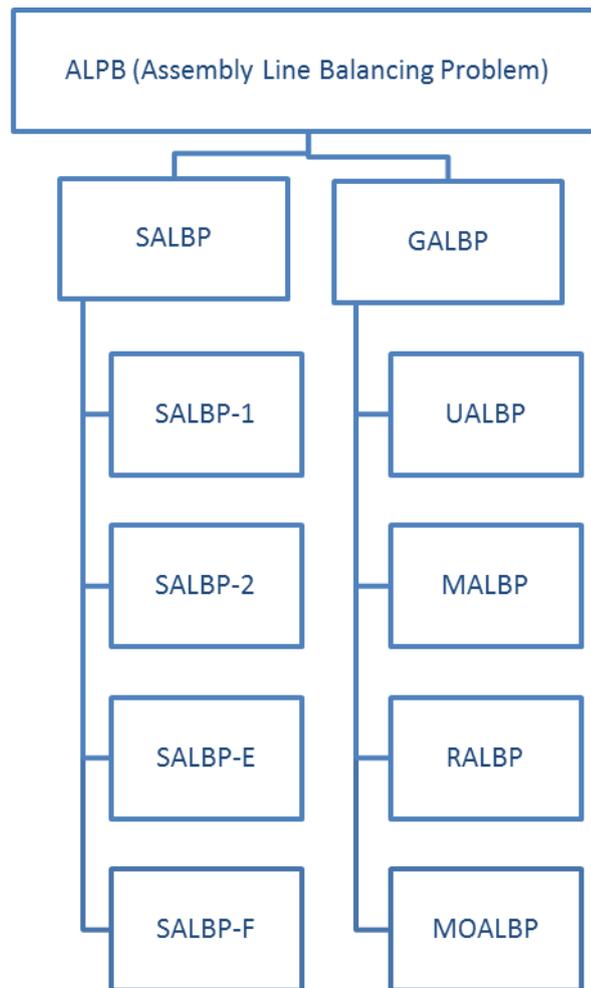


Figura 29: Problemas de equilibrado de líneas de montaje

- Problema simple de equilibrado de línea (SALBP):

Son los problemas de equilibrado más simples y se definen por las siguientes características: se consideran líneas de tipo en serie sin estaciones en paralelo; sólo se consideran restricciones de precedencia; las tareas no se pueden dividir en dos o más estaciones; los tiempos de las tareas son determinísticos; la línea es síncrona conforme al tiempo de ciclo, que se calcula en función de la cantidad que se quiere producir; todas las estaciones están igualmente equipadas para realizar cualquier tarea; la tasa de entrada de piezas en la línea es fija.

A parte de estas características comunes para todos, los SALBP se pueden clasificar en cuatro grupos distintos:

- SALBP-1: Consiste en minimizar el número de estaciones a las que asignar un conjunto de tareas para un tiempo de ciclo o tasa de producción dados. Este caso es muy común cuando un sistema nuevo de montaje va a ser instalado y la demanda es conocida.
- SALBP-2: Consiste en minimizar el tiempo de ciclo (o maximizar la tasa de producción) dado un número de estaciones fijo. Este caso es común cuando la línea de montaje ya existe.
- SALBP-E: se busca maximizar la eficiencia de la línea minimizando el producto de N (número de estaciones) por C (tiempo de ciclo).
- SALBP-F: consiste en determinar si existe una solución factible para la combinación de un número N de estaciones y un tiempo de ciclo C , es decir, se quiere conocer si la línea puede operar con N estaciones y un tiempo de ciclo C dados.

- Problema general de equilibrado de línea (GALBP):

Los GALBP engloban a todos los problemas de equilibrado de líneas que no son SALBP. Este tipo de problema se asemeja más con la realidad ya que tienen en cuenta estaciones en paralelo, modelos mixtos, tiempos de proceso variables, etc.

Los problemas GALBP se clasifican en cuatro tipos:

- Problema de equilibrado de líneas tipo-U (UALBP): son problemas similares a los SALBP salvo que consideran que la distribución en planta es del tipo U en vez de en serie. Este tipo de disposición en U hace que los UALBP sean más flexibles que los SALBP dado que se pueden asignar tareas sin que se hayan asignado previamente sus predecesoras. De manera similar a los problemas SALBP, se distinguen los problemas UALBP-1, UALBP-2 y UALBP-E, en donde se busca minimizar el número de estaciones, minimizar el tiempo de ciclo y maximizar la eficiencia de la línea U, respectivamente.
- Problema de equilibrado de línea con modelos mixtos (MALBP): son problemas para el equilibrado de líneas con diferentes modelos de un mismo producto, por lo tanto, se tiene un conjunto de tareas básicas que se realizan en todos los modelos y no es necesario considerar tiempos de setup. Al igual que en el caso anterior, se distinguen los problemas

MALPB-1, MALBP-2 y MALBP-E, para minimizar el número de estaciones, minimizar el tiempo de ciclo y maximizar la eficiencia de la línea U, respectivamente.

- Problema de equilibrado de líneas robotizadas (RALBP): Este tipo de problema persigue tanto el equilibrado de la línea como la asignación de robots a las estaciones de trabajo, teniendo en cuenta las diferentes capacidades que puedan tener para la realización de las tareas.
- Problema de equilibrado de línea con objetivos múltiples (MOALBP): En este tipo de problemas se consideran varios objetivos simultáneamente como por ejemplo: minimizar el número de estaciones, el coste total de montaje o el número de buffers; maximizar la eficiencia de línea, etc.

5.1.4. Algoritmos de resolución de problemas de equilibrado de líneas.

Hay numerosos algoritmos desarrollados para resolver problemas de equilibrado de líneas, principalmente para el caso simple (Simple Assembly Line Balancing Problem) y particularmente para SALBP-1; entre ellos se distinguen dos grupos: los métodos exactos (basados en programación lineal, programación dinámica y procedimientos branch&bound) y los métodos heurísticos que aproximan la solución del problema (Capacho Betancourt & Pastor Moreno, 2004).

De acuerdo con Plans (Plans, 1999), los métodos exactos garantizan una solución óptima, aunque éstos puede utilizarse en casos con un número muy reducido de tareas, ya que para problemas con un número grande de variables y de restricciones, se hace inabordable el problema en cuestión de tiempos de cálculo; esto, de alguna manera, ha motivado el desarrollo de métodos heurísticos que permiten resolver eficientemente problemas más reales.

En el punto 5.3.1 se expondrá el método heurístico de resolución de Helgeson y Birnie (Helgeson & Birnie, 1961), en el que las tareas se ordenan además de por las restricciones de precedencia, por unos índices de prioridad.

En el punto 5.3.2 se detallará el modelo exacto de William W. White (White, 1961), uno de los primeros modelos de programación lineal binaria para la resolución de problemas tipo SALBP-1.

5.2. Diseño de la línea.

Una vez expuesto el estado del arte de las líneas de montaje, se va a proceder a diseñar las dos líneas objeto de este proyecto. Como ya se explicó previamente, se quieren implantar dos líneas de montaje para dos productos diferentes: depósitos anteriores y depósitos posteriores. Los datos de los que parte el problema son los siguientes:

- Los depósitos anteriores y posteriores son elementos pertenecientes a una misma familia de productos, pero tienen estructuras de fabricación muy diferentes entre sí, por lo que sobre ellos se realizan muy pocas tareas en común.
- Los tiempos de las tareas son conocidos⁸ e independientes de la estación en la que se lleven a cabo.
- Las restricciones del problema serán principalmente las relaciones de precedencia de las tareas. No obstante, y como ya se comentó en el apartado 3.4., durante el proceso de fabricación los depósitos deben pasar por la grada de taladrado y deben sellarse en la cabina de sellante. Por tanto, habrá tareas que tengan restricciones de asignación a una determinada estación.
- El proceso de montaje se llevará a cabo únicamente por operarios.
- Se debe cumplir con el Tack time establecido para satisfacer la demanda del cliente.

Partiendo de estos datos se procede al diseño de la línea:

Teniendo en cuenta que los elementos pertenecen a una misma familia de productos, en un primer planteamiento del problema se pensó en implantar una única línea mixta o multi-modelo, pero las estructuras de fabricación de los 2 depósitos difieren en gran medida, por lo que se optó por instalar dos líneas simples independientes.

La restricción impuesta por las relaciones de precedencia de las tareas, junto con el hecho de que los tiempos de ejecución de las mismas sean conocidos (deterministas), nos hizo tomar la decisión de

⁸ Los tiempos de las tareas se obtuvieron con el sistema de control de tiempos

que la arquitectura de la línea fuera la más simple (línea en serie). Para poder cumplir con las restricciones de asignación de tareas a determinadas estaciones se optó por lo siguiente:

- Se añadieron relaciones de precedencia de tal modo que todas las tareas que necesitan ser realizadas en la grada de taladrado tuvieran que realizarse de forma consecutiva. De esta forma, una vez equilibrada la línea, sólo será necesario instalar las gradas de taladrado en la estación que corresponda.
- Se tuvo en cuenta que las tareas de sellante conllevan 72 horas entre tiempo de aplicación y tiempo de curado. Esto significa que los depósitos deben pasar 3 días completos en la sala de sellante. Considerando que todas las operaciones de sellante se realizan en una única tarea y asignándole a ésta un tiempo igual al tiempo de ciclo, se consigue que a la hora de equilibrar la línea el proceso de sellado se asigne todo a una misma estación. Por tanto, se considera la cabina de sellante como una estación más en serie con las demás estaciones.

Por último, para cumplir con las entregas requeridas por el cliente, se determinó que la entrada de elementos en la línea fuera fija y el ritmo de flujo de piezas fuera síncrono, cumpliendo así con el Tack time de la línea.

5.2.1. Línea de depósitos anteriores.

Con los datos obtenidos en el VSM futuro, para fabricar 6 depósitos anteriores al mes se necesitaría una línea compuesta de 2 estaciones, 2 pulsos de 24 horas cada uno y 1 operario por estación. Esto, desde un punto de vista Lean, no tendría mucho sentido puesto que no se apreciaría movimiento en la línea, por lo que los operarios no tendrían la impresión de que el elemento tiene que cambiar de estación y que sus tareas tienen que estar terminadas antes de que eso pase. Para solucionar este problema, cada pulso de 24 horas se divide en 3 pulsos de 8 horas, cada uno con su estación de trabajo independiente y un movimiento real del elemento.

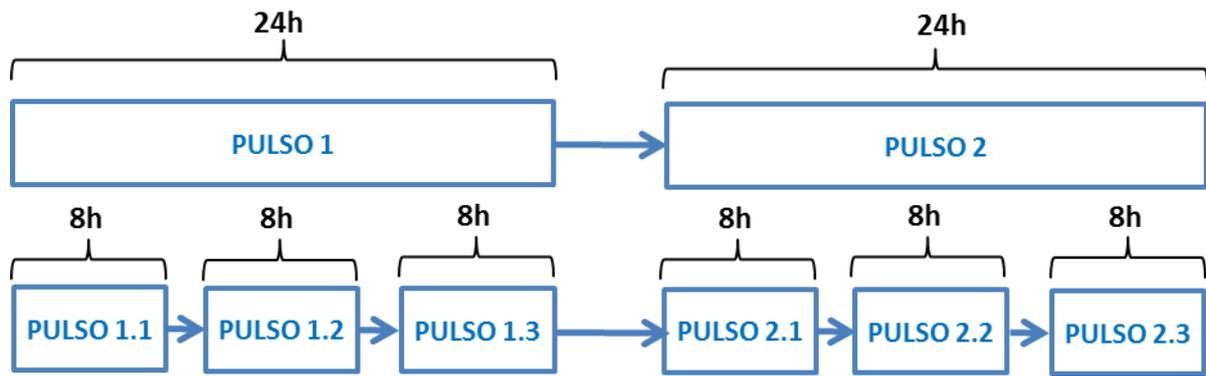


Figura 30: representación de los pulsos en la línea de anteriores

Por tanto, un operario cubriría los pulsos 1.1, 1.2 y 1.3, y otro operario cubriría los pulsos 2.1, 2.2 y 2.3. De esta forma, el trabajador tendría que terminar las tareas de su pulso en las 8 horas productivas puesto que en la siguiente jornada el elemento habrá cambiado de estación.

A continuación, se explica de forma esquemática el movimiento de los elementos y operarios en la línea, donde cada cuadro en blanco representa una estación vacía, cada cuadro coloreado representa una estación con un depósito, y los operarios son simbolizados encima de cada estación. En la cabecera del diagrama está indicado el pulso, y a la izquierda el día⁹:

⁹ Al haber un solo turno de trabajo, cada pulso de 8 horas coincide con un día del calendario.

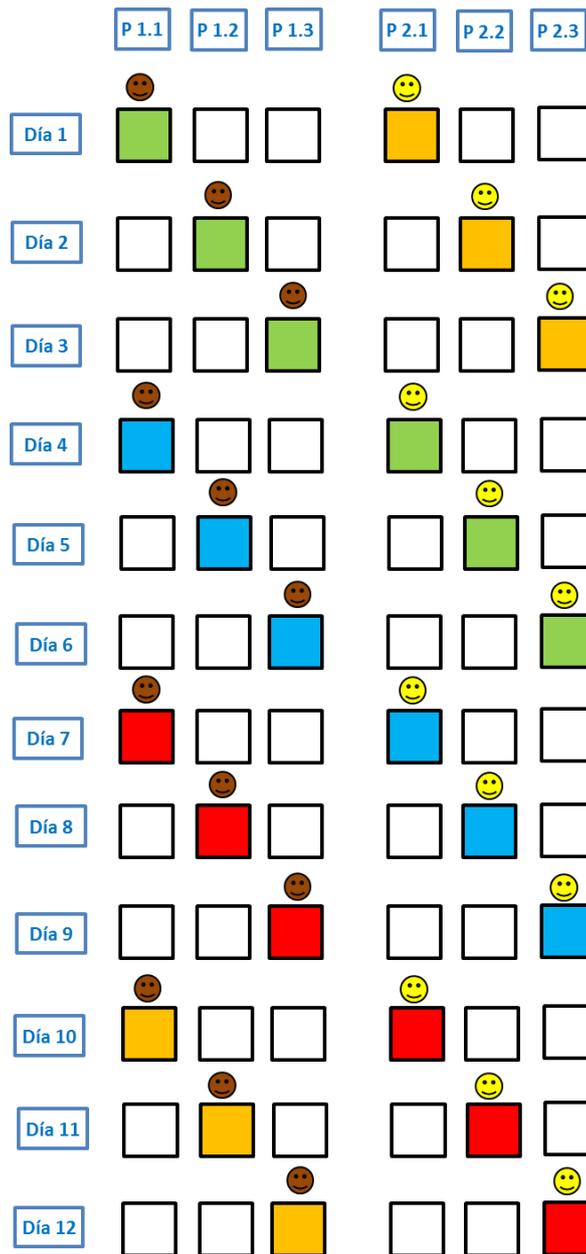


Figura 31: Representación gráfica de la línea de anteriores

Como se puede observar, cada operario trabaja tres días sobre un mismo depósito en tres estaciones diferentes; al cuarto día, entrega su depósito a la siguiente estación y vuelve a la primera para comenzar de nuevo con otro depósito.

En este diagrama por simplicidad no se ha representado las estaciones de sellante, puesto que es realizada por personal diferente a los operarios de la línea. Una vez ordenadas las tareas y equilibrada la línea se justificará la posición de dichas estaciones.

5.2.2. Línea de depósitos posteriores.

Como se calculó en el VSM futuro, para fabricar 6 depósitos posteriores al mes se necesitaría una línea formada por 4 estaciones, 4 pulsos de 24 horas cada uno y 4 operarios (1 por estación). Al igual que se ha hecho con los depósitos anteriores, cada pulso de 24 horas se ha dividido en 3 pulsos de 8 horas, cada uno con su estación de trabajo independiente y un movimiento real del elemento.

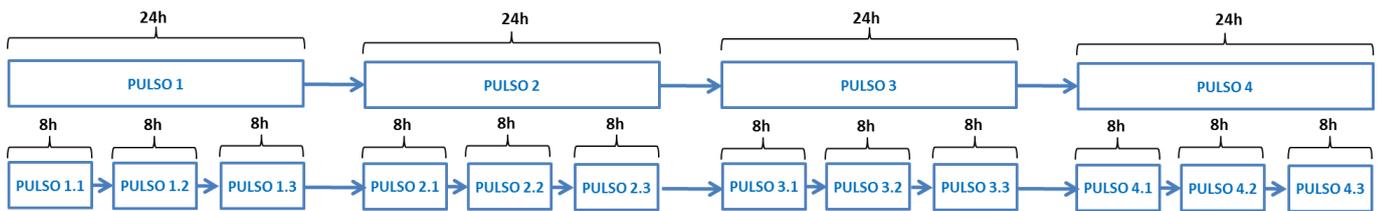


Figura 32: representación de los pulsos en la línea de posteriores

Del mismo modo, un operario cubriría los pulsos 1.1, 1.2 y 1.3, otro operario cubriría los pulsos 2.1, 2.2 y 2.3., un tercer operario los pulsos 3.1, 3.2 y 3.3 y el último los pulsos 4.1, 4.2 y 4.3. De esta forma, el trabajador tendría que terminar las tareas de su pulso en las 8 horas productivas puesto que en la siguiente jornada el elemento habrá cambiado de estación.

A continuación, se explica de forma esquemática el movimiento de los elementos y operarios en la línea, donde de nuevo cada cuadro en blanco representa una estación vacía, cada cuadro coloreado representa una estación con un depósito, y los operarios son simbolizados encima de cada estación. En la cabecera del diagrama está indicado el pulso, y a la izquierda el día¹⁰:

¹⁰ Al haber un solo turno de trabajo, cada pulso de 8 horas coincide con un día del calendario.

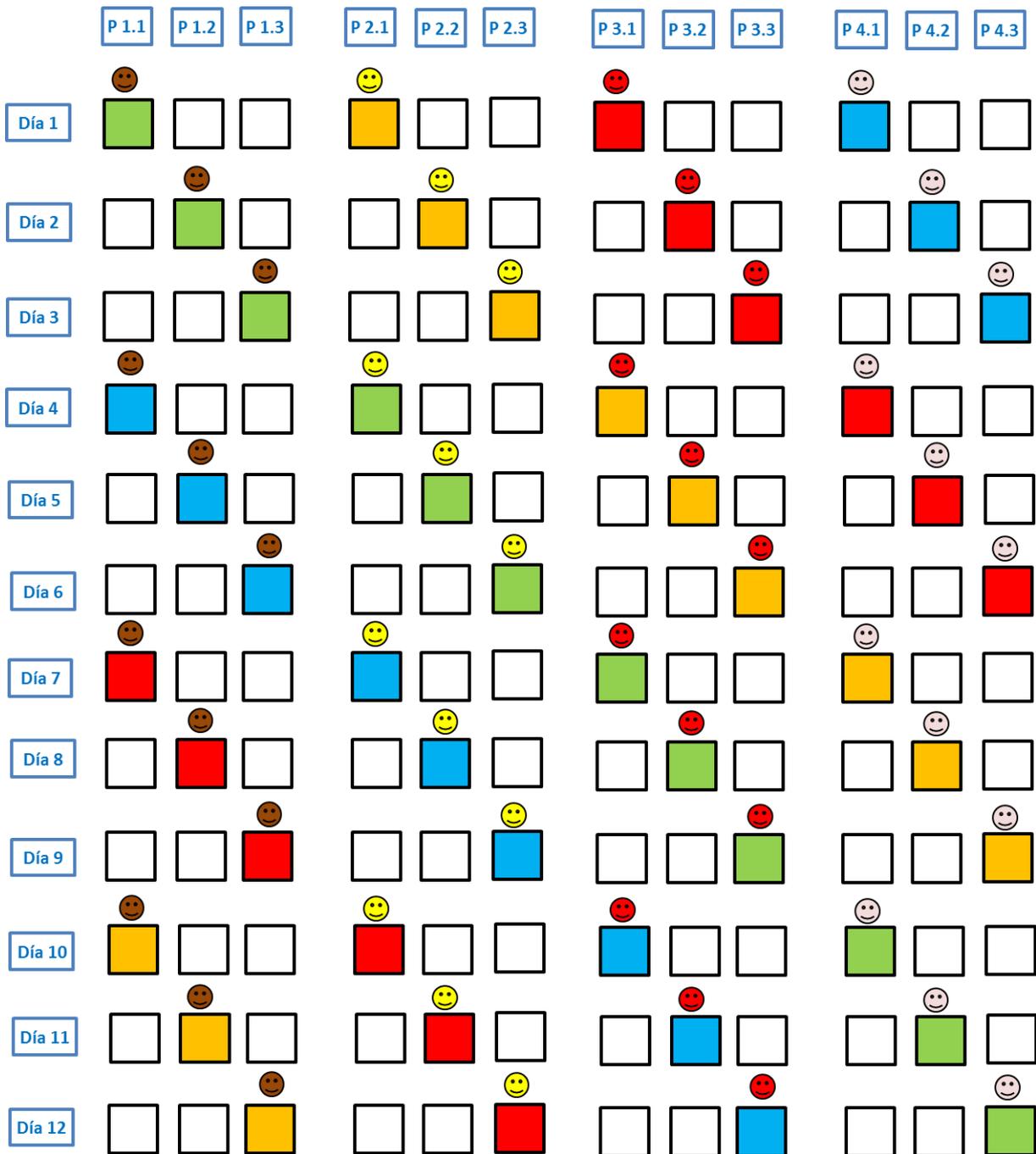


Figura 33: representación gráfica de la línea de posteriores

En este diagrama se observa de forma más clara como un mismo depósito (por ejemplo el representado en verde) pasa por todas las estaciones y es ensamblado por todos los operarios. Al igual que en el caso anterior, por simplicidad se han omitido las estaciones de sellante, que serán representadas una vez se equilibre la línea.

5.3. Equilibrado de la línea

Una vez diseñada la línea y definidas las estaciones, se va a proceder al equilibrado de la misma.

Como se explicó en el punto 5.2, nuestra línea de montaje tiene las siguientes características:

- Está compuesta por estaciones en serie.
- Todas las restricciones son de precedencia de tareas.
- Los tiempos son determinísticos e inferiores al tiempo de ciclo.
- La línea es síncrona con tasa de entrada fija.

Con estas características el problema se puede englobar dentro de los SALBP (problema simple de equilibrado de línea). Además, la demanda del cliente es conocida (y por tanto el Tack time fijo), y la línea es de nueva creación (hay libertad para diseñarla de forma que en cualquier estación se pueda realizar la tarea que se requiera), por lo que nuestro problema se engloba dentro de los SALBP-1, en los que el objetivo es minimizar el número de estaciones de la línea.

Según se comentó en el punto 5.1.4, los problemas de equilibrado de líneas SALBP-1 son los más simples y se pueden resolver tanto por métodos exactos como heurísticos. Los métodos exactos se utilizan para problemas con un número reducido de tareas, ya que cuando el número de variables y restricciones es muy elevado se hace inabordable en cuestión de tiempos de cálculo. Los métodos heurísticos se utilizarán para resolver esos casos.

Los procesos de fabricación de depósitos anteriores y posteriores tienen un número medio de tareas, por lo que se podrán resolver tanto por métodos heurísticos como por métodos exactos.

En primer lugar, se presentará el método heurístico de Helgeson y Birnie (Helgeson & Birnie, 1961) y se procederá a resolver mediante el mismo el problema de equilibrado de líneas tanto de anteriores como de posteriores. A continuación, se mostrará el método exacto de programación lineal binaria de William. W. White (White, 1961) y se volverá a resolver ambos problemas.

La finalidad será comparar los resultados proporcionados por ambos métodos, en primer lugar para comprobar que ante un problema con un número medio de variables los resultados aportados

por ambos son similares, y en segundo lugar para poder elegir el resultado que convenga más a la línea.

5.3.1. Resolución por heurística: método de Helgeson & Birnie.

Este procedimiento que fue propuesto por Helgeson & Birnie (Helgeson & Birnie, 1961), también llamado el método de los pesos posicionales, pretende establecer una prioridad para la asignación de tareas a partir de unos pesos o índices de prioridad. El peso definido por Helgeson & Birnie para una tarea i es la suma de su tiempo de operación más el tiempo de operación de todas sus sucesoras, se hablará de tiempo acumulado.

Para realizar el equilibrado tenemos que conocer el tiempo de operación de todas las tareas y las relaciones de precedencia entre las mismas, para a continuación calcular los pesos posicionales de cada tarea y organizarlas en forma descendente. El algoritmo consta de los siguientes pasos:

- Paso 1. Inicialización: Empezamos por la estación 1 y le asignamos como tiempo disponible el tiempo de ciclo ($C=TD$).
- Paso 2. Búsqueda de candidatos: Se establece una lista de candidatos, para la estación h en la que estemos, que cumplan las siguientes condiciones:
 - ✓ Condición 1: No haber sido asignada anteriormente.
 - ✓ Condición 2: Tener duración no superior al TD.
 - ✓ Condición 3: Que todos los trabajos precedentes hayan sido asignados con anterioridad.
- Paso 3. Test de cierre: Si no hay ninguna tarea que cumpla las condiciones del paso anterior ir al Paso 6.
- Paso 4. Asignación de tareas: Si hay una sola tarea candidata asignarla directamente, en caso contrario, asignar a la estación h la tarea i con mayor peso w_i , donde $w_i = t_i + \sum_{k \in D(i)} t_k$, es decir, el tiempo de la operación i más el tiempo de todas las operaciones que le siguen $D(i)$.

- Paso 5. Actualización: Reducir el TD en t_i unidades. Si TD se queda con un valor nulo pasar al Paso 6, en caso contrario, ir al Paso 2.
- Paso 6. Bucle: Si todas las tareas están asignadas es el final del algoritmo de asignación, en caso contrario pasar a la estación $h+1$ y darle de tiempo disponible el tiempo de ciclo e ir al Paso 2.

5.3.1.1. Resolución problema depósitos posteriores:

En la siguiente tabla se presentan las tareas necesarias para el montaje de un depósito posterior. Como se explicó previamente, las fases de sellante no se pueden desarrollar dentro de la línea de montaje, por lo que se les ha asignado un tiempo de tarea igual al tiempo de ciclo (480 minutos) para que en la resolución del problema sean asignadas íntegramente a la cabina de sellante.

Tabla 3: Tareas montaje depósito posterior

Tarea i	Descripción	Precedentes	Ti(min)
10	POSICIONAMIENTO DE LA CUADERNA FRONTERA EN GRADA	0	20,00
20	TALADRAR CUADERNA SOLDADA	0	46,01
30	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10, 20	19,00
40	TALADRADO DE CUADERNA FRONTERA SUP.	30	94,99
45	TALADRADO DE CUADERNA FRONTERA INF.	30	95,02
50	TALADRADO DE ALETAS HORIZONTALES	30	58,61
60	TALADRADO DE ALETA VERTICAL	30	43,79
70	TALADRADO PARA HOUSING	30	56,58
75	SACAR DEPÓSITO DE GRADA	40, 45, 50, 60, 70	16,00
80	TALADRADO DE TAPAS	0	124,29
90	TALADRAR BOCA LLENADO	75	85,71
100	TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	0	16,86
110	TALADRADO CUADERNA A2810404-001	75, 100	85,29
120	TALADRADO CUADERNA A2810403-001	75	103,86
130	TALADRADO CUADERNA A2810402-001	75	154,00
140	TALADRADO CUADERNA A2810401-003	75	95,69
150	TALADRADO PREVIO DE SOPORTES	75	33,70
160	TALADRADO DEFINITIVO DE SOPORTES	150	39,06
170	TALADRADO Y EQUIPADO DE TUBO SOBREPRESIÓN	160	74,32
180	TALADRADO DE RECEPTÁCULOS	75	44,43
190	TALADRADO DE VÁLVULA DE DRENAJE	75	36,53
200	TALADRADO DE DRENAJES	20	36,26
210	REMACHADO DE TUERCAS REMACHABLES CUADERNA SOLDADA	75, 200	82,33

220	REMACHADO DE STRAP A CUADERNA 401	140	35,44
230	REMACHADO DE STRAP A CUADERNAS 404	110	36,49
235	REMACHADO DE STRAP A CUADERNAS 403	120	34,40
240	REALIZAR ZONAS DE MASA	170, 180, 230	51,33
250	EMPASTADO 1ª FASE	130, 235, 240	240,00
260	REMACHADO CUADERNA A2810402-001	250	237,27
270	REMACHADO RECEPTÁCULOS A2810544-001	250	62,73
280	REMACHADO CUADERNA A2810403-001	250	80,28
290	REMACHADO CUADERNA A2810404-001	250	69,72
300	SELLANTE 1ª FASE	260, 270, 280, 290	480,00
310	REMACHAR TUBO EQUIPADO Y BARRA	300	70,77
320	REMACHAR SOPORTES	300	73,55
330	REMACHAR CUADERNA A2810401-003	220, 310, 320	237,77
340	REMACHAR VÁLVULA	190, 300	37,91
350	REMACHAR CUADERNA FRONTERA	330, 340	210,00
360	REMACHAR REFUERZO	90, 300	165,48
365	REMACHAR ADAPTADOR BOCA DE LLENADO	360	104,52
370	FIJAR CONJUNTO EN GRADA	350	33,00
380	TALADRAR CUADERNA	370	31,68
390	TALADRAR PUNTOS DE FIJACIÓN	370	24,40
400	TALADRADO PREVIO DE HOUSING Y ALETAS	380, 390	127,45
410	TALADRADO DEFINITIVO DE ALETA VERTICAL	400	62,20
420	TALADRADO DEFINITIVO DE ALETAS HORIZONTALES	400	77,73
430	TALADRADO DEFINITIVO DE HOUSING	400	95,97
440	TALADRAR RECEPTORES	400	27,56
450	SITUAR HOUSING PROVISIONAL	410, 420, 430, 440	18,00
460	SITUAR CARTELA 441 Y ANGULAR 444 Y TALADRAR	450	33,81
470	FIJAR ÚTIL MTAX-01-A2810507-931	450	25,00
480	SITUAR CARTELAS 442 Y 768, ANGULARES 454 Y 770 Y DIAFRAGMA 451 Y TALADRAR	470	38,76
490	SITUAR TAPAS 478 Y 479 Y TALADRAR CONJUNTO	460, 480	94,26
500	TALADRAR ANGULARES 444, 770, 454, CARTELA 768 Y DIAFRAGMA 451	460, 480	46,01
510	SITUAR HERRAJE A2812112-401 Y TALADRAR	460, 480	25,86
520	INSTALAR SOPORTES Y PROTECTORES	500, 510	44,00
530	REMACHAR ANGULARES	490, 500, 510	54,67
540	INSTALAR HOUSING	530	37,79
550	MONTAR MAZO Y REMACHAR HERRAJE	520, 540	29,93
560	REMACHADO DE CARTELA 768	520, 540	31,90
580	AVELLANADO PILÓN	490	236,38
590	REMACHADO DIAFRAGMA	520, 540	36,78
600	REMACHADO DE CARTELAS	550, 560, 580, 590	206,83
620	PROTEGER ENCAPSULADO Y CORDÓN	600	19,00
630	SITUAR TAPAS Y REMACHAR	620	179,52
640	EQUIPAR ALETA VERTICAL	630	34,00
650	TALADRAR ALETA VERTICAL	630	58,30

660	MONTAR STRAP Y ALETA VERTICAL	640, 650	84,49
670	MONTAR ALETAS HORIZONTALES	630	75,79
680	FORMAR E INSTALAR VÁLVULA DE SOBREPRESIÓN	630	28,90
690	SELLANTE 2ª FASE	210, 365, 660, 670, 680	480,00
700	INSTALAR AFORADORES 0237KTU1	690	54,14
710	INSTALAR BRIDA Y CONECTAR MAZO A2812523-403	690	44,36
720	INSTALAR MAZO A2812525-403	690	34,57
730	EQUIPAR E INSTALAR TUBO A2811825-401	690	69,14
740	INSTALAR VÁLVULA DE DRENAJE JN0313-1	690	19,89
750	MONTAR BRIDA SOBRE SOPORTE A2811864-001	690	17,89
760	PRUEBAS	700, 710, 720, 730, 740, 750	240,00

Como ya se ha calculado antes, el tiempo de ciclo es de 8 horas, que computado en minutos son 480 minutos¹¹. A partir de la columna de precedencias se construye el siguiente grafo:

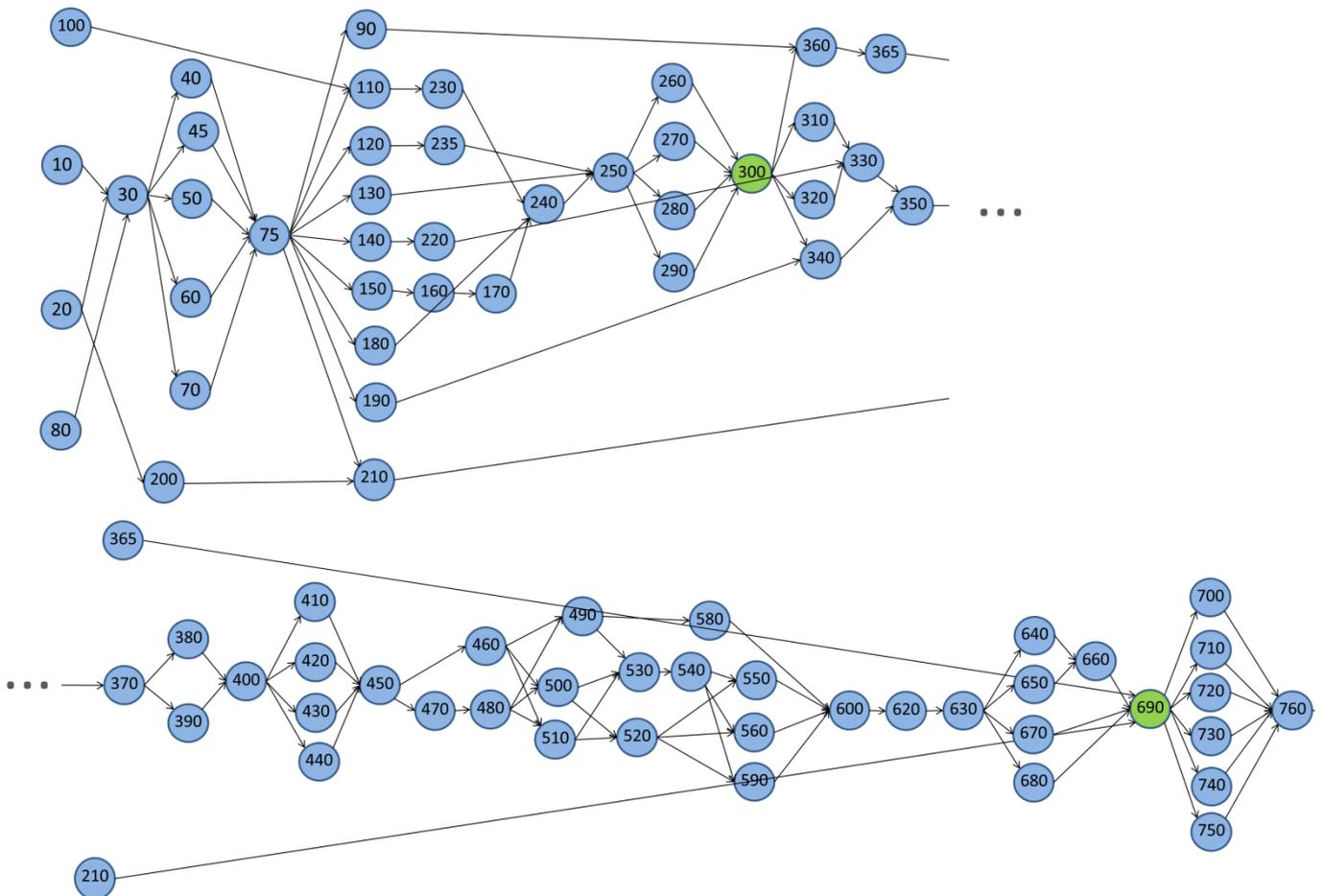


Figura 34: Grafo de precedencia de tareas en depósitos posteriores

¹¹ Es habitual en la literatura encontrar este tipo de problemas con los tiempos dados en segundos. En este proyecto, por ser las tareas de bastante duración, se ha optado por utilizar los minutos para que los valores fueran más inteligibles.

También se construye la siguiente tabla, en la que aparecen los pesos o tiempos acumulados tras cada tarea. El tiempo acumulado se calcula como la suma del tiempo de todas las tareas sucesoras y el de la propia tarea. La tabla se presenta según los pesos ordenados de mayor a menor.

Tabla 4: Tareas montaje depósito posterior ordenadas por pesos.

Tarea i	Descripción	Precedentes	Ti(min)	acumulado
80	TALADRADO DE TAPAS	0	124,29	5970,87
20	TALADRAR CUADERNA SOLDADA	0	46,01	5928,86
10	POSICIONAMIENTO DE LA CUADERNA FRONTERA EN GRADA	0	20,00	5866,58
30	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10, 20, 80	19,00	5846,58
45	TALADRADO DE CUADERNA FRONTERA INF.	30	95,02	5573,61
40	TALADRADO DE CUADERNA FRONTERA SUP.	30	94,99	5573,58
50	TALADRADO DE ALETAS HORIZONTALES	30	58,61	5537,21
70	TALADRADO PARA HOUSING	30	56,58	5535,17
60	TALADRADO DE ALETA VERTICAL	30	43,79	5522,38
75	SACAR DEPÓSITO DE GRADA	40, 50, 60, 70	16,00	5478,59
150	TALADRADO PREVIO DE SOPORTES	75	33,70	4668,42
100	TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	0	16,86	4659,97
110	TALADRADO CUADERNA A2810404-001	75, 100	85,29	4643,11
160	TALADRADO DEFINITIVO DE SOPORTES	150	39,06	4634,72
130	TALADRADO CUADERNA A2810402-001	75	154,00	4624,00
120	TALADRADO CUADERNA A2810403-001	75	103,86	4608,25
170	TALADRADO Y EQUIPADO DE TUBO SOBREPRESIÓN	160	74,32	4595,66
180	TALADRADO DE RECEPTÁCULOS	75	44,43	4565,76
230	REMACHADO DE STRAP A CUADERNAS 404	110	36,49	4557,83
240	REALIZAR ZONAS DE MASA	170, 180, 230	51,33	4521,33
235	REMACHADO DE STRAP A CUADERNAS 403	120	34,40	4504,40
250	EMPASTADO 1ª FASE	130, 235, 240	240,00	4470,00
260	REMACHADO CUADERNA A2810402-001	250	237,27	4017,27
280	REMACHADO CUADERNA A2810403-001	250	80,28	3860,28
290	REMACHADO CUADERNA A2810404-001	250	69,72	3849,72
270	REMACHADO RECEPTÁCULOS A2810544-001	250	62,73	3842,73
300	SELLANTE 1ª FASE	260, 270, 280, 290	480,00	3780,00
140	TALADRADO CUADERNA A2810401-003	75	95,69	3458,91
320	REMACHAR SOPORTES	300	73,55	3401,32
310	REMACHAR TUBO EQUIPADO Y BARRA	300	70,77	3398,54
220	REMACHADO DE STRAP A CUADERNA 401	140	35,44	3363,22
330	REMACHAR CUADERNA A2810401-003	220, 310, 320	237,77	3327,77
190	TALADRADO DE VÁLVULA DE DRENAJE	75	36,53	3164,44
340	REMACHAR VÁLVULA	190, 300	37,91	3127,91
350	REMACHAR CUADERNA FRONTERA	330, 340	210,00	3090,00
370	FIJAR CONJUNTO EN GRADA	350	33,00	2880,00
380	TALADRAR CUADERNA	370	31,68	2822,60

390	TALADRAR PUNTOS DE FIJACIÓN	370	24,40	2815,32
400	TALADRADO PREVIO DE HOUSING Y ALETAS	380, 390	127,45	2790,92
430	TALADRADO DEFINITIVO DE HOUSING	400	95,97	2495,97
420	TALADRADO DEFINITIVO DE ALETAS HORIZONTALES	400	77,73	2477,73
410	TALADRADO DEFINITIVO DE ALETA VERTICAL	400	62,20	2462,20
440	TALADRAR RECEPTORES	400	27,56	2427,56
450	SITUAR HOUSING PROVISIONAL	410, 420, 430, 440	18,00	2400,00
470	FIJAR ÚTIL MTAX-01-A2810507-931	450	25,00	2348,19
480	SITUAR CARTELAS 442 Y 768, ANGULARES 454 Y 770 Y DIAFRAGMA 451 Y TALADRAR	470	38,76	2323,19
460	SITUAR CARTELA 441 Y ANGULAR 444 Y TALADRAR	450	33,81	2318,24
490	SITUAR TAPAS 478 Y 479 Y TALADRAR CONJUNTO	460, 480	94,26	2168,55
500	TALADRAR ANGULARES 444, 770, 454, CARTELA 768 Y DIAFRAGMA 451	460, 480	46,01	1927,93
510	SITUAR HERRAJE A2812112-401 Y TALADRAR	460, 480	25,86	1907,78
580	AVELLANADO PILÓN	570	236,38	1883,22
530	REMACHAR ANGULARES	500, 510	54,67	1837,92
520	INSTALAR SOPORTES Y PROTECTORES	500, 510	44,00	1789,45
540	INSTALAR HOUSING	530	37,79	1783,24
590	REMACHADO DIAFRAGMA	570	36,78	1683,62
560	REMACHADO DE CARTELA 768	520, 540	31,90	1678,73
550	MONTAR MAZO Y REMACHAR HERRAJE	520, 540	29,93	1676,77
600	REMACHADO DE CARTELAS	550, 560, 580, 590	206,83	1646,83
620	PROTEGER ENCAPSULADO Y CORDÓN	610	19,00	1440,00
630	SITUAR TAPAS Y REMACHAR	620	179,52	1421,00
90	TALADRAR BOCA LLENADO	75	85,71	1315,71
360	REMACHAR REFUERZO	90, 300	165,48	1230,00
650	TALADRAR ALETA VERTICAL	630	58,30	1102,79
200	TALADRADO DE DRENAJES	20	36,26	1078,60
640	EQUIPAR ALETA VERTICAL	630	34,00	1078,49
365	REMACHAR ADAPTADOR BOCA DE LLENADO	360	104,52	1064,52
660	MONTAR STRAP Y ALETA VERTICAL	640, 650	84,49	1044,49
210	REMACHADO DE TUERCAS REMACHABLES CUADERNA SOLDADA	75, 200	82,33	1042,33
670	MONTAR ALETAS HORIZONTALES	630	75,79	1035,79
680	FORMAR E INSTALAR VÁLVULA DE SOBREPRESIÓN	630	28,90	988,90
690	SELLANTE 2ª FASE	210, 365, 660, 670, 680	480,00	960,00
730	EQUIPAR E INSTALAR TUBO A2811825-401	690	69,14	309,14
700	INSTALAR AFORADORES 0237KTU1	690	54,14	294,14
710	INSTALAR BRIDA Y CONECTAR MAZO A2812523-403	690	44,36	284,36
720	INSTALAR MAZO A2812525-403	690	34,57	274,57
740	INSTALAR VÁLVULA DE DRENAJE JN0313-1	690	19,89	259,89
750	MONTAR BRIDA SOBRE SOPORTE A2811864-001	690	17,89	257,89
760	PRUEBAS	700, 710, 720, 730, 740, 750	240,00	240,00

Paso 1: se comienza abriendo la primera estación y asignándole un tiempo disponible de 480 minutos.

Tabla 5: estación 1

Estación	Tarea i	Ti	T.D.=480
1			

Paso 2: se buscan candidatos que cumplan las condiciones de no haber sido asignados anteriormente, tener una duración no superior al tiempo de ciclo, y que todos sus precedentes hayan sido asignados. Observando el diagrama de precedencias se obtienen los siguientes candidatos:

Tabla 6: candidatos

Descripción	Tarea i	Precedencia	T _i	T. acumulado
POSICIONAMIENTO DE LA CUADERNA FRONTERA EN GRADA	10	0	20,00	5866,58
TALADRAR CUADERNA SOLDADA	20	0	46,01	5928,86
TALADRADO DE TAPAS	80	0	124,29	5970,87
TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	100	0	16,86	4659,97

Paso 3: hay tareas candidatas a ser asignadas, por lo que se pasa al paso 4.

Paso 4: se asigna la tarea con mayor tiempo acumulado. En este caso será la tarea 80.

Tabla 7: estación 1

Estación	Tarea i	Ti	T.D.=480-124,29
1	80	124,29	355,71

Paso 5: en la columna de la derecha aparece el tiempo disponible de la estación, que se calcula de restar el tiempo de la tarea al tiempo de ciclo. Como todavía queda tiempo disponible en la estación se vuelve al paso 2.

Paso 2: búsqueda de nuevos candidatos que cumplan las condiciones dadas. Se obtienen los siguientes:

Tabla 8: candidatos

Descripción	Tarea i	Precedencia	T _i	T. acumulado
POSICIONAMIENTO DE LA CUADERNA FRONTERA EN GRADA	10	0	20,00	5866,58
TALADRAR CUADERNA SOLDADA	20	0	46,01	5928,86
TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	100	0	16,86	4659,97

Paso 4: Se asigna la tarea 20 por ser la de mayor peso.

Tabla 9: estación 1

Estación	Tarea i	T _i	T.D.
1	80	124,29	355,71
1	20	46,01	309,71

Paso 5: en la columna de la derecha se actualiza el tiempo disponible.

Paso 2: candidatos a ser asignados.

Tabla 10: candidatos

Descripción	Tarea i	Precedencia	T _i	T. acumulado
POSICIONAMIENTO DE LA CUADERNA FRONTERA EN GRADA	10	0	20,00	5866,58
TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	100	0	16,86	4659,97
TALADRADO DE DRENAJES	200	20	36,26	1078,60

Paso 4: se asigna la tarea 10.

Paso 5: se actualiza el tiempo disponible.

Tabla 11: estación 1

Estación	Tarea i	T _i	T.D.
1	80	124,29	355,71

1	20	46,01	309,71
1	10	20,00	289,71

Paso 2: candidatos a ser asignados.

Tabla 12: candidatos

Descripción	Tarea i	Precedencia	T _i	T. acumulado
TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	100	0	16,86	4659,97
TALADRADO DE DRENAJES	200	20	36,26	1078,60
SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	30	10, 20	19,00	5846,58

Paso 4: se asigna la tarea 30.

Paso 5: se actualiza el tiempo disponible.

Tabla 13: estación 1

Estación	Tarea i	T _i	T.D.
1	80	124,29	355,71
1	20	46,01	309,71
1	10	20,00	289,71
1	30	19,00	270,71

Paso 2: candidatos a ser asignados.

Tabla 14: candidatos

Descripción	Tarea i	Precedencia	T _i	T. acumulado
TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	100	0	16,86	4179,97
TALADRADO DE DRENAJES	200	20	36,26	598,60
TALADRADO DE CUADERNA FRONTERA SUP.	40	30	94,99	5573,58
TALADRADO DE CUADERNA FRONTERA INF.	45	30	95,02	5573,61
TALADRADO DE ALETAS HORIZONTALES	50	30	58,61	5537,21
TALADRADO DE ALETA VERTICAL	60	30	43,79	5522,38
TALADRADO PARA HOUSING	70	30	56,58	5535,17

Paso 4: se asigna la tarea 40.

Paso 5: se actualiza el tiempo disponible.

Tabla 15: estación 1

Estación	Tarea i	Ti	T.D.
1	80	124,29	355,71
1	20	46,01	309,71
1	10	20,00	289,71
1	30	19,00	270,71
1	40	94,99	175,71

Paso 2: candidatos a ser asignados.

Tabla 16: candidatos

Descripción	Tarea i	Precedencia	T _i	T. acumulado
TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	100	0	16,86	4179,97
TALADRADO DE DRENAJES	200	20	36,26	598,60
TALADRADO DE CUADERNA FRONTERA INF.	45	30	95,02	5573,61
TALADRADO DE ALETAS HORIZONTALES	50	30	58,61	5537,21
TALADRADO DE ALETA VERTICAL	60	30	43,79	5522,38
TALADRADO PARA HOUSING	70	30	56,58	5535,17

Paso 4: se asigna la tarea 45.

Paso 5: se actualiza el tiempo disponible.

Tabla 17: estación 1

Estación	Tarea i	Ti	T.D.
1	80	124,29	355,71
1	20	46,01	309,71
1	10	20,00	289,71
1	30	19,00	270,71
1	40	94,99	175,71
1	45	95,02	80,70

Paso 2: candidatos a ser asignados.

Tabla 18: candidatos

Descripción	Tarea i	Precedencia	T _i	T. acumulado
TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	100	0	16,86	4179,97
TALADRADO DE DRENAJES	200	20	36,26	598,60
TALADRADO DE ALETAS HORIZONTALES	50	30	58,61	5537,21
TALADRADO DE ALETA VERTICAL	60	30	43,79	5522,38
TALADRADO PARA HOUSING	70	30	56,58	5535,17

Paso 4: se asigna la tarea 50.

Paso 5: se actualiza el tiempo disponible.

Tabla 19: estación 1

Estación	Tarea i	T _i	T.D.
1	80	124,29	355,71
1	20	46,01	309,71
1	10	20,00	289,71
1	30	19,00	270,71
1	40	94,99	175,71
1	45	95,02	80,70
1	50	58,61	22,08

Paso 2: candidatos a ser asignados. Como se observa en la siguiente tabla, las tareas que cumplen no haber sido asignadas previamente y cuyas tareas precedentes sí lo hayan sido serían las tareas 100, 200, 60 y 70, siendo la de mayor tiempo acumulado la tarea 70. En este caso, no cumplirían la condición de tener un tiempo inferior al tiempo disponible, por lo que la única tarea candidata sería la 100.

Tabla 20: candidatos

Descripción	Tarea i	Precedencia	T _i	T. acumulado
TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	100	0	16,86	4179,97
TALADRADO DE DRENAJES	200	20	36,26	598,60
TALADRADO DE ALETA VERTICAL	60	30	43,79	5522,38

TALADRADO PARA HOUSING	70	30	56,58	5535,17
------------------------	----	----	-------	---------

Paso 4: se asigna la tarea 100.

Paso 5: se actualiza el tiempo disponible.

Tabla 21: estación 1

Estación	Tarea i	Ti	T.D.
1	80	124,29	355,71
	20	46,01	309,71
	10	20,00	289,71
	30	19,00	270,71
	40	94,99	175,71
	45	95,02	80,70
	50	58,61	22,08
	100	16,86	5,23

Paso 2: candidatos a ser asignados. Como no hay ningún candidato cuyo tiempo sea inferior al tiempo disponible se pasa al paso 3.

Paso 3: test de cierre. No hay ninguna tarea que cumpla las condiciones del paso 2, por lo que se pasa al paso 6.

Paso 6: bucle. Como no están todas las tareas asignadas, se abre una nueva estación con tiempo disponible de 480 minutos y se pasa al paso 2.

Paso 2: candidatos a ser asignados.

Tabla 22: candidatos

Descripción	Tarea i	Precedencia	T _i	T. acumulado
TALADRADO DE DRENAJES	200	20	36,26	598,60
TALADRADO DE ALETA VERTICAL	60	30	43,79	5522,38
TALADRADO PARA HOUSING	70	30	56,58	5535,17

Paso 4: se asigna la tarea 70.

Paso 5: se actualiza el tiempo disponible.

Tabla 23: estación 2

Estación	Tarea i	Ti	T.D.
1	80	124,29	355,71
	20	46,01	309,71
	10	20,00	289,71
	30	19,00	270,71
	40	94,99	175,71
	45	95,02	80,70
	50	58,61	22,08
	100	16,86	5,23
2	70	56,58	423,42

Paso 2: candidatos a ser asignados.

Tabla 24: candidatos

Descripción	Tarea i	Precedencia	T _i	T. acumulado
TALADRADO DE DRENAJES	200	20	36,26	598,60
TALADRADO DE ALETA VERTICAL	60	30	43,79	5042,38

Paso 4: se asigna la tarea 60.

Paso 5: se actualiza el tiempo disponible.

Tabla 25: estación 2

Estación	Tarea i	Ti	T.D.
1	80	124,29	355,71
	20	46,01	309,71
	10	20,00	289,71
	30	19,00	270,71
	40	94,99	175,71
	45	95,02	80,70
	50	58,61	22,08
	100	16,86	5,23
2	70	56,58	423,42
	60	43,79	379,63

Continuando de esta forma con cada uno de los 6 pasos se llega al siguiente resultado:

Tabla 26: Resultado equilibrado depósitos posteriores.

Estación	Tarea i	Ti	T.D.
1	80	124,29	355,71
	20	46,01	309,71
	10	20,00	289,71
	30	19,00	270,71
	40	94,99	175,71
	45	95,02	80,70
	50	58,61	22,08
	100	16,86	5,23
2	70	56,58	423,42
	60	43,79	379,63
	75	16,00	363,63
	150	33,70	329,93
	110	85,29	244,64
	160	39,06	205,58
	130	154,00	51,58
3	120	103,86	376,14
	170	74,32	301,82
	230	36,49	265,32
	180	44,43	220,90
	240	51,33	169,56
	235	34,40	135,17
	140	95,69	39,48
	220	35,44	4,03
4	250	240,00	240,00
	260	237,27	2,73
5	280	80,28	399,72
	290	69,72	330,00
	270	62,73	267,27
	190	36,53	230,74
	90	85,71	145,02
	200	36,26	108,76
	210	82,33	26,42
SELLANTE 1ª FASE			
6	320	73,55	406,45
	310	70,77	335,68
	330	237,77	97,91
	340	37,91	60,00
7	350	210,00	270,00

	360	165,48	104,52
	365	104,52	0,00
8	370	33,00	447,00
	380	31,68	415,32
	390	24,40	390,92
	400	127,45	263,46
	430	95,97	167,49
	420	77,73	89,77
	410	62,20	27,56
	440	27,56	0,00
9	450	18,00	462,00
	470	25,00	437,00
	480	38,76	398,24
	460	33,81	364,43
	490	94,26	270,17
	500	46,01	224,16
	510	25,86	198,30
	530	54,67	143,62
	520	44,00	99,62
	540	37,79	61,83
	560	31,90	29,93
10	580	236,38	243,62
	590	36,78	206,83
	600	206,83	0,00
11	620	19,00	461,00
	630	179,52	281,48
	650	58,30	223,18
	640	34,00	189,18
	660	84,49	104,69
	670	75,79	28,90
	680	28,90	0,00
SELLANTE 2ª FASE			
12	730	69,14	410,86
	700	54,14	356,71
	710	44,36	312,36
	720	34,57	277,79
	740	19,89	257,89
	750	17,89	240,00
	760	240,00	0,00

Como se puede observar, el problema da como resultado una línea con 12 estaciones de trabajo con un tiempo de ciclo de 480 minutos en cada una (8 horas). Las fases de sellante se realizarán entre las estaciones 5 y 6, y 11 y 12.

5.3.1.2. Resolución problema depósitos anteriores:

En la siguiente tabla se presentan las tareas necesarias para el montaje de un depósito anterior. De igual forma que para los posteriores, las fases de sellante no se pueden desarrollar dentro de la línea de montaje, por lo que se les ha asignado un tiempo de tarea igual al tiempo de ciclo (480 minutos) para que en la resolución del problema sean asignadas íntegramente a la cabina de sellante.

Tabla 27: Tareas montaje depósito anterior

Tarea i	Descripción	Precedentes	Ti(min)
10	SITUAR CUADERNA FRONTERA	0	20,00
20	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10	19,00
30	TALADRADO CUADERNA SOLDADA	20	42,25
40	TALADRADO CUADERNA FRONTERA	20	187,55
50	TALADRADO CUADERNAS 526, 527 Y 528	30, 40	173,25
60	TALADRADO VÁLVULA DE DRENAJE	50	36,40
70	TALADRADO DE SOPORTES	0	56,77
80	TALADRADO REFUERZO BOCA LLENADO	0	85,71
90	TALADRADO TUERCAS REMACHABLES EN CUADERNA SOLDADA	30, 40	54,36
100	TALADRADO PERFILES BOTA	30, 40	76,42
110	TALADRADO TAPAS	20	124,29
120	REMACHADO DE TUERCAS EN CUADERNA SOLDADA	90	155,87
130	REMACHADO DE STRAP	60	56,68
140	REMACHADO DE CUADERNAS	130	265,06
150	SELLADO 1ª FASE	120, 140	480,00
160	REMACHADO CUADERNA FRONTERA	150	310,00
170	REMACHADO DE SOPORTES Y VÁLVULA DRENAJE	70, 150	176,28
180	REMACHADO PERFILES DE BOTA	160	123,19
190	REMACHADO REFUERZO BOCA LLENADO	80, 150	207,83
200	PEGAR SOPORTES Y CONECTAR MAZO	170, 180, 190	40,70
210	SELLADO 2ª FASE	200	480,00
220	EQUIPADO	210	143,40
230	PRUEBAS	220	303,60

De nuevo, el tiempo de ciclo es de 480 minutos. A partir de la columna de precedencias se construye el siguiente grafo.

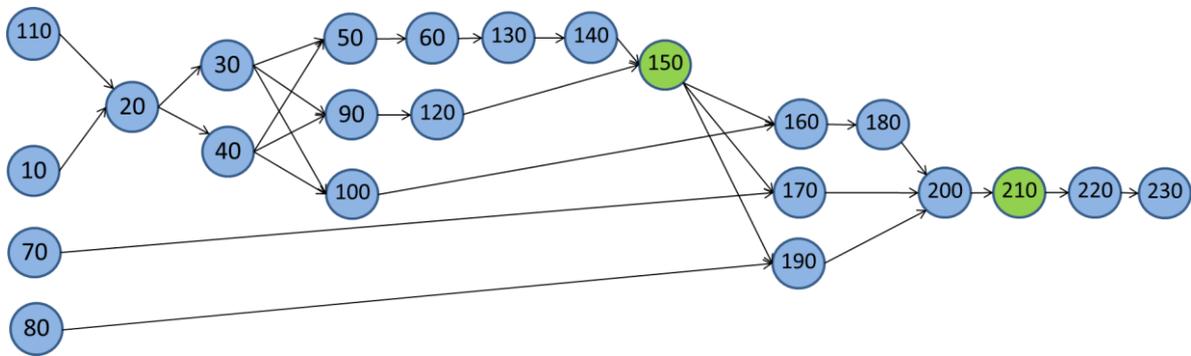


Figura 35: grafo de precedencias depósito anterior

También se construye la siguiente Tabla 28, en la que aparecen los pesos o tiempos acumulados tras cada tarea. El tiempo acumulado se calcula como la suma del tiempo de todas las tareas sucesoras y el de la propia tarea. La tabla se presenta según los pesos ordenados de mayor a menor.

Tabla 28: Tareas montaje depósito anterior ordenadas por pesos

Tarea i	Descripción	Precedentes	Ti(min)	Acumulado
110	TALADRADO TAPAS	20	124,29	3456,12
10	SITUAR CUADERNA FRONTERA	0	20,00	3351,83
20	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10	19,00	3331,83
40	TALADRADO CUADERNA FRONTERA	20	187,55	3270,58
30	TALADRADO CUADERNA SOLDADA	20	42,25	3125,29
50	TALADRADO CUADERNAS 526, 527 Y 528	30, 40	173,25	2796,39
60	TALADRADO VÁLVULA DE DRENAJE	50	36,40	2623,14
130	REMACHADO DE STRAP	60	56,68	2586,73
140	REMACHADO DE CUADERNAS	130	265,06	2530,06
90	TALADRADO TUERCAS REMACHABLES EN CUADERNA SOLDADA	30, 40	54,36	2475,23
120	REMACHADO DE TUERCAS EN CUADERNA SOLDADA	90	155,87	2420,87
150	SELLADO 1ª FASE	120, 140	480,00	2265,00
100	TALADRADO PERFILES BOTA	30, 40	76,42	1477,30
160	REMACHADO CUADERNA FRONTERA	150	310,00	1400,89
80	TALADRADO REFUERZO BOCA LLENADO	0	85,71	1261,24
70	TALADRADO DE SOPORTES	0	56,77	1200,75
190	REMACHADO REFUERZO BOCA LLENADO	80, 150	207,83	1175,53

170	REMACHADO DE SOPORTES Y VÁLVULA DRENAJE	70, 150	176,28	1143,98
180	REMACHADO PERFILES DE BOTA	160	123,19	1090,89
200	PEGAR SOPORTES Y CONECTAR MAZO	170, 180, 190	40,70	967,70
210	SELLADO 2ª FASE	200	480,00	927,00
220	EQUIPADO	210	143,40	447,00
230	PRUEBAS	220	303,60	303,60

Aplicando los 6 pasos del método de Helgeson y Birnie, al igual que con los depósitos posteriores, llegamos al siguiente resultado:

Tabla 29: resultado equilibrado depósitos anteriores

Estación	Tarea i	Ti	T.C.=480
1	110	124,29	355,71
	10	20,00	335,71
	20	19,00	316,71
	40	187,55	129,16
	30	42,25	86,91
	90	54,36	32,55
2	50	173,25	306,75
	60	36,40	270,34
	130	56,68	213,67
	120	155,87	57,80
	70	56,77	1,03
3	140	265,06	214,94
	100	76,42	138,53
	80	85,71	52,82
SELLADO 1ª FASE			
4	160	310,00	170,00
	180	123,19	46,81
5	190	207,83	272,17
	170	176,28	95,89
	200	40,70	55,19
SELLADO 2ª FASE			
6	220	143,40	336,60
	230	303,60	33,00

El problema da como resultado una línea con 12 estaciones de trabajo con un tiempo de ciclo de 480 minutos en cada una (8 horas). Las fases de sellante se realizarán entre las estaciones 3 y 4, y 5 y 6.

5.3.2. Resolución por algoritmo exacto: modelo de William W. White

El modelo de White (White, 1961) fue una de las primeras modelizaciones de problemas tipo SALBP-1 con programación lineal binaria, y ha sido usado como referencia por muchos autores más tarde.

El modelo es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{Nmax} w_k * x_{ik} \\
 & \sum_{k=1}^{Nmax} x_{ik} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \\
 & \sum_{i=1}^n t_i * x_{ik} \leq c \quad \forall k = 1, \dots, Nmax \\
 & x_{il} \leq \sum_{k=1}^l x_{hk} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall l = 1, \dots, Nmax \quad h \in P_i \\
 & x_{ik} \in \{0,1\}
 \end{aligned}$$

Donde:

Nmax es el número máximo de estaciones que se considerarán en el modelo.

n es el número de tareas a asignar.

k es el subíndice que indica el número de la estación de trabajo.

i es el subíndice que indica el número de la tarea.

c es el tiempo de ciclo de cada estación

P_i refiere al conjunto de predecesores de una tarea i.

t_i es el tiempo de duración de la tarea i.

w_k es el coeficiente de penalización de abrir una estación adicional. Sirve para garantizar que la estación $k+1$ sólo se utilice si con las estaciones de la 1 a la k no ha sido posible asignar todas las tareas. Se define el coeficiente como $M * w_k \leq w_{k+1}$, siendo M un número lo suficientemente grande.

La función objetivo minimiza el sobrecoste de asignar tareas a un número de puestos de trabajo mayor del teóricamente necesario.

La primera restricción obliga a que cada tarea sea asignada a una sola estación una única vez.

La segunda restricción obliga a que la suma de los tiempos de duración de las tareas asignadas a una estación sea menor que el tiempo de ciclo.

La tercera restricción obliga a que se cumplan las relaciones de precedencia entre tareas.

La cuarta restricción implica que la variable x_{ik} sea binaria.

5.3.2.1. Resolución del problema de depósitos anteriores

Los datos del problema vuelven a ser los siguientes:

Tabla 30: tareas montaje depósito anterior.

Tarea i	Descripción	Precedentes	Ti(min)
10	SITUAR CUADERNA FRONTERA	0	20,00
20	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10	19,00
30	TALADRADO CUADERNA SOLDADA	20	42,25
40	TALADRADO CUADERNA FRONTERA	20	187,55
50	TALADRADO CUADERNAS 526, 527 Y 528	30, 40	173,25
60	TALADRADO VÁLVULA DE DRENAJE	50	36,40
70	TALADRADO DE SOPORTES	0	56,77
80	TALADRADO REFUERZO BOCA LLENADO	0	85,71
90	TALADRADO TUERCAS REMACHABLES EN CUADERNA SOLDADA	30, 40	54,36
100	TALADRADO PERFILES BOTA	30, 40	76,42
110	TALADRADO TAPAS	20	124,29
120	REMACHADO DE TUERCAS EN CUADERNA SOLDADA	90	155,87
130	REMACHADO DE STRAP	60	56,68
140	REMACHADO DE CUADERNAS	130	265,06
150	SELLADO 1ª FASE	120, 140	480,00
160	REMACHADO CUADERNA FRONTERA	150	310,00
170	REMACHADO DE SOPORTES Y VÁLVULA DRENAJE	70, 150	176,28
180	REMACHADO PERFILES DE BOTA	160	123,19

190	REMACHADO REFUERZO BOCA LLENADO	80, 150	207,83
200	PEGAR SOPORTES Y CONECTAR MAZO	170, 180, 190	40,70
210	SELLADO 2ª FASE	200	480,00
220	EQUIPADO	210	143,40
230	PRUEBAS	220	303,60

De nuevo, el tiempo de ciclo es de 480 minutos. Con estos datos se representa el gráfico de precedencias:

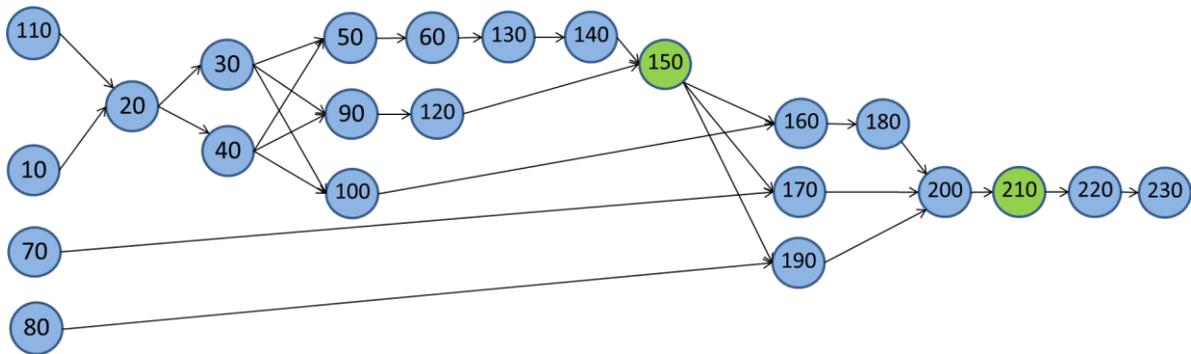


Figura 36: grafo de precedencia de tareas en depósitos anteriores

Las variables del problema son del tipo binarias y de la forma x_{ik} = Tarea i asignada a la estación k , donde $i=10, 20, 30, \dots, 230$ y $k=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$. Por tanto, el problema constará de 184 variables. En este caso, se ha escogido $N_{max}=8$ debido a que es el número de estaciones obtenido por el método de Helgeson & Birnie, considerando las dos fases de sellante como estaciones. Al haber asignado un tiempo $T_i=480$ a las dos fases de sellante, nos aseguramos que al resolver el problema el algoritmo asignará cada una de ellas a una sola estación.

Se plantea la función objetivo, a la cual se le añade un peso de la forma $M \cdot w_k \leq w_{k+1}$, donde M es un número lo suficientemente grande. En este caso se escogerá $M=10$, por lo que los pesos a cada estación serán 1, 10, 100, 1000, 10000, 100000, 1000000, 10000000 respectivamente. De esta manera se consigue que la estación de trabajo 1 tenga preferencia a la 2, y la 2 a la 3, y así sucesivamente.

$$F.O. = 1X_{10,1} + 10X_{10,2} + 100X_{10,3} + 1000X_{10,4} + 10000X_{10,5} + 100000X_{10,6} + 1000000X_{10,7} + 10000000X_{10,8} + 1X_{20,1} + 10X_{20,2} + 100X_{20,3} + 1000X_{20,4} + 10000X_{20,5} + 100000X_{20,6} +$$

$$1000000X_{20,7} + 1000000X_{20,8} + \dots + 1X_{230,1} + 10X_{230,2} + 100X_{230,3} + 1000X_{230,4} + 10000X_{230,5} + 100000X_{230,6} + 1000000X_{230,7} + 1000000X_{230,8}$$

Se plantean las restricciones de asignación unitaria:

$$X_{101} + X_{102} + X_{103} + X_{104} + X_{105} + X_{106} + X_{107} + X_{108} = 1$$

$$X_{201} + X_{202} + X_{203} + X_{204} + X_{205} + X_{206} + X_{207} + X_{208} = 1$$

...

$$X_{2301} + X_{2302} + X_{2303} + X_{2304} + X_{2305} + X_{2306} + X_{2307} + X_{2308} = 1$$

A continuación las restricciones de tiempo de ciclo:

$$20X_{101} + 19X_{201} + 42,25X_{301} + 187,55X_{401} + 173,25X_{501} + 36,4X_{601} + 56,77X_{701} + 85,71X_{801} + 54,36X_{901} + 76,42X_{1001} + 124,29X_{1101} + 155,87X_{1201} + 56,68X_{1301} + 265,06X_{1401} + 480X_{1501} + 310X_{1601} + 176,28X_{1701} + 123,19X_{1801} + 207,83X_{1901} + 40,70X_{2001} + 480X_{2101} + 143,4X_{2201} + 303,6X_{2301} \leq 480$$

$$20X_{102} + 19X_{202} + 42,25X_{302} + 187,55X_{402} + 173,25X_{502} + 36,4X_{602} + 56,77X_{702} + 85,71X_{802} + 54,36X_{902} + 76,42X_{1002} + 124,29X_{1102} + 155,87X_{1202} + 56,68X_{1302} + 265,06X_{1402} + 480X_{1502} + 310X_{1602} + 176,28X_{1702} + 123,19X_{1802} + 207,83X_{1902} + 40,70X_{2002} + 480X_{2102} + 143,4X_{2202} + 303,6X_{2302} \leq 480$$

...

$$20X_{108} + 19X_{208} + 42,25X_{308} + 187,55X_{408} + 173,25X_{508} + 36,4X_{608} + 56,77X_{708} + 85,71X_{808} + 54,36X_{908} + 76,42X_{1008} + 124,29X_{1108} + 155,87X_{1208} + 56,68X_{1308} + 265,06X_{1408} + 480X_{1508} + 310X_{1608} + 176,28X_{1708} + 123,19X_{1808} + 207,83X_{1908} + 40,70X_{2008} + 480X_{2108} + 143,4X_{2208} + 303,6X_{2308} \leq 480$$

Por último se plantean las restricciones de precedencia, empezando por la tarea 20 que tiene como único predecesor la tarea 10:

$$X_{201} \leq X_{101}$$

$$X_{202} \leq X_{101} + X_{102}$$

$$X_{203} \leq X_{101} + X_{102} + X_{103}$$

$$X_{204} \leq X_{101} + X_{102} + X_{103} + X_{104}$$

$$X_{205} \leq X_{101} + X_{102} + X_{103} + X_{104} + X_{105}$$

$$X_{206} \leq X_{101} + X_{102} + X_{103} + X_{104} + X_{105} + X_{106}$$

$$X_{207} \leq X_{101} + X_{102} + X_{103} + X_{104} + X_{105} + X_{106} + X_{107}$$

$$X_{208} \leq X_{101} + X_{102} + X_{103} + X_{104} + X_{105} + X_{106} + X_{107} + X_{108}$$

...

La tarea 50 tiene de predecesores las tareas 30 y 40:

$$2X_{501} \leq X_{301} + X_{401}$$

$$2X_{502} \leq X_{301} + X_{302} + X_{401} + X_{402}$$

$$2X_{503} \leq X_{301} + X_{302} + X_{303} + X_{401} + X_{402} + X_{403}$$

$$2X_{504} \leq X_{301} + X_{302} + X_{303} + X_{304} + X_{401} + X_{402} + X_{403} + X_{404}$$

$$2X_{505} \leq X_{301} + X_{302} + X_{303} + X_{304} + X_{305} + X_{401} + X_{402} + X_{403} + X_{404} + X_{405}$$

$$2X_{506} \leq X_{301} + X_{302} + X_{303} + X_{304} + X_{305} + X_{306} + X_{401} + X_{402} + X_{403} + X_{404} + X_{405} + X_{406}$$

$$2X_{507} \leq X_{301} + X_{302} + X_{303} + X_{304} + X_{305} + X_{306} + X_{307} + X_{401} + X_{402} + X_{403} + X_{404} + X_{405} \\ + X_{406} + X_{407}$$

$$2X_{508} \leq X_{301} + X_{302} + X_{303} + X_{304} + X_{305} + X_{306} + X_{307} + X_{308} + X_{401} + X_{402} + X_{403} + X_{404} + X_{405} + X_{406} + X_{407} + X_{408}$$

Para la resolución del problema se ha utilizado *Analytic solver*¹² (FrontlineSolvers), que sirve para resolver problemas de programación lineal utilizando el método simplex. Se instala como complemento de Excel y aumenta la potencia de Solver.

Al ser un complemento de Excel, la forma en la que se introducen las variables, la función objetivo y las restricciones es la misma que utilizando el complemento Solver, con la diferencia de que se podrán resolver problemas con un mayor número de variables en tiempos de resolución muy abordables.

A continuación se describe el problema planteado en *Analytic solver*: en la Figura 37 se recogen las tareas necesarias para fabricar un depósito anterior, con sus tiempos de tarea T_i y sus precedencias. A la derecha se ha creado un cuadro en el que se indican todas las variables y su posible asignación a cada estación.

Tarea i	Descripción	Precedentes	Ti(min)	Estación							
				Xi1	Xi2	Xi3	Xi4	Xi5	Xi6	Xi7	Xi8
10	SITUAR CUADERNA FRONTERA	0	20,00	X101	X102	X103	X104	X105	X106	X107	X108
20	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10, 110	19,00	X201	X202	X203	X204	X205	X206	X207	X208
30	TALADRADO CUADERNA SOLDADA	20	42,25	X301	X302	X303	X304	X305	X306	X307	X308
40	TALADRADO CUADERNA FRONTERA	20	187,55	X401	X402	X403	X404	X405	X406	X407	X408
50	TALADRADO CUADERNAS 526, 527 Y 528 (se puede dividir en 3)	30, 40	173,25	X501	X502	X503	X504	X505	X506	X507	X508
60	TALADRADO VÁLVULA DE DRENAJE	50	36,40	X601	X602	X603	X604	X605	X606	X607	X608
70	TALADRADO DE SOPORTES	0	56,77	X701	X702	X703	X704	X705	X706	X707	X708
80	TALADRADO REFUERZO BOCA LLENADO	0	85,71	X801	X802	X803	X804	X805	X806	X807	X808
90	TALADRADO TUERCAS REMACHABLES EN CUADERNA SOLDADA	30, 40	54,36	X901	X92	X903	X904	X905	X906	X907	X908
100	TALADRADO PERFILES BOTA	30, 40	76,42	X1001	X1002	X1003	X1004	X1005	X1006	X1007	X1008
110	TALADRADO TAPAS	0	124,29	X1101	X1102	X1103	X1104	X1105	X1106	X1107	X1108
120	REMACHADO DE TUERCAS EN CUADERNA SOLDADA	90	155,87	X1201	X1202	X1203	X1204	X1205	X1206	X1207	X1208
130	REMACHADO DE STRAP	60	56,68	X1301	X1302	X1303	X1304	X1305	X1306	X1307	X1308
140	REMACHADO DE CUADERNAS (se puede dividir en 3)	130	265,06	X1401	X1402	X1403	X1404	X1405	X1406	X1407	X1408
150	SELLADO 1ª FASE	120, 140	480,00	X1501	X1502	X1503	X1504	X1505	X1506	X1507	X1508
160	REMACHADO CUADERNA FRONTERA	100, 150	310,00	X1601	X1602	X1603	X1604	X1605	X1606	X1607	X1608
170	REMACHADO DE SOPORTES Y VÁLVULA DRENAJE	70, 150	176,28	X1701	X1702	X1703	X1704	X1705	X1706	X1707	X1708
180	REMACHADO PERFILES DE BOTA	160	123,19	X1801	X1802	X1803	X1804	X1805	X1806	X1807	X1808
190	REMACHADO REFUERZO BOCA LLENADO	80, 150	207,83	X1901	X1902	X1903	X1904	X1905	X1906	X1907	X1908
200	PEGAR SOPORTES Y CONECTAR MAZO	170, 180, 190	40,70	X2001	X2002	X2003	X2004	X2005	X2006	X2007	X2008
210	SELLADO 2ª FASE	200	480,00	X2101	X2102	X2103	X2104	X2105	X2106	X2107	X2108
220	EQUIPADO	210	143,40	X2201	X2202	X2203	X2204	X2205	X2206	X2207	X2208
230	PRUEBAS	220	303,60	X2301	X2302	X2303	X2304	X2305	X2306	X2307	X2308

Figura 37: Tareas y variables del problema

¹² Descargado de la página web <https://www.solver.com/>

En la Figura 38 se indican las casillas en blanco que serán las variables del problema y que se introducirán en la herramienta *Analytic solver*. Son variables del tipo binarias, por lo que una vez resuelto el problema, si una variable es igual a 1 significará que la tarea *i* se asigna a la estación *k*.

Tarea <i>i</i>	Descripción	Precedentes	Ti(min)	Estación							
				Xi1	Xi2	Xi3	Xi4	Xi5	Xi6	Xi7	Xi8
10	SITUAR CUADERNA FRONTERA	0	20,00	X101	X102	X103	X104	X105	X106	X107	X108
20	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10, 110	19,00	X201	X202	X203	X204	X205	X206	X207	X208
30	TALADRADO CUADERNA SOLDADA	20	42,25	X301	X302	X303	X304	X305	X306	X307	X308
40	TALADRADO CUADERNA FRONTERA	20	187,55	X401	X402	X403	X404	X405	X406	X407	X408
50	TALADRADO CUADERNAS 526, 527 Y 528 (se puede dividir en 3)	30, 40	173,25	X501	X502	X503	X504	X505	X506	X507	X508
60	TALADRADO VÁLVULA DE DRENAJE	50	36,40	X601	X602	X603	X604	X605	X606	X607	X608
70	TALADRADO DE SOPORTES	0	56,77	X701	X702	X703	X704	X705	X706	X707	X708
80	TALADRADO REFUERZO BOCA LLENADO	0	85,71	X801	X802	X803	X804	X805	X806	X807	X808
90	TALADRADO TUERCAS REMACHABLES EN CUADERNA SOLDADA	30, 40	54,36	X901	X92	X903	X904	X905	X906	X907	X908
100	TALADRADO PERFILES BOTA	30, 40	76,42	X1001	X1002	X1003	X1004	X1005	X1006	X1007	X1008
110	TALADRADO TAPAS	0	124,29	X1101	X1102	X1103	X1104	X1105	X1106	X1107	X1108
120	REMACHADO DE TUERCAS EN CUADERNA SOLDADA	90	155,87	X1201	X1202	X1203	X1204	X1205	X1206	X1207	X1208
130	REMACHADO DE STRAP	60	56,68	X1301	X1302	X1303	X1304	X1305	X1306	X1307	X1308
140	REMACHADO DE CUADERNAS (se puede dividir en 3)	130	265,06	X1401	X1402	X1403	X1404	X1405	X1406	X1407	X1408
150	SELLADO 1ª FASE	120, 140	480,00	X1501	X1502	X1503	X1504	X1505	X1506	X1507	X1508
160	REMACHADO CUADERNA FRONTERA	100, 150	310,00	X1601	X1602	X1603	X1604	X1605	X1606	X1607	X1608
170	REMACHADO DE SOPORTES Y VÁLVULA DRENAJE	70, 150	176,28	X1701	X1702	X1703	X1704	X1705	X1706	X1707	X1708
180	REMACHADO PERFILES DE BOTA	160	123,19	X1801	X1802	X1803	X1804	X1805	X1806	X1807	X1808
190	REMACHADO REFUERZO BOCA LLENADO	80, 150	207,83	X1901	X1902	X1903	X1904	X1905	X1906	X1907	X1908
200	PEGAR SOPORTES Y CONECTAR MAZO	170, 180, 190	40,70	X2001	X2002	X2003	X2004	X2005	X2006	X2007	X2008
210	SELLADO 2ª FASE	200	480,00	X2101	X2102	X2103	X2104	X2105	X2106	X2107	X2108
220	EQUIPADO	210	143,40	X2201	X2202	X2203	X2204	X2205	X2206	X2207	X2208
230	PRUEBAS	220	303,60	X2301	X2302	X2303	X2304	X2305	X2306	X2307	X2308

VARIABLES

Figura 38: variables del problema

En la Figura 40 están representadas las restricciones de relaciones de precedencia. Como se puede observar, las tareas 10, 70, 80 y 110 no tienen precedentes, por lo que no les corresponde ninguna restricción.

		RESTRICCIONES							
Precedentes	Tarea i	Xi1	Xi2	Xi3	Xi4	Xi5	Xi6	Xi7	Xi8
0	10								
10, 110	20	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
20	30	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
20	40	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
30, 40	50	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
50	60	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
0	70								
0	80								
30, 40	90	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
30, 40	100	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
0	110								
90	120	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
60	130	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
130	140	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
120, 140	150	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
100, 150	160	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
70, 150	170	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
160	180	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
80, 150	190	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
170, 180, 190	200	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
200	210	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
210	220	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0
220	230	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0	0 ≤ 0

Figura 40: restricciones de precedencia

Una vez expresado el problema en Excel, comenzamos a introducir los datos en la herramienta.

En la Figura 41 se indica la forma de introducir las variables. Se marcan todas las casillas, y en la pestaña *Analytic Solver Platform/Optimization Model* se pincha en *Decision* y se elige tipo de variable normal. A la derecha de la ventana se abre un esquema en el que van apareciendo los datos del problema, en este caso las variables.

The screenshot displays the Analytic Solver Platform interface. The main window shows an Excel spreadsheet with a linear programming model. The spreadsheet has columns for tasks, their durations, and the number of workers assigned to each. The Solver Options dialog box is open on the right, showing the 'Normal' variable type selected for all decision variables. The dialog also shows constraints and a model diagnosis section.

Tareas	Recurso	Precedentes	T (min)	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	PESES	ASIGNACIÓN UNITARIA	T
5	15	SITUAR CUADERNA FRONTERA	0	20,00	X101	X102	X103	X104	X105	X106	X107	X108	0	0 =1
6	20	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10, 110	19,00	X201	X202	X203	X204	X205	X206	X207	X208	0	0 =1
7	30	TALADRADO CUADERNA SOLDADA	20	42,25	X301	X302	X303	X304	X305	X306	X307	X308	0	0 =1
8	40	TALADRADO CUADERNA FRONTERA	20	187,55	X401	X402	X403	X404	X405	X406	X407	X408	0	0 =1
9	50	TALADRADO CUADERNAS 526, 527 Y 528 (se puede dividir en 3)	30, 40	173,25	X501	X502	X503	X504	X505	X506	X507	X508	0	0 =1
10	60	TALADRADO VÁLVULA DE DRENAJE	50	36,40	X601	X602	X603	X604	X605	X606	X607	X608	0	0 =1
11	70	TALADRADO DE SOPORTES	0	56,77	X701	X702	X703	X704	X705	X706	X707	X708	0	0 =1
12	80	TALADRADO REFUERZO BOCA LLENADO	0	85,71	X801	X802	X803	X804	X805	X806	X807	X808	0	0 =1
13	90	TALADRADO TUERCAS REMACHABLES EN CUADERNA SOLDADA	30, 40	54,36	X901	X92	X903	X904	X905	X906	X907	X908	0	0 =1
14	100	TALADRADO PERFILES BOTA	30, 40	76,42	X1001	X1002	X1003	X1004	X1005	X1006	X1007	X1008	0	0 =1
15	110	TALADRADO TAPAS	0	124,29	X1101	X1102	X1103	X1104	X1105	X1106	X1107	X1108	0	0 =1
16	120	REMACHADO DE TUERCAS EN CUADERNA SOLDADA	90	155,87	X1201	X1202	X1203	X1204	X1205	X1206	X1207	X1208	0	0 =1
17	130	REMACHADO DE STRAP	60	56,68	X1301	X1302	X1303	X1304	X1305	X1306	X1307	X1308	0	0 =1
18	140	REMACHADO DE CUADERNAS (se puede dividir en 3)	130	285,06	X1401	X1402	X1403	X1404	X1405	X1406	X1407	X1408	0	0 =1
19	150	SELLADO 3ª FASE	120, 140	480,00	X1501	X1502	X1503	X1504	X1505	X1506	X1507	X1508	0	0 =1
20	160	REMACHADO CUADERNA FRONTERA	100, 150	310,00	X1601	X1602	X1603	X1604	X1605	X1606	X1607	X1608	0	0 =1
21	170	REMACHADO DE SOPORTES Y VÁLVULA DRENAJE	70, 150	176,28	X1701	X1702	X1703	X1704	X1705	X1706	X1707	X1708	0	0 =1
22	180	REMACHADO PERFILES DE BOTA	160	123,19	X1801	X1802	X1803	X1804	X1805	X1806	X1807	X1808	0	0 =1
23	190	REMACHADO REFUERZO BOCA LLENADO	80, 150	207,83	X1901	X1902	X1903	X1904	X1905	X1906	X1907	X1908	0	0 =1
24	200	PEGAR SOPORTES Y CONECTAR MAZO	170, 180, 190	40,70	X2001	X2002	X2003	X2004	X2005	X2006	X2007	X2008	0	0 =1
25	210	SELLADO 2ª FASE	200	480,00	X2101	X2102	X2103	X2104	X2105	X2106	X2107	X2108	0	0 =1
26	220	EQUIPADO	210	143,40	X2201	X2202	X2203	X2204	X2205	X2206	X2207	X2208	0	0 =1
27	230	PRUEBAS	220	303,60	X2301	X2302	X2303	X2304	X2305	X2306	X2307	X2308	0	0 =1

Figura 41: variables en Analytic solver

A continuación, en la pestaña *Analytic Solver Platform/Optimization Model*, se introducen las restricciones de asignación unitaria, tiempo de ciclo y precedencia. Estas restricciones son de tipo “normal”, y de nuevo aparecen en el esquema de la derecha.

The screenshot displays the Excel Solver interface with the 'Constraint Wizard' open. The main window shows a grid of constraints for variables X01 through X08. The constraints are categorized into 'UNITARIAS', 'TIEMPO CICLO', and 'RESTRICCIONES'. The 'RESTRICCIONES' section includes a table with columns for variables X01 to X08 and rows for various tasks (e.g., 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230). The right-hand pane shows the 'Solver Options and Model Specifications' dialog, with the 'Constraints' section expanded to show a list of normal constraints, including assignment constraints like \$A\$112 <= 480 and precedence constraints like \$A\$136-\$A\$137 <= \$A\$96-\$B\$427. The 'Model Type' section is set to 'Unknown'.

Figura 42: restricciones

La cuarta restricción es obligar a que las variables sean binarias. De igual modo, se selecciona el tipo de variable y en el esquema aparece una nueva rama que indica que son enteras y binarias.

The screenshot displays the Excel Solver environment. The 'Constraint Wizard' is open, showing the 'Variable Type/Bound' tab. The 'Binary' option is selected for the variables. The main spreadsheet shows a table with columns for 'Estación' (X1 to X8) and rows for various tasks. The 'Solver Options and Model Specifications' pane on the right shows the 'Integers' section with several variables marked as binary.

Tareas	Descripción	Tiempo (min)	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	PESOS	ASIGNACIÓN UNITARIA	
5	50 SITUAR CUADERNA FRONTERA	0				X105	X106	X107	X108		0	0 = 1	
6	20 SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	0				X205	X206	X207	X208		0	0 = 1	
7	30 TALADRADO CUADERNA SOLDADA	0				X305	X306	X307	X308		0	0 = 1	
8	40 TALADRADO CUADERNA FRONTERA	0				X405	X406	X407	X408		0	0 = 1	
9	50 TALADRADO CUADERNAS 526, 527 Y 528 (sepa)	0				X505	X506	X507	X508		0	0 = 1	
10	60 TALADRADO VÁLVULA DE DRENAJE	90				X605	X606	X607	X608		0	0 = 1	
11	70 TALADRADO DE SOPORTES	0				X705	X706	X707	X708		0	0 = 1	
12	80 TALADRADO REFUERZO BOCA LLENADO	95,72	X804	X802	X803	X804	X805	X806	X807	X808	0	0 = 1	
13	90 TALADRADO TUERCAS REMACHABLES EN CUADERNA SOLDADA	30, 40	54,36	X901	X92	X903	X904	X905	X906	X907	X908	0	0 = 1
14	100 TALADRADO PERFILES BOTA	30, 40	76,42	X1001	X1002	X1003	X1004	X1005	X1006	X1007	X1008	0	0 = 1
15	110 TALADRADO TABAS	0	124,29	X1101	X1102	X1103	X1104	X1105	X1106	X1107	X1108	0	0 = 1
16	120 REMACHADO DE TUERCAS EN CUADERNA SOLDADA	90	155,87	X1201	X1202	X1203	X1204	X1205	X1206	X1207	X1208	0	0 = 1
17	130 REMACHADO DE STRAP	60	56,68	X1301	X1302	X1303	X1304	X1305	X1306	X1307	X1308	0	0 = 1
18	140 REMACHADO DE CUADERNAS (se puede dividir en 3)	130	265,06	X1401	X1402	X1403	X1404	X1405	X1406	X1407	X1408	0	0 = 1
19	150 SELLADO 1ª FASE	120, 140	480,00	X1501	X1502	X1503	X1504	X1505	X1506	X1507	X1508	0	0 = 1
20	160 REMACHADO CUADERNA FRONTERA	100, 150	310,00	X1601	X1602	X1603	X1604	X1605	X1606	X1607	X1608	0	0 = 1
21	170 REMACHADO DE SOPORTES Y VÁLVULA DRENAJE	70, 150	376,28	X1701	X1702	X1703	X1704	X1705	X1706	X1707	X1708	0	0 = 1
22	180 REMACHADO PERFILES DE BOTA	160	123,19	X1801	X1802	X1803	X1804	X1805	X1806	X1807	X1808	0	0 = 1
23	190 REMACHADO REFUERZO BOCA LLENADO	80, 150	207,83	X1901	X1902	X1903	X1904	X1905	X1906	X1907	X1908	0	0 = 1
24	200 PEGAR SOPORTES Y CONECTAR MAZO	170, 180, 190	40,70	X2001	X2002	X2003	X2004	X2005	X2006	X2007	X2008	0	0 = 1
25	210 SELLADO 2ª FASE	200	480,00	X2101	X2102	X2103	X2104	X2105	X2106	X2107	X2108	0	0 = 1
26	220 EQUIPADO	210	143,40	X2201	X2202	X2203	X2204	X2205	X2206	X2207	X2208	0	0 = 1
27	230 PRUEBAS	220	303,60	X2301	X2302	X2303	X2304	X2305	X2306	X2307	X2308	0	0 = 1

Figura 43: restricciones

Por último, se introduce la función objetivo eligiendo que sea del tipo minimizar.

The screenshot displays the Microsoft Excel Solver interface. The main spreadsheet area contains a table with the following columns: 'Tarea', 'Descripción', 'Tiempo (min)', and 'Estación' (X1 to X18). The objective function is defined as $F.O. = \text{SUMA}(X5:X27)$. The Solver Options dialog is open, showing the 'Objective' field set to '\$X\$31 (\$Min)'. The 'To: Variable Cell Range' is set to '\$X\$5:\$X\$27'. The 'To: Constraint Range' is set to '\$Y\$5:\$Y\$27'. The 'Model Variable' is set to '\$X\$5:\$X\$27'. The 'Model Constraints' section is expanded, showing various constraints such as '\$A\$1:\$A\$12 <= \$B\$1:\$B\$12' and '\$Z\$5:\$Z\$27 = 1'. The 'Model Diagnosis' section is also visible, showing the 'Model Type' as 'Linear'.

Tarea	Descripción	Tiempo (min)	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	PESOS	ASIGNACIÓN UNITARIA	
5	SITUAR CUADERNA FRONTERA	0	20,00	X101	X102	X103	X104	X105	X106	X107	X108	0	0 = 1
6	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10, 110	19,00	X101	X201	X301	X204	X205	X206	X207	X208	0	0 = 1
7	TALADRADO CUADERNA SOLDADA	20	42,55	X301	X302	X303	X304	X305	X306	X307	X308	0	0 = 1
8	TALADRADO CUADERNA FRONTERA	20	187,55	X401	X402	X403	X404	X405	X406	X407	X408	0	0 = 1
9	TALADRADO CUADERNAS 526, 527 Y 528 (se puede dividir en 3)	30, 40	173,25	X501	X502	X503	X504	X505	X506	X507	X508	0	0 = 1
10	TALADRADO VÁLVULA DE DRENAJE	30	36,40	X601	X602	X603	X604	X605	X606	X607	X608	0	0 = 1
11	TALADRADO DE SOPORTES	0	56,77	X701	X702	X703	X704	X705	X706	X707	X708	0	0 = 1
12	TALADRADO REFUERZO BOCA LLENADO	0	85,71	X801	X802	X803	X804	X805	X806	X807	X808	0	0 = 1
13	TALADRADO TUERCAS REMACHABLES EN CUADERNA SOLDADA	30, 40	54,36	X901	X92	X903	X904	X905	X906	X907	X908	0	0 = 1
14	TALADRADO PERFILES BOTA	30, 40	76,42	X1001	X1002	X1003	X1004	X1005	X1006	X1007	X1008	0	0 = 1
15	TALADRADO TAPAS	0	124,29	X1101	X1102	X1103	X1104	X1105	X1106	X1107	X1108	0	0 = 1
16	REMACHADO DE TUERCAS EN CUADERNA SOLDADA	90	155,87	X1201	X1202	X1203	X1204	X1205	X1206	X1207	X1208	0	0 = 1
17	REMACHADO DE STRAP	60	56,68	X1301	X1302	X1303	X1304	X1305	X1306	X1307	X1308	0	0 = 1
18	REMACHADO DE CUADERNAS (se puede dividir en 3)	130	265,06	X1401	X1402	X1403	X1404	X1405	X1406	X1407	X1408	0	0 = 1
19	SELLADO 3ª FASE	120, 140	480,00	X1501	X1502	X1503	X1504	X1505	X1506	X1507	X1508	0	0 = 1
20	REMACHADO CUADERNA FRONTERA	100, 150	310,00	X1601	X1602	X1603	X1604	X1605	X1606	X1607	X1608	0	0 = 1
21	REMACHADO DE SOPORTES Y VÁLVULA DRENAJE	70, 150	176,28	X1701	X1702	X1703	X1704	X1705	X1706	X1707	X1708	0	0 = 1
22	REMACHADO PERFILES DE BOTA	160	123,19	X1801	X1802	X1803	X1804	X1805	X1806	X1807	X1808	0	0 = 1
23	REMACHADO REFUERZO BOCA LLENADO	80, 150	207,83	X1901	X1902	X1903	X1904	X1905	X1906	X1907	X1908	0	0 = 1
24	PEGAR SOPORTES Y CONECTAR MAZO	170, 180, 190	40,70	X2001	X2002	X2003	X2004	X2005	X2006	X2007	X2008	0	0 = 1
25	SELLADO 2ª FASE	200	480,00	X2101	X2102	X2103	X2104	X2105	X2106	X2107	X2108	0	0 = 1
26	EQUIFADO	210	143,40	X2201	X2202	X2203	X2204	X2205	X2206	X2207	X2208	0	0 = 1
27	PRUEBAS	220	303,60	X2301	X2302	X2303	X2304	X2305	X2306	X2307	X2308	0	0 = 1

Figura 44: función objetivo

Para proceder a la resolución del problema, dentro del esquema de la derecha elegimos la pestaña *Engine* y en el desplegable seleccionamos *Standard Lineal Problem*.

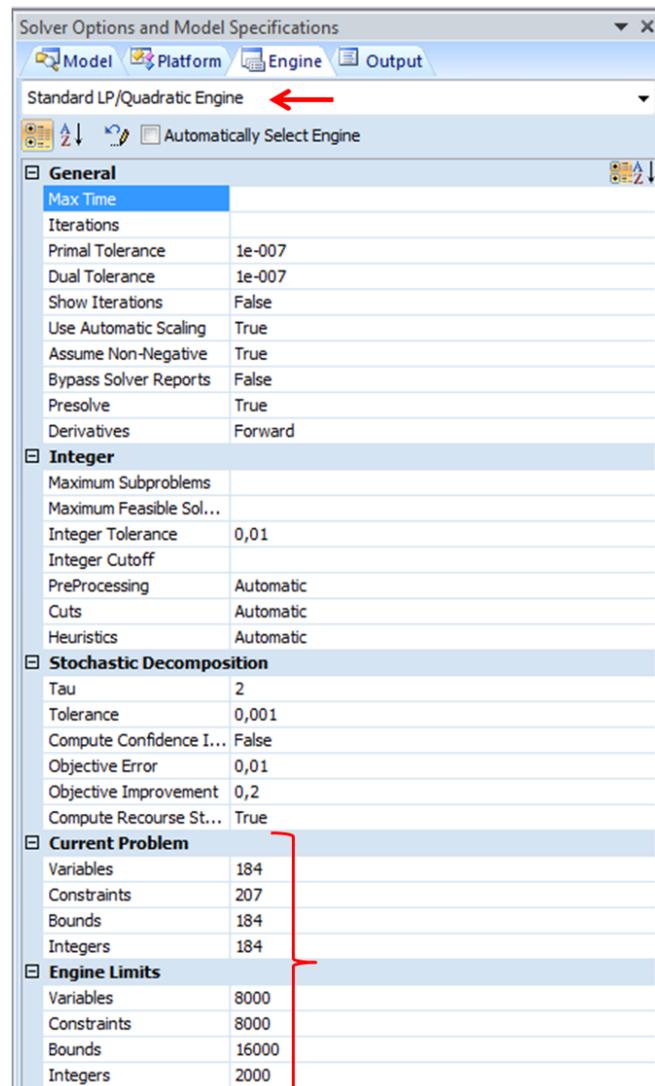
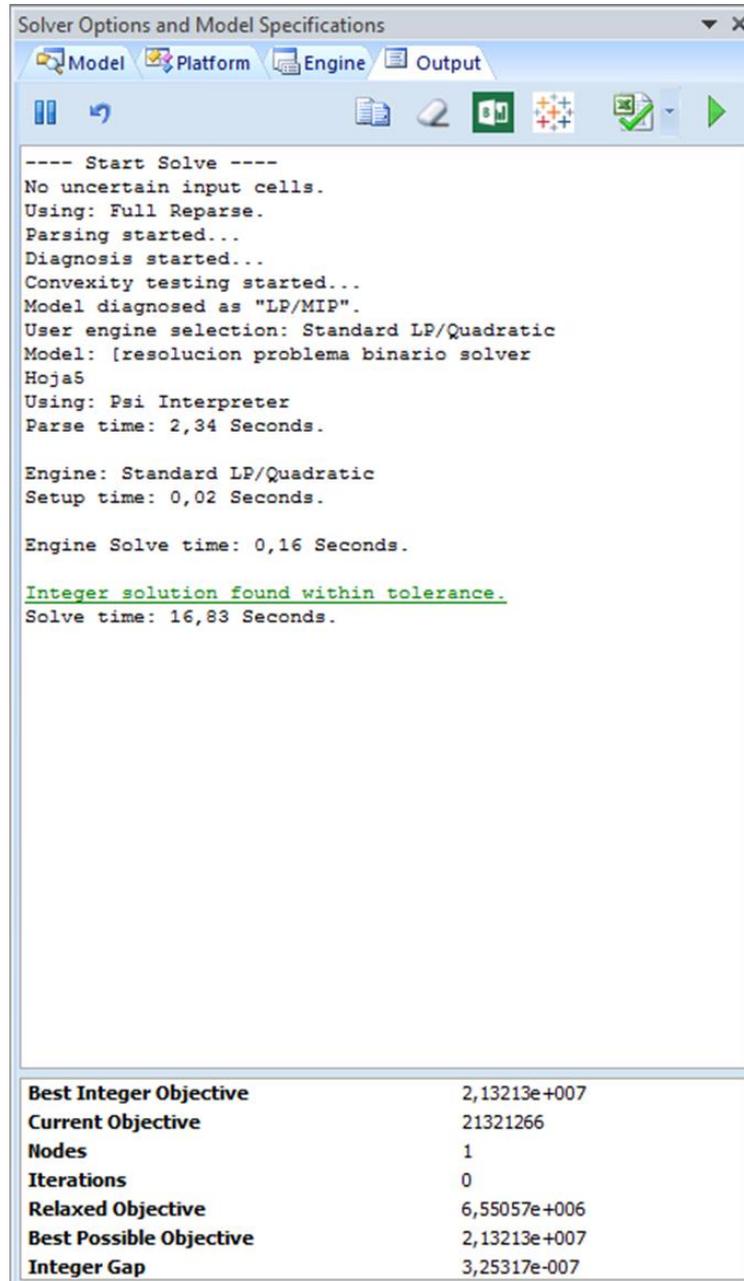


Figura 45: motor de la herramienta

Como se indica en la Figura 45, el problema consta de 184 variables y 207 restricciones. A diferencia de Solver, que sólo permite resolver problemas de hasta 100 variables, la herramienta *Analytic solver* es capaz de resolver problemas de hasta 8000 variables u 8000 restricciones, y como se observa en la Figura 46, en tiempos muy reducidos.

Una vez elegido el motor de resolución, en la pestaña *Output* se elige la opción *Solve* y automáticamente la herramienta comienza a calcular la solución óptima del problema. En este caso, la solución se ha obtenido en 16,83 segundos, que es un tiempo más que aceptable.



```
---- Start Solve ----
No uncertain input cells.
Using: Full Reparse.
Parsing started...
Diagnosis started...
Convexity testing started...
Model diagnosed as "LP/MIP".
User engine selection: Standard LP/Quadratic
Model: [resolucion problema binario solver
Hoja5
Using: Psi Interpreter
Parse time: 2,34 Seconds.

Engine: Standard LP/Quadratic
Setup time: 0,02 Seconds.

Engine Solve time: 0,16 Seconds.

Integer solution found within tolerance.
Solve time: 16,83 Seconds.
```

Best Integer Objective	2,13213e+007
Current Objective	21321266
Nodes	1
Iterations	0
Relaxed Objective	6,55057e+006
Best Possible Objective	2,13213e+007
Integer Gap	3,25317e-007

Figura 46: resultado

En la Figura 47 se muestra el resultado del problema. Las variables con valor 1 indican que la tarea i (mostrada en la fila) se asigna a la estación k (representada en la columna). Como podemos observar, las tareas de sellante 150 y 210 han sido asignadas a las estaciones 4 y 7 respectivamente, siendo las únicas tareas en esas estaciones.

Tarea i	Descripción	Precedentes	Ti(min)	Estación															
				Xi1	Xi2	Xi3	Xi4	Xi5	Xi6	Xi7	Xi8								
10	SITUAR CUADERNA FRONTERA	0	20,00	X101	1	X102	0	X103	0	X104	0	X105	0	X106	0	X107	0	X108	0
20	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10, 110	19,00	X201	1	X202	0	X203	0	X204	0	X205	0	X206	0	X207	0	X208	0
30	TALADRADO CUADERNA SOLDADA	20	42,25	X301	1	X302	0	X303	0	X304	0	X305	0	X306	0	X307	0	X308	0
40	TALADRADO CUADERNA FRONTERA	20	187,55	X401	1	X402	0	X403	0	X404	0	X405	0	X406	0	X407	0	X408	0
50	TALADRADO CUADERNAS 526, 527 Y 528 (se puede dividir en 3)	30, 40	173,25	X501	0	X502	1	X503	0	X504	0	X505	0	X506	0	X507	0	X508	0
60	TALADRADO VÁLVULA DE DRENAJE	50	36,40	X601	0	X602	1	X603	0	X604	0	X605	0	X606	0	X607	0	X608	0
70	TALADRADO DE SOPORTES	0	56,77	X701	0	X702	1	X703	0	X704	0	X705	0	X706	0	X707	0	X708	0
80	TALADRADO REFUERZO BOCA LLENADO	0	85,71	X801	1	X802	0	X803	0	X804	0	X805	0	X806	0	X807	0	X808	0
90	TALADRADO TUERCAS REMACHABLES EN CUADERNA SOLDADA	30, 40	54,36	X901	0	X92	1	X903	0	X904	0	X905	0	X906	0	X907	0	X908	0
100	TALADRADO PERFILES BOTA	30, 40	76,42	X1001	0	X1002	1	X1003	0	X1004	0	X1005	0	X1006	0	X1007	0	X1008	0
110	TALADRADO TAPAS	0	124,29	X1101	1	X1102	0	X1103	0	X1104	0	X1105	0	X1106	0	X1107	0	X1108	0
120	REMACHADO DE TUERCAS EN CUADERNA SOLDADA	90	155,87	X1201	0	X1202	0	X1203	1	X1204	0	X1205	0	X1206	0	X1207	0	X1208	0
130	REMACHADO DE STRAP	60	56,68	X1301	0	X1302	1	X1303	0	X1304	0	X1305	0	X1306	0	X1307	0	X1308	0
140	REMACHADO DE CUADERNAS (se puede dividir en 3)	130	265,06	X1401	0	X1402	0	X1403	1	X1404	0	X1405	0	X1406	0	X1407	0	X1408	0
150	SELLADO 1ª FASE	120, 140	480,00	X1501	0	X1502	0	X1503	0	X1504	1	X1505	0	X1506	0	X1507	0	X1508	0
160	REMACHADO CUADERNA FRONTERA	100, 150	310,00	X1601	0	X1602	0	X1603	0	X1604	0	X1605	0	X1606	1	X1607	0	X1608	0
170	REMACHADO DE SOPORTES Y VÁLVULA DRENAJE	70, 150	176,28	X1701	0	X1702	0	X1703	0	X1704	0	X1705	1	X1706	0	X1707	0	X1708	0
180	REMACHADO PERFILES DE BOTA	160	123,19	X1801	0	X1802	0	X1803	0	X1804	0	X1805	0	X1806	1	X1807	0	X1808	0
190	REMACHADO REFUERZO BOCA LLENADO	80, 150	207,83	X1901	0	X1902	0	X1903	0	X1904	0	X1905	1	X1906	0	X1907	0	X1908	0
200	PEGAR SOPORTES Y CONECTAR MAZO	170, 180, 190	40,70	X2001	0	X2002	0	X2003	0	X2004	0	X2005	0	X2006	1	X2007	0	X2008	0
210	SELLADO 2ª FASE	200	480,00	X2101	0	X2102	0	X2103	0	X2104	0	X2105	0	X2106	0	X2107	1	X2108	0
220	EQUIPADO	210	143,40	X2201	0	X2202	0	X2203	0	X2204	0	X2205	0	X2206	0	X2207	0	X2208	1
230	PRUEBAS	220	303,60	X2301	0	X2302	0	X2303	0	X2304	0	X2305	0	X2306	0	X2307	0	X2308	1

Figura 47: resultado problema anteriores

En el apartado 5.4.1 compararemos este resultado con el obtenido por método heurístico.

En la Figura 48 y Figura 49 se muestran los resultados de las ecuaciones de restricción. La función objetivo es la suma de todos los valores de la columna pesos. La columna asignación unitaria muestra que todas las tareas han sido asignadas 1 única vez, y se observa que ninguna estación sobrepasa el tiempo de ciclo.

PESOS	ASIGNACIÓN UNITARIA	TIEMPO CICLO
1	1 =1	478,8 <= 480
1	1 =1	453,87619 <= 480
1	1 =1	420,92381 <= 480
1	1 =1	480 <= 480
10	1 =1	384,113208 <= 480
10	1 =1	473,886792 <= 480
10	1 =1	480 <= 480
1	1 =1	447 <= 480
10	1 =1	
10	1 =1	
1	1 =1	
100	1 =1	
10	1 =1	
100	1 =1	
1000	1 =1	
100000	1 =1	
10000	1 =1	
100000	1 =1	
10000	1 =1	
100000	1 =1	
1000000	1 =1	
10000000	1 =1	
10000000	1 =1	

F.O. 21321266

Figura 48: resultado restricciones

		RESTRICCIONES							
Precedentes	Tarea i	Xi1	Xi2	Xi3	Xi4	Xi5	Xi6	Xi7	Xi8
0	10								
10, 110	20	2 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2
20	30	1 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1
20	40	1 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1
30, 40	50	0 <= 2	2 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2
50	60	0 <= 0	1 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1
0	70	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
0	80	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
30, 40	90	0 <= 2	2 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2
30, 40	100	0 <= 2	2 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2
0	110	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
90	120	0 <= 0	0 <= 1	1 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1
60	130	0 <= 0	1 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1
130	140	0 <= 0	0 <= 1	1 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1
120, 140	150	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 2	2 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2
100, 150	160	0 <= 0	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 2	0 <= 2	2 <= 2	0 <= 2	0 <= 2
70, 150	170	0 <= 0	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 2	2 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2
160	180	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	1 <= 1	0 <= 1	0 <= 1
80, 150	190	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 1	0 <= 2	2 <= 2	0 <= 2	0 <= 2	0 <= 2
170, 180, 190	200	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 2	3 <= 3	0 <= 3	0 <= 3
200	210	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 1	1 <= 1	0 <= 1
210	220	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 1	1 <= 1
220	230	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	0 <= 0	1 <= 1

Figura 49: resultado restricciones

5.3.2.2. Resolución del problema de depósitos posteriores

Los datos del problema son los siguientes:

Tabla 31: tareas montaje depósito posterior.

Tarea i	Descripción	Precedentes	Ti(min)
10	POSICIONAMIENTO DE LA CUADERNA FRONTERA EN GRADA	0	20,00
20	TALADRAR CUADERNA SOLDADA	0	46,01
30	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10, 20	19,00
40	TALADRADO DE CUADERNA FRONTERA SUP.	30	94,99
45	TALADRADO DE CUADERNA FRONTERA INF.	30	95,02
50	TALADRADO DE ALETAS HORIZONTALES	30	58,61
60	TALADRADO DE ALETA VERTICAL	30	43,79
70	TALADRADO PARA HOUSING	30	56,58
75	SACAR DEPÓSITO DE GRADA	40, 45, 50, 60, 70	16,00
80	TALADRADO DE TAPAS	0	124,29
90	TALADRAR BOCA LLENADO	75	85,71
100	TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	0	16,86
110	TALADRADO CUADERNA A2810404-001	75, 100	85,29
120	TALADRADO CUADERNA A2810403-001	75	103,86
130	TALADRADO CUADERNA A2810402-001	75	154,00
140	TALADRADO CUADERNA A2810401-003	75	95,69
150	TALADRADO PREVIO DE SOPORTES	75	33,70
160	TALADRADO DEFINITIVO DE SOPORTES	150	39,06
170	TALADRADO Y EQUIPADO DE TUBO SOBREPRESIÓN	160	74,32
180	TALADRADO DE RECEPTÁCULOS	75	44,43
190	TALADRADO DE VÁLVULA DE DRENAJE	75	36,53
200	TALADRADO DE DRENAJES	20	36,26
210	REMACHADO DE TUERCAS REMACHABLES CUADERNA SOLDADA	75, 200	82,33
220	REMACHADO DE STRAP A CUADERNA 401	140	35,44
230	REMACHADO DE STRAP A CUADERNAS 404	110	36,49
235	REMACHADO DE STRAP A CUADERNAS 403	120	34,40
240	REALIZAR ZONAS DE MASA	170, 180, 230	51,33
250	EMPASTADO 1ª FASE	130, 235, 240	240,00
260	REMACHADO CUADERNA A2810402-001	250	237,27
270	REMACHADO RECEPTÁCULOS A2810544-001	250	62,73
280	REMACHADO CUADERNA A2810403-001	250	80,28
290	REMACHADO CUADERNA A2810404-001	250	69,72
300	SELLANTE 1ª FASE	260, 270, 280, 290	480,00
310	REMACHAR TUBO EQUIPADO Y BARRA	300	70,77
320	REMACHAR SOPORTES	300	73,55
330	REMACHAR CUADERNA A2810401-003	220, 310, 320	237,77
340	REMACHAR VÁLVULA	190, 300	37,91
350	REMACHAR CUADERNA FRONTERA	330, 340	210,00

360	REMACHAR REFUERZO	90, 300	165,48
365	REMACHAR ADAPTADOR BOCA DE LLENADO	360	104,52
370	FIJAR CONJUNTO EN GRADA	350	33,00
380	TALADRAR CUADERNA	370	31,68
390	TALADRAR PUNTOS DE FIJACIÓN	370	24,40
400	TALADRADO PREVIO DE HOUSING Y ALETAS	380, 390	127,45
410	TALADRADO DEFINITIVO DE ALETA VERTICAL	400	62,20
420	TALADRADO DEFINITIVO DE ALETAS HORIZONTALES	400	77,73
430	TALADRADO DEFINITIVO DE HOUSING	400	95,97
440	TALADRAR RECEPTORES	400	27,56
450	SITUAR HOUSING PROVISIONAL	410, 420, 430, 440	18,00
460	SITUAR CARTELA 441 Y ANGULAR 444 Y TALADRAR	450	33,81
470	FIJAR ÚTIL MTAX-01-A2810507-931	450	25,00
480	SITUAR CARTELAS 442 Y 768, ANGULARES 454 Y 770 Y DIAFRAGMA 451 Y TALADRAR	470	38,76
490	SITUAR TAPAS 478 Y 479 Y TALADRAR CONJUNTO	460, 480	94,26
500	TALADRAR ANGULARES 444, 770, 454, CARTELA 768 Y DIAFRAGMA 451	460, 480	46,01
510	SITUAR HERRAJE A2812112-401 Y TALADRAR	460, 480	25,86
520	INSTALAR SOPORTES Y PROTECTORES	500, 510	44,00
530	REMACHAR ANGULARES	490, 500, 510	54,67
540	INSTALAR HOUSING	530	37,79
550	MONTAR MAZO Y REMACHAR HERRAJE	520, 540	29,93
560	REMACHADO DE CARTELA 768	520, 540	31,90
580	AVELLANADO PILÓN	490	236,38
590	REMACHADO DIAFRAGMA	520, 540	36,78
600	REMACHADO DE CARTELAS	550, 560, 580, 590	206,83
620	PROTEGER ENCAPSULADO Y CORDÓN	600	19,00
630	SITUAR TAPAS Y REMACHAR	620	179,52
640	EQUIPAR ALETA VERTICAL	630	34,00
650	TALADRAR ALETA VERTICAL	630	58,30
660	MONTAR STRAP Y ALETA VERTICAL	640, 650	84,49
670	MONTAR ALETAS HORIZONTALES	630	75,79
680	FORMAR E INSTALAR VÁLVULA DE SOBREPRESIÓN	630	28,90
690	SELLANTE 2ª FASE	210, 365, 660, 670, 680	480,00
700	INSTALAR AFORADORES 0237KTU1	690	54,14
710	INSTALAR BRIDA Y CONECTAR MAZO A2812523-403	690	44,36
720	INSTALAR MAZO A2812525-403	690	34,57
730	EQUIPAR E INSTALAR TUBO A2811825-401	690	69,14
740	INSTALAR VÁLVULA DE DRENAJE JN0313-1	690	19,89
750	MONTAR BRIDA SOBRE SOPORTE A2811864-001	690	17,89
760	PRUEBAS	700, 710, 720, 730, 740, 750	240,00

De nuevo, el tiempo de ciclo es de 480 minutos. Con estos datos se representa el gráfico de precedencias:

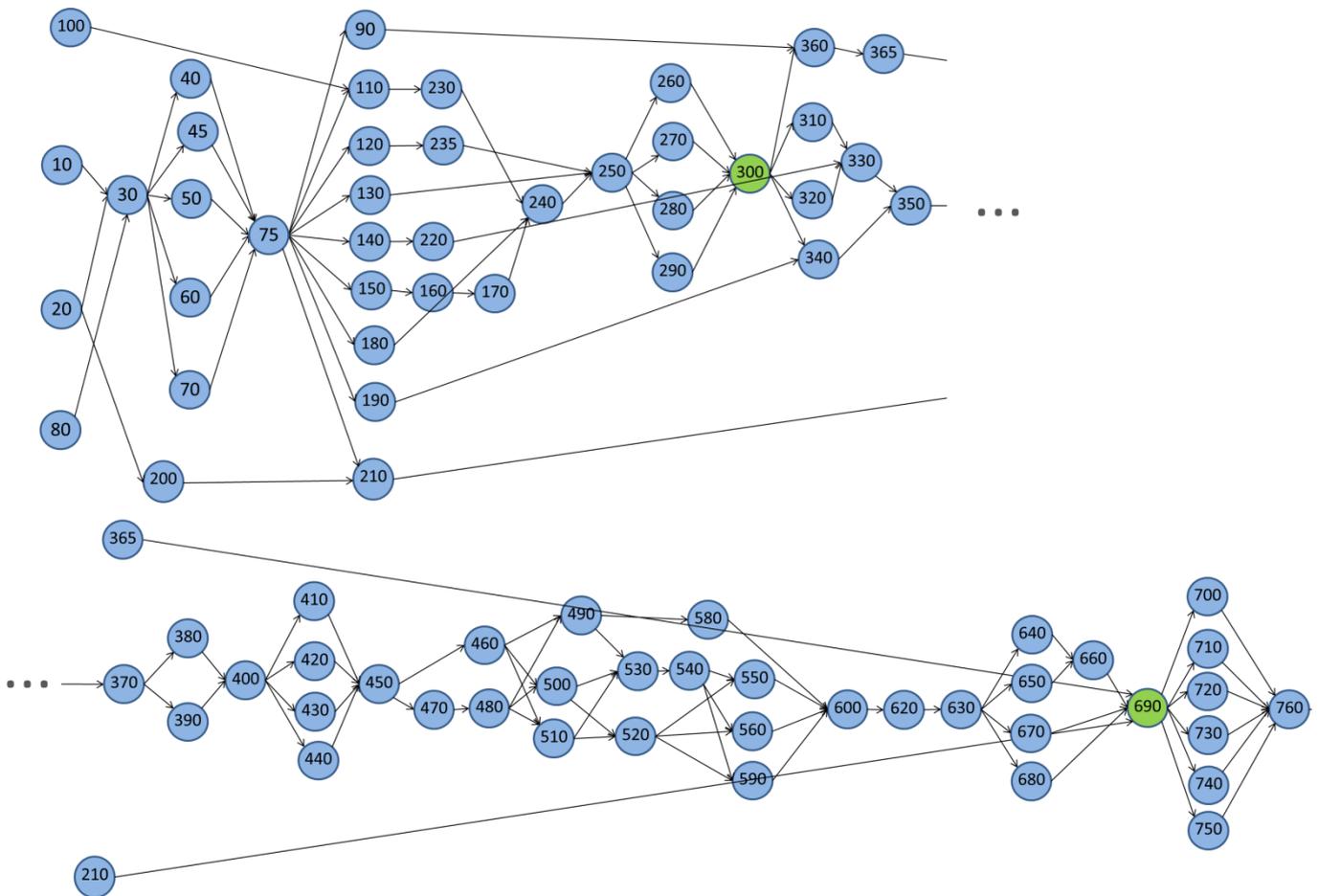


Figura 50: grafo de precedencia de tareas en depósitos posteriores

Las variables del problema son del tipo binarias y de la forma x_{ik} = Tarea i asignada a la estación k , donde $i=10, 20, 30, \dots, 760$ y $k=1, 2, 3, \dots, 14$. Por tanto, el problema constará de 1092 variables. En este caso, se ha escogido $N_{max}=14$ debido a que es el número de estaciones obtenido por el método de Helgeson & Birnie, considerando las dos fases de sellante como estaciones. Al haber asignado un tiempo $T_i = 480$ a las dos fases de sellante, nos aseguramos que al resolver el problema el algoritmo asignará cada una de ellas a una sola estación.

En este caso se omite el desarrollo teórico del problema debido a las dimensiones que alcanzaría su reproducción completa en papel. No obstante, será de la misma forma que el planteado en el punto 5.3.2.1. Por tanto, se procede a explicar directamente el problema en Excel.

De nuevo se plantea el problema en *Analytic solver*: en la Figura 51Figura 37 se recogen las tareas necesarias para fabricar un depósito posterior, con sus tiempos de tarea T_i y sus precedencias. A la derecha se ha creado un cuadro en el que se indican todas las variables y su posible asignación a cada estación. Serán del tipo binarias, por lo que una vez resuelto el problema, si una variable es igual a 1 significará que la tarea i se asigna a la estación k .

En la Figura 52 se muestran tres columnas: pesos, asignación unitaria y tiempo de ciclo. Al igual que en el problema anterior, los pesos se utilizarán para la función objetivo, la columna de asignación unitaria servirá para asegurar que cada tarea se asigne una única vez a cada estación, y la columna tiempo de ciclo cerciora que el tiempo de las tareas asignadas a una misma estación no sobrepasan los 480 minutos.

En la Figura 53 están representadas las restricciones de relaciones de precedencia. Como se puede observar, las tareas 10, 20, 80 y 100 no tienen precedentes, por lo que no les corresponde restricción alguna.

De nuevo, se introducen las variables, restricciones y función objetivo en la herramienta *Analytic solver* y aparecen identificadas en el esquema de la derecha.

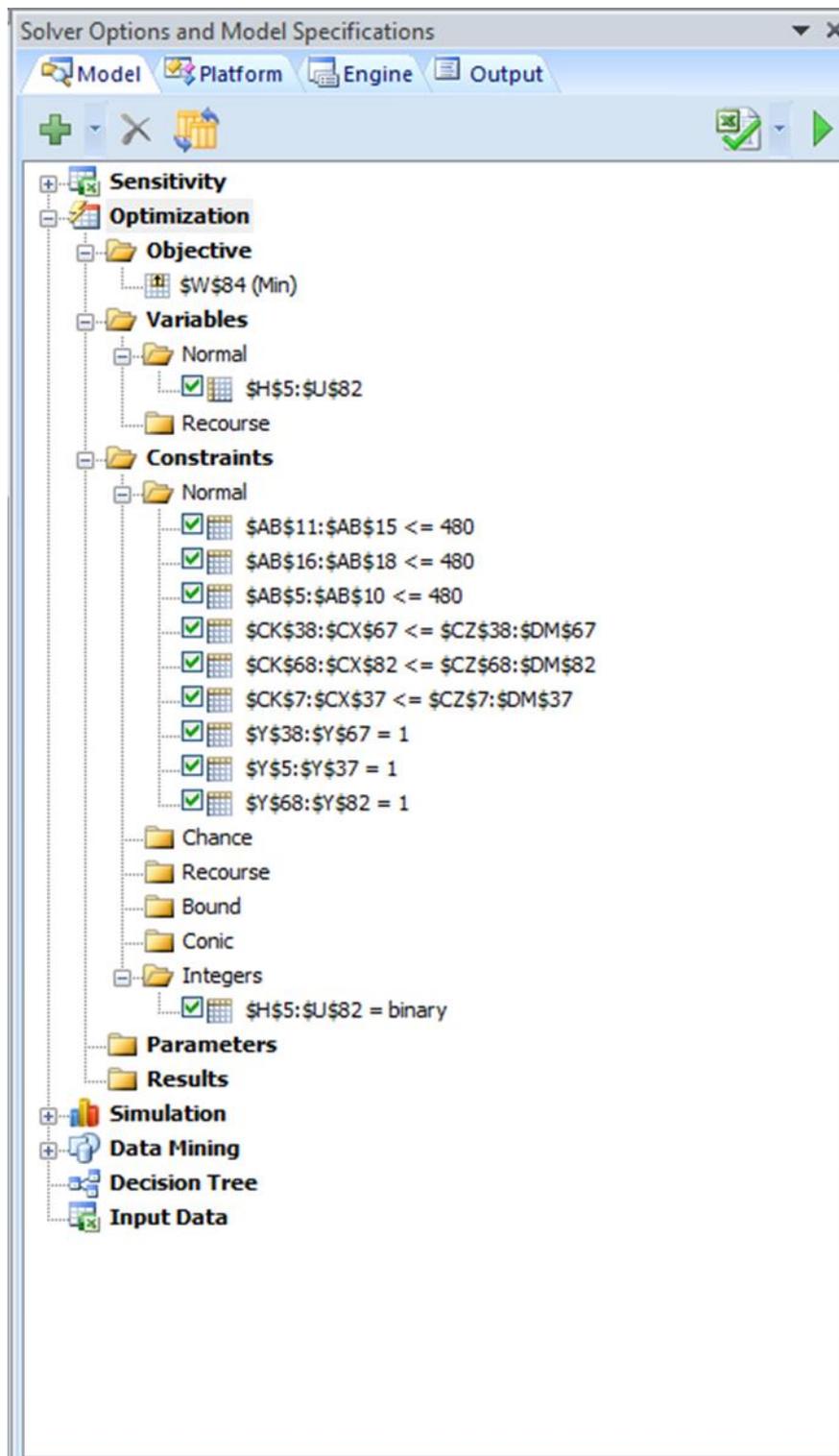


Figura 54: función objetivo, variables y restricciones del problema

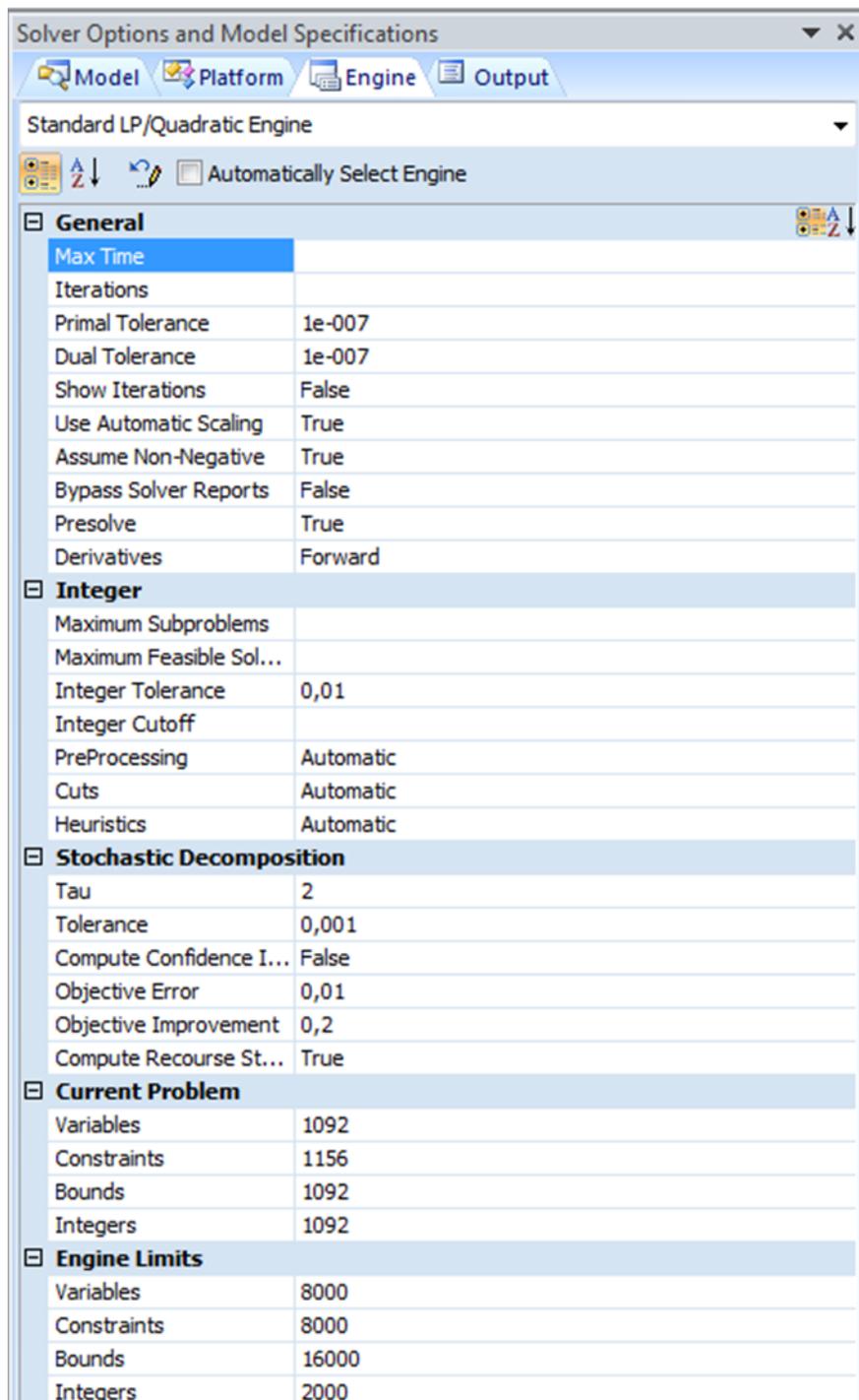


Figura 55: motor de la herramienta

Dentro del esquema elegimos la pestaña *Engine* y en el desplegable seleccionamos *Standard Lineal Problem*. Como vemos en la Figura 55, tenemos 1092 variables y 1156 restricciones.

Seguidamente, en la pestaña *Output* se elige la opción *Solve* y automáticamente la herramienta comienza a calcular la solución óptima del problema. En este caso (ver Figura 56), la solución se ha obtenido en 4 minutos y 39 segundos, que vuelve a ser un tiempo más que abordable.

Solver Options and Model Specifications

Model Platform Engine Output

---- Start Solve ----
 No uncertain input cells.
 Using: Full Reparse.
 Parsing started...
 Diagnosis started...
 Convexity testing started...
 Model diagnosed as "LP/MIP".
 User engine selection: Standard LP/Quadratic
 Model: [resolucion problema binario solver
 Hoja6
 Using: Psi Interpreter
 Parse time: 2,21 Seconds.

 Engine: Standard LP/Quadratic
 Setup time: 0,06 Seconds.

 Engine Solve time: 3 Minutes, 19 Seconds.

Integer solution found within tolerance.
 Solve time: 4 Minutes, 39 Seconds.

Best Integer Objective	7,17428e+013
Current Objective	71742825055167,7
Nodes	10460
Iterations	0
Relaxed Objective	8,08726e+012
Best Possible Objective	7,12215e+013
Integer Gap	0,00731982

Figura 56: resultado

Tarea i	Descripción	Precedentes	Ti(min)	Estación																
				X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14			
10	POSICIONAMIENTO DE LA CUADERNA FRONTERA EN GRADA	0	20,00	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	TALADRAR CUADERNA SOLDADA	0	46,01	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	SITUAR REVESTIMIENTO EN GRADA	10, 20	19,00	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	TALADRADO DE CUADERNA FRONTERA SUP.	30	94,99	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	TALADRADO DE CUADERNA FRONTERA INF.	30	95,02	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	TALADRADO DE ALETAS HORIZONTALES	30	58,61	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	TALADRADO DE ALETA VERTICAL	30	43,79	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	TALADRADO PARA HOUSING	30	56,58	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	SACAR DEPÓSITO DE GRADA	40, 45, 50, 60, 70	16,00	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	TALADRADO DE TAPAS	0	124,29	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
90	TALADRAR BOCA LLENADO	75	85,71	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	TRABAJOS PREVIOS CUADERNA A2810404-001	0	16,86	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
110	TALADRADO CUADERNA A2810404-001	75, 100	85,29	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	TALADRADO CUADERNA A2810403-001	75	103,86	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
130	TALADRADO CUADERNA A2810402-001	75	154,00	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
140	TALADRADO CUADERNA A2810401-003	75	95,69	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
150	TALADRADO PREVIO DE SOPORTES	75	33,70	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
160	TALADRADO DEFINITIVO DE SOPORTES	150	39,06	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
170	TALADRADO Y EQUIPADO DE TUBO SOBREPRESIÓN	160	74,32	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	TALADRADO DE RECEPTÁCULOS	75	44,43	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
190	TALADRADO DE VÁLVULA DE DRENAJE	75	36,53	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	TALADRADO DE DRENAJES	20	36,26	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
210	REMACHADO DE TUERCAS REMACHABLES CUADERNA SOLDADA	75, 200	82,33	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
220	REMACHADO DE STRAP A CUADERNA 401	140	35,44	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
230	REMACHADO DE STRAP A CUADERNAS 404	110	36,49	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
235	REMACHADO DE STRAP A CUADERNAS 403	120	34,40	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240	REALIZAR ZONAS DE MASA	170, 180, 230	51,33	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250	EMPASTADO 1ª FASE	130, 235, 240	240,00	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
260	REMACHADO CUADERNA A2810402-001	250	237,27	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
270	REMACHADO RECEPTÁCULOS A2810544-001	250	62,73	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
280	REMACHADO CUADERNA A2810403-001	250	80,28	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
290	REMACHADO CUADERNA A2810404-001	250	69,72	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	SELLANTE 1ª FASE	260, 270, 280, 290	480,00	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
310	REMACHAR TUBO EQUIPADO Y BARRA	300	70,77	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
320	REMACHAR SOPORTES	300	73,55	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
330	REMACHAR CUADERNA A2810401-003	220, 310, 320	237,77	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
340	REMACHAR VÁLVULA	190, 300	37,91	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
350	REMACHAR CUADERNA FRONTERA	330, 340	210,00	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
360	REMACHAR REFUERZO	90, 300	165,48	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
365	REMACHAR ADAPTADOR BOCA DE LLENADO	360	104,52	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
370	FIJAR CONJUNTO EN GRADA	350	33,00	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
380	TALADRAR CUADERNA	370	31,68	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
390	TALADRAR PUNTOS DE FIJACIÓN	370	24,40	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400	TALADRADO PREVIO DE HOUSING Y ALETAS	380, 390	127,45	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
410	TALADRADO DEFINITIVO DE ALETA VERTICAL	400	62,20	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
420	TALADRADO DEFINITIVO DE ALETAS HORIZONTALES	400	77,73	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
430	TALADRADO DEFINITIVO DE HOUSING	400	95,97	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
440	TALADRAR RECEPTORES	400	27,56	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
450	SITUAR HOUSING PROVISIONAL	410, 420, 430, 440	18,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
460	SITUAR CARTELA 441 Y ANGULAR 444 Y TALADRAR	450	33,81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
470	FIJAR ÚTIL MITAX-01-A2810507-931	450	25,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
480	SITUAR CARTELAS 442 Y 768, ANGULARES 454 Y 770 Y DIAFRAGMA	470	38,76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
490	SITUAR TAPAS 478 Y 479 Y TALADRAR CONJUNTO	460, 480	94,26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
500	TALADRAR ANGULARES 444, 770, 454, CARTELA 768 Y DIAFRAGMA	460, 480	46,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
510	SITUAR HERRAJE A2812112-401 Y TALADRAR	460, 480	25,86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
520	INSTALAR SOPORTES Y PROTECTORES	500, 510	44,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
530	REMACHAR ANGULARES	490, 500, 510	54,67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
540	INSTALAR HOUSING	530	37,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
550	MONTAR MAZO Y REMACHAR HERRAJE	520, 540	29,93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
560	REMACHADO DE CARTELA 768	520, 540	31,90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
580	AVELLANADO PILÓN	490	236,38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
590	REMACHADO DIAFRAGMA	520, 540	36,78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
600	REMACHADO DE CARTELAS	550, 560, 580, 590	206,83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
620	PROTEGER ENCAPSULADO Y CORDÓN	600	19,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
630	SITUAR TAPAS Y REMACHAR	620	179,52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
640	EQUIPAR ALETA VERTICAL	630	34,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
650	TALADRAR ALETA VERTICAL	630	58,30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
660	MONTAR STRAP Y ALETA VERTICAL	640, 650	84,49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
670	MONTAR ALETAS HORIZONTALES	630	75,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
680	FORMAR E INSTALAR VÁLVULA DE SOBREPRESIÓN	630	28,90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
690	SELLANTE 2ª FASE	210, 365, 660, 670, 680	480,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
700	INSTALAR AFORADORES Q237KTU1	690	54,14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
710	INSTALAR BRIDA Y CONECTAR MAZO A2812523-403	690	44,36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
720	INSTALAR MAZO A2812525-403	690	34,57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
730	EQUIPAR E INSTALAR TUBO A2811825-401	690	69,14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
740	INSTALAR VÁLVULA DE DRENAJE JN0313-1	690	19,89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
750	MONTAR BRIDA SOBRE SOPORTE A2811864-001	690	17,89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
760	PRUEBAS	0, 710, 720, 730, 740, 7	240,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Figura 57: resultado problema posteriores

5.4. Análisis de Resultados

En este apartado se analizarán los resultados obtenidos por los métodos de Helgeson y Birnie y de White. En primer lugar se realizará una comparativa del reparto de tareas por estaciones obtenido por cada método, para comprobar si en ambos casos el reparto es similar, o si por el contrario varía mucho la línea de montaje. A continuación se calculará la eficiencia de la línea y se analizará el tiempo ocioso resultante para cada estación. Por último se mostrará la línea con las fases de sellante integradas.

5.4.1. Resultados línea de montaje depósitos anteriores

Tabla 32: comparativa tareas por estación anteriores

Reparto de tareas por estaciones según método de Helgeson & Birnie.

Estación	Tarea i	Ti	T.C.=480
1	110	124,29	355,71
	10	20,00	335,71
	20	19,00	316,71
	40	187,55	129,16
	30	42,25	86,91
	90	54,36	32,55
2	50	173,25	306,75
	60	36,40	270,34
	130	56,68	213,67
	120	155,87	57,80
	70	56,77	1,03
3	140	265,06	214,94
	100	76,42	138,53
	80	85,71	52,82
SELLADO 1ª FASE			
4	160	310,00	170,00
	180	123,19	46,81
5	190	207,83	272,17
	170	176,28	95,89
	200	40,70	55,19
SELLADO 2ª FASE			
6	220	143,40	336,60
	230	303,60	33,00

Reparto de tareas por estaciones según algoritmo de White.

Estación	Tarea i	Ti	T.C.=480
1	10	20,00	460,00
	20	19,00	441,00
	30	42,25	398,75
	40	187,55	211,20
	80	85,71	125,49
	110	124,29	1,20
2	50	173,25	306,75
	60	36,40	270,34
	70	56,77	213,58
	90	54,36	159,22
	100	76,42	82,80
	130	56,68	26,12
3	120	155,87	324,13
	140	265,06	59,08
SELLADO 1ª FASE			
4	170	176,28	303,72
	190	207,83	95,89
5	160	310,00	170,00
	180	123,19	46,81
	200	40,70	6,11
SELLADO 2ª FASE			
6	220	143,40	336,60
	230	303,60	33,00

Como se puede observar en la Tabla 32, ambos métodos han dado resultados similares en la repartición de tareas por estación. En los dos casos han salido 6 estaciones (más 2 de sellante) y las fases de sellante ocupan el mismo lugar dentro del proceso de montaje.

Tabla 33: tiempos ociosos anteriores

Estación	Tiempo ocioso (min)	
	Helgeson & Birnie	White
1	32,55	1,20
2	1,03	26,12
3	52,82	59,08
4	46,81	95,89
5	55,19	6,11
6	33,00	33,00
Suma	221,40	221,40
Promedio	36,90	36,90
Desviación	20,03	35,57

La eficiencia de la línea se calcula como:

$$\%Eficiencia = 1 - \frac{\text{Suma de los tiempos ociosos}}{N^{\circ} \text{ de estaciones} * \text{tiempo de ciclo}} = 1 - \frac{221.40}{6 * 480} = 92,3\%$$

En la Tabla 33 están indicados los tiempos ociosos, su promedio (igual en ambos casos) y la desviación típica de los mismos. Como vemos, la desviación es mayor para el resultado obtenido por método exacto, que por heurística. Analizando los valores individualmente se observa que según el método de White la estación 4 tiene un tiempo ocioso de más de una hora y media (de ahí el mayor valor en la desviación típica). A priori parece que el resultado obtenido por el método de Helgeson y Birnie sería el más conveniente ya que reparte mejor los tiempos ociosos entre las estaciones. No obstante, si se eligiera el resultado del método exacto, podría derivarse al operario de la estación 4 durante esa hora y media a realizar otras tareas de la empresa.

En la Figura 60 se muestra cómo quedará la línea con las fases de sellante integradas. Como se puede observar, la segunda fase de sellante caerá en medio de los pulsos P2.2 y P2.3, en los que

trabaja un mismo operario. Esto no será un problema puesto que tras finalizar el pulso P2.2, el operario entregará su depósito a la sala de sellante (donde permanecerá 3 días), y en el siguiente turno de trabajo, pulso P2.3, cogerá un depósito diferente que proviene de dicha sala (el mismo que justo habría entregado 3 días antes). Por tanto, el flujo del depósito será continuo y pasarán 12 días desde que entra hasta que sale terminado de la línea.

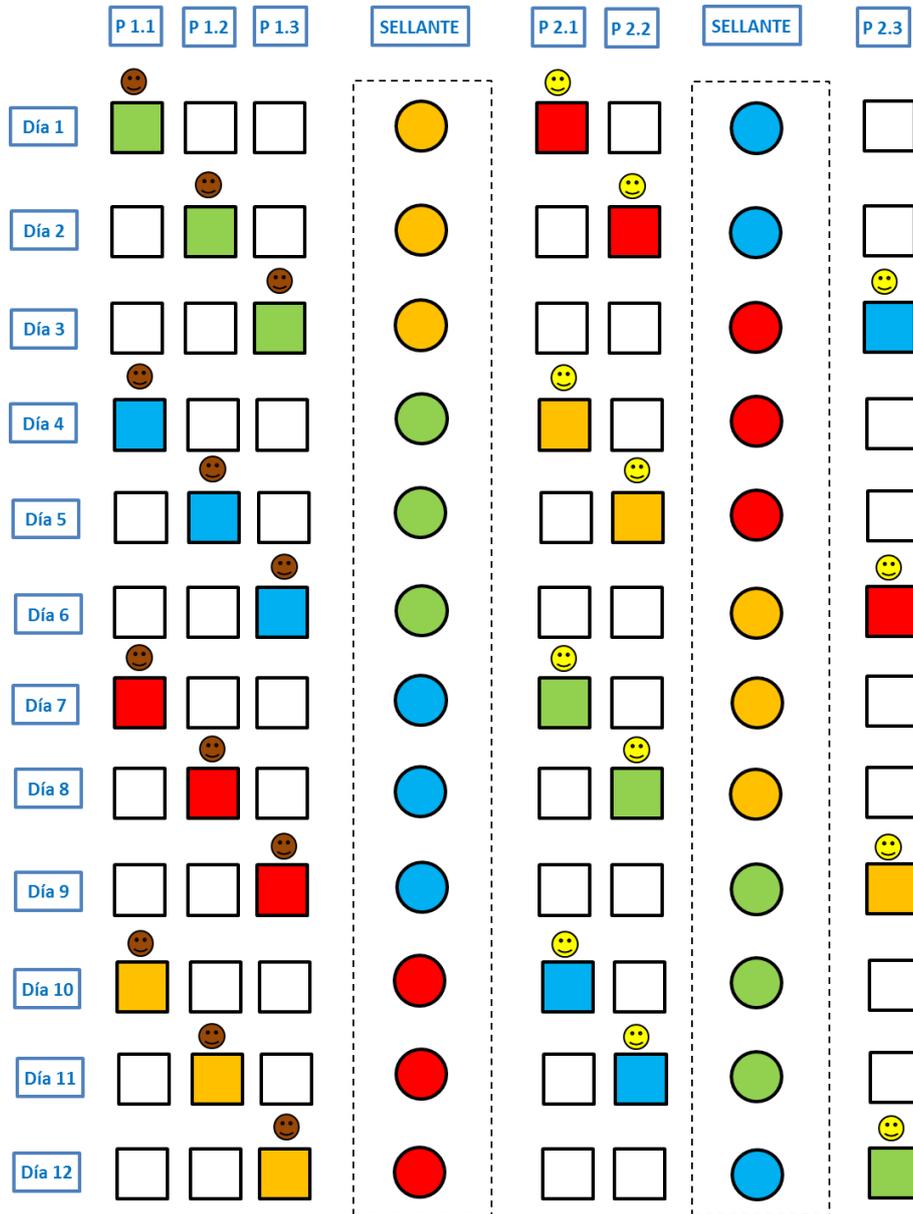


Figura 60: representación gráfica de la línea de anteriores con fases de sellante

5.4.2. Resultados línea de montaje depósitos posteriores

Tabla 34: comparativa tareas por estación posteriores

Reparto de tareas por estaciones según método de Helgeson & Birnie.

Estación	Tarea i	Ti	T.C.=480
1	80	124,29	355,71
	20	46,01	309,71
	10	20,00	289,71
	30	19,00	270,71
	40	94,99	175,71
	45	95,02	80,70
	50	58,61	22,08
	100	16,86	5,23
2	70	56,58	423,42
	60	43,79	379,63
	75	16,00	363,63
	150	33,70	329,93
	110	85,29	244,64
	160	39,06	205,58
	130	154,00	51,58
3	120	103,86	376,14
	170	74,32	301,82
	230	36,49	265,32
	180	44,43	220,90
	240	51,33	169,56
	235	34,40	135,17
	140	95,69	39,48
	220	35,44	4,03
4	250	240,00	240,00
	260	237,27	2,73
5	280	80,28	399,72
	290	69,72	330,00
	270	62,73	267,27
	190	36,53	230,74
	90	85,71	145,02
	200	36,26	108,76
	210	82,33	26,42
	SELLANTE 1ª FASE		
6	320	73,55	406,45
	310	70,77	335,68
	330	237,77	97,91

Reparto de tareas por estaciones según algoritmo de White

Estación	Tarea i	Ti	T.C.=480
1	10	20,00	460,00
	20	46,01	413,99
	30	19,00	394,99
	45	95,02	299,98
	50	58,61	241,36
	70	56,58	184,78
	80	124,29	60,50
	100	16,86	43,64
	200	36,26	7,37
	2	40	94,99
60		43,79	341,22
75		16,00	325,22
90		85,71	239,50
110		85,29	154,22
150		33,70	120,51
160		39,06	81,45
190		36,53	44,92
3	230	36,49	8,43
	120	103,86	376,14
	140	95,69	280,45
	170	74,32	206,13
	180	44,43	161,70
	220	35,44	126,26
	235	34,40	91,86
	240	51,33	40,53
4	130	154,00	326,00
	250	240,00	86,00
	270	62,73	23,27
5	210	82,33	397,67
	260	237,27	160,40
	280	80,28	80,12
	290	69,72	10,40
SELLANTE 1ª FASE			
6	310	70,77	409,23
	320	73,55	335,68
	340	37,91	297,77

	340	37,91	60,00
	350	210,00	270,00
7	360	165,48	104,52
	365	104,52	0,00
	370	33,00	447,00
	380	31,68	415,32
	390	24,40	390,92
8	400	127,45	263,46
	430	95,97	167,49
	420	77,73	89,77
	410	62,20	27,56
	440	27,56	0,00
	450	18,00	462,00
	470	25,00	437,00
	480	38,76	398,24
	460	33,81	364,43
	490	94,26	270,17
9	500	46,01	224,16
	510	25,86	198,30
	530	54,67	143,62
	520	44,00	99,62
	540	37,79	61,83
	560	31,90	29,93
	550	29,93	0,00
	580	236,38	243,62
10	590	36,78	206,83
	600	206,83	0,00
	620	19,00	461,00
	630	179,52	281,48
	650	58,30	223,18
11	640	34,00	189,18
	660	84,49	104,69
	670	75,79	28,90
	680	28,90	0,00
SELLANTE 2ª FASE			
	730	69,14	410,86
	700	54,14	356,71
	710	44,36	312,36
12	720	34,57	277,79
	740	19,89	257,89
	750	17,89	240,00
	760	240,00	0,00

	360	165,48	132,29
	365	104,52	27,77
7	330	237,77	242,23
	350	210,00	32,23
	370	33,00	447,00
	380	31,68	415,32
	390	24,40	390,92
8	400	127,45	263,46
	410	62,20	201,26
	420	77,73	123,53
	430	95,97	27,56
	440	27,56	0,00
	450	18,00	462,00
	460	33,81	428,19
	470	25,00	403,19
	480	38,76	364,43
	490	94,26	270,17
9	500	46,01	224,16
	510	25,86	198,30
	520	44,00	154,30
	530	54,67	99,62
	540	37,79	61,83
	550	29,93	31,90
	560	31,90	0,00
	580	236,38	243,62
10	590	36,78	206,83
	600	206,83	0,00
	620	19,00	461,00
	630	179,52	281,48
	640	34,00	247,48
11	650	58,30	189,18
	660	84,49	104,69
	670	75,79	28,90
	680	28,90	0,00
SELLANTE 2ª FASE			
	700	54,14	425,86
	710	44,36	381,50
	720	34,57	346,93
12	730	69,14	277,79
	740	19,89	257,89
	750	17,89	240,00
	760	240,00	0,00

Observando la Tabla 34 vemos que de nuevo ambos métodos han dado resultados similares en la repartición de tareas por estación. En los dos casos han salido 12 estaciones (más 2 de sellante) y las fases de sellante ocupan el mismo lugar dentro del proceso de montaje.

Tabla 35: tiempos ociosos posteriores

Estación	Tiempo ocioso (min)	
	Helgeson & Birnie	White
1	5,23	7,37
2	51,58	8,43
3	4,03	40,53
4	2,73	23,27
5	26,42	10,40
6	60,00	27,77
7	0,00	32,23
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
Suma	150,00	150,00
Promedio	12,50	12,50
Desviación	21,61	14,62

La eficiencia de la línea se vuelve a calcular como:

$$\%Eficiencia = 1 - \frac{\text{Suma de los tiempos ociosos}}{\text{N}^\circ \text{ de estaciones} * \text{tiempo de ciclo}} = 1 - \frac{150}{12 * 480} = 97.4\%$$

En la Tabla 35 se indican los tiempos ociosos, su promedio (igual en ambos casos) y la desviación típica de los mismos. Como vemos, en este caso la desviación es menor para el resultado obtenido por el método de White, por lo que sería el más conveniente para nuestra línea ya que reparte mejor los tiempos ociosos entre las estaciones.

En la Figura 61 se muestra cómo quedará la línea con las fases de sellante integradas. Al igual que en el caso anterior, el flujo del depósito será continuo y pasarán 18 días desde que entra hasta que sale terminado de la línea.

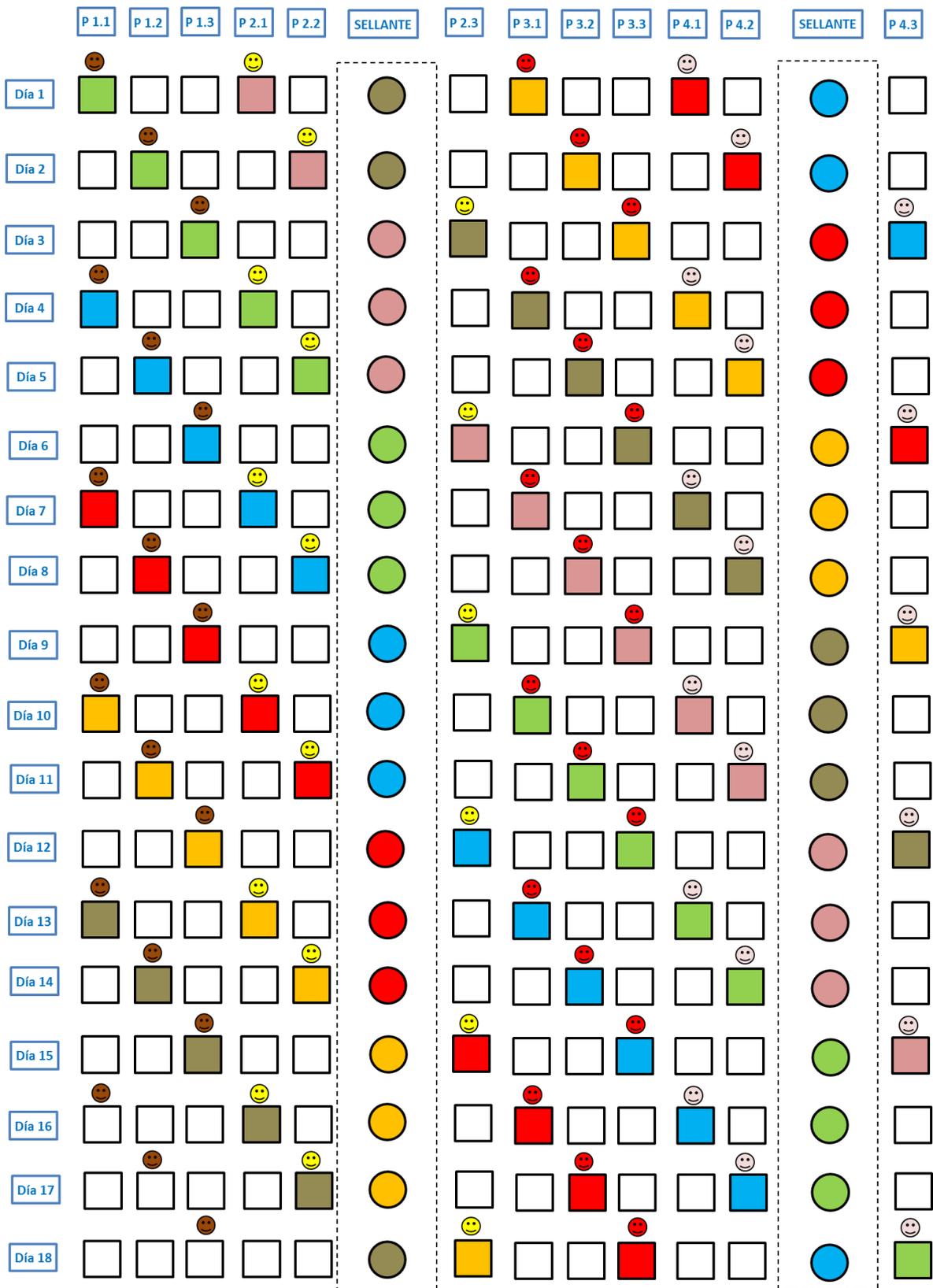


Figura 61: representación gráfica de la línea de posteriores con fases de sellante

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con el cambio del proceso de fabricación, pasando de un sistema de estaciones de montaje independientes, a un sistema de estaciones de montaje en serie son notables.

Con las mejoras introducidas descritas en el VSM futuro (punto 4.4), se ha conseguido disminuir los tiempos que no añadían valor al producto: los operarios no necesitan desplazarse por el área en busca de normales y piezas, pudiendo estar la mayor parte de su jornada produciendo en su estación de trabajo. Con los carros de herramientas y las instrucciones gráficas de montaje los niveles de defectología han bajado considerablemente, por lo que se reduce el tiempo que se dedicaba a los retrabajos. Con la introducción del sistema de control de tiempos se tiene mucho más controlada la producción, pudiendo acortarse los procesos que tienen más variabilidad en tiempos y buscar así de manera más eficiente la causa del problema y sus soluciones.

Los niveles de producción no han aumentado, debido a que el cliente ha mantenido su demanda constante. No obstante, se sigue fabricando lo mismo con 3 operarios menos (a los que se ha derivado a otros programas de la empresa con más carga de trabajo), por lo que se produce un ahorro considerable para el programa. Teniendo en cuenta que el coste por hora de operario está estimado en 30€, el ahorro mensual y anual que se produce en el programa se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ahorro mensual} = N^{\circ} \text{ operarios} * \frac{\text{horas operario}}{\text{mes}} * \text{coste operario } \text{€} / \text{hora} = 14400\text{€} / \text{mes}$$

$$\text{Ahorro anual} = N^{\circ} \text{ operarios} * \frac{\text{horas operario}}{\text{año}} * \text{coste operario } \text{€} / \text{hora} = 172800\text{€} / \text{año}$$

Este ahorro permite a la empresa ajustar sus márgenes de beneficio y ser más competitiva en la búsqueda de nuevos paquetes de trabajo.

A continuación se presentan los tiempos que se empleaban anteriormente en la fabricación de depósitos (Tabla 36), y los que se emplean actualmente (Tabla 37):

Tabla 36: tiempos anteriores a la implantación de la línea de montaje

	Horas/av.	Aviones/mes	Nº Operarios	Horas/mes
Anterior	80	6	3	480
Posterior	133,3	6	5	800
Integración	53,3	3	1	160
Subconjuntos	26,7	6	1	160
Horas totales:				1600

Tabla 37: tiempos posteriores a la implantación de la línea de montaje

	Horas/av.	Lead Time ¹³	Aviones mes	Nº Operarios	Horas/mes
Anterior	44,3	48	6	2	265,8
Posterior	93,5	96	6	4	561
Integración	16	16	3	1	48
Subconjuntos	19,5	19,5	6		117
Horas totales:					991,8

Representando en forma de columnas los tiempos mensuales se obtiene el siguiente gráfico (Figura 62):

¹³ Es el tiempo que transcurre desde que se comienza un proceso de producción hasta que se completa. En este proyecto el Lead Time corresponde a la suma de los tiempos de cada pulso.

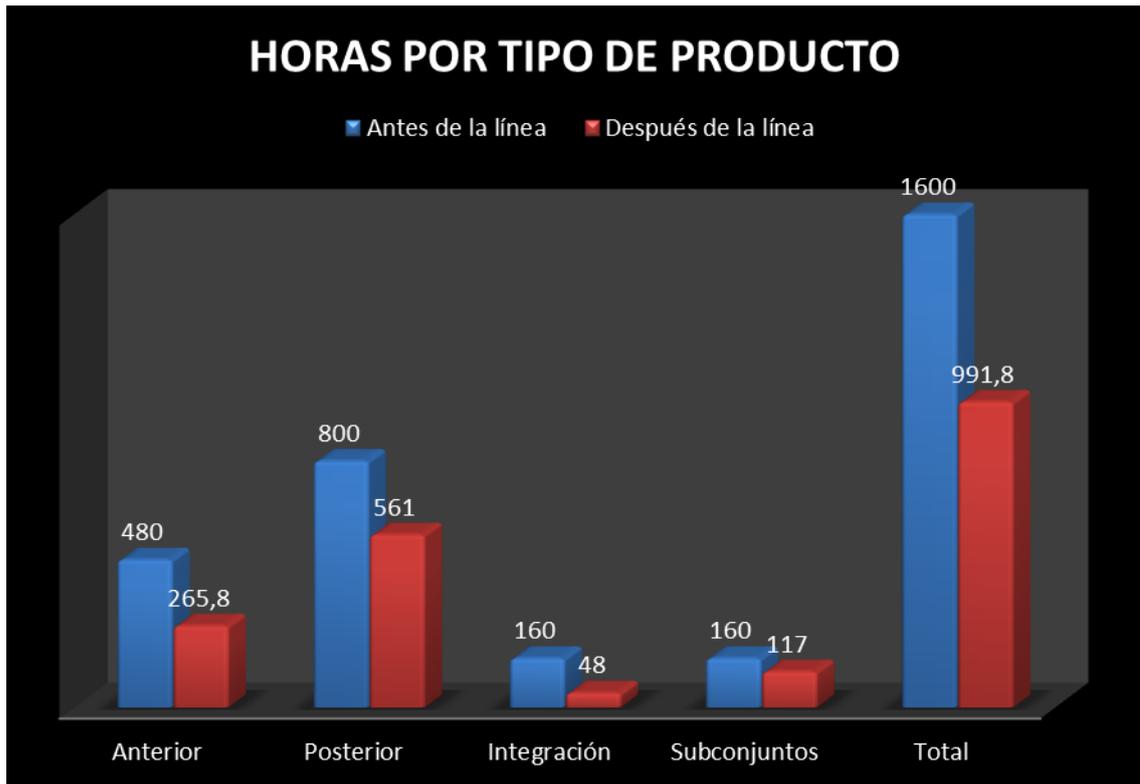


Figura 62: horas por tipo de producto

Para realizar una comparativa de estos tiempos se utilizará un indicador denominado Ratio de valor añadido:

$$\%RVA = \frac{\textit{Tiempo de valor añadido}}{\textit{Lead Time total}}$$

Se comienza analizando la fabricación de depósitos anteriores. Gracias al control de tiempos se sabe que las tareas que añaden valor a la producción de un anterior suman 44.3 horas. El Lead Time antes de la implantación de la línea se puede considerar que eran 80 horas, y el Lead Time actual 48 horas, por lo que el ratio será:

$$\%RVA_{anterior} = \frac{44.3}{80} = 55.4\% \quad \%RVA_{actual} = \frac{44.3}{48} = 92.3\%$$

O lo que es lo mismo, el 44.6% de las tareas que se realizaban se podían considerar desperdicios. Actualmente se sigue teniendo un 7.7% de valor no añadido, que como vimos en el punto 5.4.1 son los tiempos ociosos de la línea.

Para los depósitos posteriores se tiene:

$$\%RVA_{anterior} = \frac{93.5}{133.3} = 70.1\% \quad \%RVA_{actual} = \frac{93.5}{96} = 97.4\%$$

Y para los tiempos globales de la línea:

$$\%RVA_{anterior} = \frac{173.3}{293.3} = 59.1\% \quad \%RVA_{actual} = \frac{173.3}{179.5} = 96.5\%$$

Por último, concluir que mediante la realización de este proyecto y su implantación en la empresa se ha conseguido reducir los tiempos de fabricación de depósitos de combustible en un 38%, con una reducción del 30% de la plantilla. A partir de aquí, la línea de trabajo que habrá que seguir en el programa deberá ser:

- Adaptación de la línea a posibles variaciones de la demanda del cliente.
- Mejora de los procesos para reducir los tiempos de las tareas.
- Reducir al mínimo los tiempos ociosos.
- Mejorar el proceso de aplicación de sellante para acortar su Lead Time.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Baybars, I. (1986). A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science*, 32, 909-932.
- Cabrera Calva, R. C. (2014). *TPS Americanizado: Manual de Manufactura Esbelta*.
- Capacho Betancourt, L., & Pastor Moreno, R. (Abril de 2004). *Generación de secuencias de montaje y equilibrado de líneas*. Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials.
- Cuatrecasas, L. (2005). *Gestión Integral de la Calidad: Implantación, Control y Certificación*. Barcelona: Ediciones Gestión 2000.
- Draw. (s.f.). Recuperado el 03 de 2018, de <https://www.draw.io/>
- FrontlineSolvers. (s.f.). Recuperado el Marzo de 2018, de Advanced Analytics Tools for Excel: <https://www.solver.com/>
- Ghosh, S., & Gagnon, R. J. (1989). A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal of production research*, vol. 27, no. 4, 637-670.
- Helgeson, W. B., & Birnie, D. P. (1961). Assembly line balancing using Ranked Positional Weight Techniques. *Journal of Industrial Engineering*, Vol 12, 394-398.
- <http://leanmanufacturingtools.org>. (s.f.). Recuperado el 2018, de <http://leanmanufacturingtools.org/549/vsm-value-stream-mapping/>
- Jones, D. T., & Womack, J. P. (2003). *Lean Thinking*. Barcelona: Gestión 2000.
- López Aguilar, J. J., Riesco Ávila, J. M., Gallegos Muñoz, A., & Rodríguez Cruz, R. Á. (2009). Acercamiento al balanceo de líneas de producción y rotación de personal con discapacidad y máxima productividad. *Memorias del XV Congreso Internacional Anual de la Sonim*. CD. OBREGÓN, SONORA. MÉXICO.
- Plans, J. (1999). Classificació, modelització i resolució dels problemes de disseny i assignació de tasques en línies de producció. *Tesis Doctoral. UPC*.
- Rekiek, B., & Delchambre, A. (2006). *Assembly Line Design: The Balancing of Mixed-Model Hybrid Assembly Lines with Genetic Algorithms*. London : Springer-Verlag.
- Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A., & Bratcu, A. (2002). State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control*, Vol. 26, 163-174.
- Scholl, A. (1999). *Balancing and sequencing of Assembly lines*. Physica-Verlag.
- Scholl, A., & Becker, C. (2003). A survey on problems and methods in generalized assembly line. *European Journal of Operational Research*.
- Scholl, A., & Becker, C. (2003). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. Friedrich-Schiller-Universität Jena.

Servin Ochoa, D. (Marzo de 2013). Equilibrado de líneas de ensamble en la industria del vestido: un enfoque mediante algoritmos genéticos híbridos. *Instituto Politécnico Nacional*.

TOYOTA PRODUCTION SYSTEM BASIC HANDBOOK. (s.f.). Recuperado el Abril de 2018, de www.artoflean.com

White, W. W. (1961). Comments on a paper by Bowman. *Operations Research*, Vol.9, 274-276.