

Trabajo Fin de Máster

Organización Industrial y Gestión de Empresas

Impacto de la curva de aprendizaje en la fecha de terminación de pedidos en una línea a pulso

Autor: Carlos Alberto Dios Rubio

Tutor: Pedro Luis González Rodríguez

Cotutor: José Luis Andrade Pineda

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

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Máster
Organización Industrial y Gestión de Empresas

Impacto de la curva de aprendizaje en la fecha de terminación de pedidos en una línea a pulso

Autor:

Carlos Alberto Dios Rubio

Tutor:

Pedro Luis González Rodríguez

Profesor titular

Cotutor:

José Luis Andrade Pineda

Profesor Sustituto Interino

Dep. Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

TFM: “Impacto de la curva de aprendizaje en la fecha de terminación de pedidos en una línea a pulso”

Autor: Carlos Alberto Dios Rubio

Tutor: Pedro Luis González Rodríguez

Cotutores: José Luis Andrade Pineda

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia.

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mis padres, Manuel y Laura, que han trabajado muy duro para poder darnos, a mis hermanos y a mí, una buena educación y nos han permitido estudiar aquello que hemos querido, en el lugar que hemos querido. Por supuesto, también agradecer a mis hermanos, Manu y Dani, que me han ayudado siempre tanto a nivel académico como a nivel personal.

También quiero dar las gracias a Rocío que me ha ayudado en los momentos en los que más lo necesitaba.

No quiero olvidar a mis abuelos, los que me encantaría que estuviesen a mi lado para poder ver como sus nietos han alcanzado aquello por lo que trabajaron tantas y tantas horas. Sin ellos no hubiese sido posible.

Por último, me gustaría agradecer a Pedro Luis por su ayuda y paciencia que me han permitido desarrollar y escribir el presente Trabajo Fin de Máster.

Carlos Alberto Dios Rubio

Sevilla, 2016

Resumen

Las empresas de fabricación que trabajan en la industria aeronáutica cuentan con un límite de tiempo que deben cumplir para satisfacer las necesidades de la demanda, este límite se conoce como Takt Time. Gracias al aprendizaje obtenido por los operarios tras realizar las tareas es posible reducir el tiempo que emplean en hacer dichas tareas, con lo que es posible terminar los trabajos antes del Takt Time. Esta reducción en los tiempos es fundamental debido a que permite mejoras, puesto que en el mismo tiempo pueden realizarse más unidades o incluso requerir una menor plantilla para realizar el mismo trabajo, pudiendo usar a los operarios sobrantes en otras tareas que requieran apoyo o dimensionar de forma más adecuada la plantilla.

Por ello el objetivo del presente Trabajo Fin de Máster se centra en analizar el impacto que tiene el aprendizaje de los operarios en la reducción de tiempos en un sistema de producción a pulso en tres escenarios diferentes: minimizar el C_{max} (tiempo en el que todas las tareas se han terminado de procesar), minimizar el número de trabajadores para un Takt Time dado y por último, equilibrar la carga de trabajo entre los operarios.

Abstract

Manufacturing companies working in the aerospace industry have a time constraint that must be accomplished to meet the needs of the demand, this limit is known as Takt Time. Due to the learning obtained by the operators after performing the tasks, it is possible to reduce the time that they use in doing such tasks, which make it possible to complete work before the Takt Time. This reduction in time is fundamental because it allows improvements, since at the same time can be realized more units or even require a smaller workforce to do the same work, being able to use surplus workers in other tasks that require support or sizing properly the staff.

For this reason, the aim of this Master's Final Project is to analyze the impact of the learning of the workers on the reduction of time in a pulse production system in three different scenarios: minimize the C_{max} (time in which all tasks have been processed), minimize the number of workers for a given Takt Time and finally, balance the workload between the operators.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiii
Índice de Figuras	xv
1. Objeto y Justificación	1
1.1. <i>Objeto del proyecto</i>	1
1.2. <i>Justificación</i>	1
1.3. <i>Sumario</i>	2
2. Estado del Arte	3
2.1. <i>Contexto actual de la Industria Aeronáutica en Andalucía</i>	3
2.2. <i>Revisión Bibliográfica</i>	7
2.2.1. <i>Asignación de tareas en un Sistema Tipo Taller</i>	7
2.2.1.1. <i>JSP (Job-Shop Scheduling Problem)</i>	7
2.2.1.2. <i>JSO (Job-Shop Scheduling Problem with Operators)</i>	8
2.2.1.3. <i>JSSO (Job-Shop Scheduling Problem with Skilled Operators - Arbitrary Precedence Relations)</i>	8
2.2.1.4. <i>JSPSO (Job-Shop Scheduling Problem with Skilled Operators – Precedence Relations)</i>	9
2.1.2. <i>Aprendizaje</i>	9
3. Modelado del Problema JSPSTO	12
3.1. <i>Introducción</i>	12
3.2. <i>Hipótesis de partida</i>	12
3.3. <i>Modelo General</i>	13
3.3.1. <i>Conjuntos, Variables y Parámetros</i>	13
3.3.2. <i>Modelo matemático I: Minimizar makespan</i>	15
3.4. <i>Modelo matemático II: Minimizar trabajadores usados</i>	17
3.5. <i>Modelo Matemático III: Equilibrado de la carga de trabajo</i>	19
4. Experiencia Computacional	21
4.1. <i>Casos estudiados</i>	21
4.2. <i>Escenario I: Influencia de la curva de aprendizaje en Cmax</i>	22
4.3. <i>Escenario II: Efecto de la curva de aprendizaje en el uso de la plantilla</i>	26
4.4. <i>Escenario III: Equilibrado de la carga de trabajo</i>	30
4.4.1 <i>Escenario III.1: Equilibrado individual en cada iteración</i>	30

4.4.2 Escenario II.2: Equilibrado de la carga acumulada	36
4.4.3 Escenario II.3: Equilibrado de la carga para un número máximo de operarios dado	42
5. Conclusiones y futuras líneas de investigación	47
5.1. Conclusiones	47
5.2. Contribuciones del Trabajo	48
5.3. Implicaciones a nivel práctico	48
5.4. Futuras líneas de investigación	49
6. Bibliografía	50

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Fabricación celular.	5
Figura 2.2. Una máquina en un Job Shop	5
Figura 2.3. Tipos de sistemas productivos	6
Figura 2.4. Curva de aprendizaje	9
Figura 2.5. Job Shop Scheduling Problems	11
Figura 4.1. Gráfico de precedencias	22
Figura 4.2. Matriz de tiempos de proceso (i x m)	22
Figura 4.3. Matriz de habilidades (i x o)	22
Figura 4.4. Distribución del número de tareas entre los operarios (Esc. I)	22
Figura 4.5. Distribución de tiempos realizando tareas entre los operarios (Esc. I)	23
Figura 4.6. Asignación Tarea-Operario-Máquina (Esc. I)	24
Figura 4.7. Diagrama de Gantt para Iteración 1 (Esc. I)	24
Figura 4.8. Diagrama de Gantt para Iteración 52 (Esc. I)	24
Figura 4.9. Evolución Cmax (Esc. I)	25
Figura 4.10. Distribución del número de tareas entre los operarios (Esc. II)	25
Figura 4.11. Takt Time vs Cmax' (Esc. II)	26
Figura 4.12. Asignación Tarea-Operario-Máquina en iteraciones 10 y 25 (Esc. II)	27
Figura 4.13. Diagrama de Gantt para Iteración 10 (Esc. II)	27
Figura 4.14. Diagrama de Gantt para Iteración 25 (Esc. II)	28
Figura 4.15. Diagrama de Gantt para Iteración 25 tras reproceso (Esc. II)	28
Figura 4.16. Distribución de tiempos realizando tareas entre los operarios y holguras (Esc. II)	29
Figura 4.17. Distribución del número de tareas entre los operarios (Esc. III.1)	30
Figura 4.18. Takt Time vs Cmax' (Esc. III.1)	31
Figura 4.19. Asignación Tarea-Operario-Máquina en iteraciones 1 y 17 (Esc. III.1)	31
Figura 4.20. Diagrama de Gantt para Iteración 1 (Esc. III.1)	31
Figura 4.21. Diagrama de Gantt para Iteración 17 (Esc. III.1)	32
Figura 4.22. Diagrama de Gantt para Iteración 17 tras reproceso (Esc. III.1)	32
Figura 4.23. Distribución de tiempos realizando tareas entre los operarios y holguras (Esc. III.1)	34
Figura 4.24. Tiempos acumulados (Esc III.1)	35
Figura 4.25. Distribución del número de tareas entre los operarios (Esc. III. 2)	36
Figura 4.26. Takt Time vs Cmax' (Esc. III. 2)	36
Figura 4.27. Asignación Tarea-Operario-Máquina en iteración 20 (Esc. III.2)	36
Figura 4.28. Diagrama de Gantt para Iteración 20 (Esc. III.2)	37
Figura 4.29. Diagrama de Gantt para Iteración 20 tras reproceso (Esc. III.2)	37
Figura 4.30. Distribución de tiempos realizando tareas entre los operarios y holguras (Esc. III.2)	39
Figura 4.31. Tiempos acumulados (Esc III.2)	40

Figura 4.32. Simulación III.1 vs Simulación III.2	41
Figura 4.33. Distribución del número de tareas entre los operarios (Esc. III. 3)	42
Figura 4.34. Takt Time vs Cmax' (Esc. III. 3)	42
Figura 4.35. Diagrama de Gantt para Iteración 16 (Esc. III.3)	43
Figura 4.36. Diagrama de Gantt para Iteración 16 tras reproceso (Esc. III.3)	43
Figura 4.37. Distribución de tiempos realizando tareas entre los operarios y holguras (Esc. III.3)	45
Figura 4.38. Tiempos acumulados (Esc III.3)	46

1 OBJETO Y JUSTIFICACIÓN

En este capítulo se expone el objetivo principal del proyecto, la forma en la que se aborda y las razones que justifican su elección. También se presenta un breve resumen de los capítulos en los que está estructurado el trabajo.

1.1. Objeto del proyecto

El propósito del presente Trabajo Fin de Máster es analizar el impacto que tiene el aprendizaje de los operarios en la asignación de los mismos a las tareas y la posible mejora de la eficiencia en un sistema productivo a pulso. Hay que tener en cuenta esta reducción en los tiempos de fabricación es fundamental debido a que permite mejoras ya que en el mismo tiempo pueden realizarse más unidades o incluso requerir una menor plantilla para realizar el mismo trabajo, pudiendo usar a los operarios sobrantes en otras tareas que requieran apoyo.

El objetivo del proyecto se ha abordado dividiendo el trabajo en los siguientes objetivos específicos:

1. Revisión y análisis de la literatura en busca de problemas de la minimización del makespan en configuraciones tipo Job Shop con trabajadores con diferentes habilidades y sobre la influencia que tiene el aprendizaje en la mejora de la eficiencia de los procesos.
2. Modelado y particularización para el caso estudiado, para el caso del efecto de la curva de aprendizaje en la variación de la plantilla necesaria y por último, para el caso del equilibrado de la carga de trabajo de los operarios.
3. Simulación bajo tres escenarios. Influencia de la curva de aprendizaje en el Cmax, Efecto de la misma en la plantilla y Equilibrado de la carga de trabajo entre los operarios.

1.2. Justificación

Debido a la configuración actual de la cadena de suministro en el sector aeronáutico, es de vital importancia que se cumpla con los tiempos de terminación de los pedidos. En estos tiempos influye de manera más que notable la habilidad y la experiencia de los trabajadores, por lo que la reducción de estos tiempos es un factor clave a la hora de la planificación de la producción.

De la revisión bibliográfica se ha podido extraer una falta de problemas que mezclen la minimización de los tiempos de finalización de los trabajos y la influencia en la reducción de éstos por lo que este Trabajo Fin de Máster cubre un vacío en la literatura actual. Para ello se presentan tres hipótesis o líneas de investigación. La primera consiste en observar cómo influye la experiencia

de los trabajadores en la reducción del tiempo de finalización total de un encargo, la segunda en cómo influye la habilidad de éstos gracias a la experiencia en la reducción del número de trabajadores, permitiendo que los no usados puedan centrarse en otras tareas y la tercera trata de la distribución equitativa de la carga de trabajo que tienen los operarios en la realización de las tareas.

El interés en realizar un Trabajo Fin de Máster en el campo del modelado de problemas lineales surge tras cursar en el primer cuatrimestre del Máster de Organización Industrial y Gestión de Empresas, la asignatura titulada Métodos Cuantitativos de Organización Industrial. Tras revisar información sobre el sector aeronáutico en Sevilla, el cual tiene un gran peso a nivel de empleo, descubrimos un vacío en la literatura en cuanto al efecto del aprendizaje de la plantilla en la finalización de las tareas. Por este motivo me decidí a realizar el presente trabajo.

1.3. Sumario

El proyecto está estructurado en 5 capítulos y un apartado en el que se incluyen las referencias empleadas en el trabajo. El capítulo 1, describe el objetivo del Trabajo Fin de Máster, así como el porqué de su realización y un breve sumario con el contenido de los siguientes capítulos.

En el capítulo 2 se realiza un estado del arte partiendo del contexto actual de la industria aeronáutica, detallando algunos conceptos que son importantes para la comprensión del proyecto. La revisión bibliográfica se centra en los diferentes problemas de secuenciación tipo Job Shop, con especial detalle en los que consideran que los operadores tienen diferentes habilidades para realizar las tareas, así como una revisión de la curva de aprendizaje, concepto clave en el objetivo del Trabajo.

El capítulo 3 se presenta el modelo propuesto y se comprara con el modelo usado como punto de partida.

El capítulo 4 se profundiza en las simulaciones realizadas que ponen de manifiesto la utilidad del presente Trabajo Fin de Máster.

El capítulo 5 contiene las conclusiones obtenidas tras la realización del trabajo y presente un listado de posibles líneas de mejora para el futuro.

Y por último, un apartado que indica la bibliografía usada en la realización del trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

En las siguientes páginas contenidas en este capítulo se aborda el objetivo específico presentado en el apartado 1.1. Inicialmente se contextualiza la Industria Aeronáutica en Sevilla para poner al lector en situación y a continuación se hace una revisión bibliográfica sobre la secuenciación de tareas en configuraciones tipo Taller y sobre influencia de la curva de aprendizaje en el tiempo de finalización de los trabajos.

2.1. Contexto actual de la Industria Aeronáutica en Andalucía

La Industria Aeronáutica está sufriendo grandes transformaciones a lo largo de los años, viéndose sometida a competencia global y por consiguiente al reto que supone adaptarse a los cambios tecnológicos, tanto en los productos como en los procesos productivos, y a las tendencias del entorno. Todas estas variaciones afectan al sistema de producción y son debidas principalmente a las estrategias seguidas por las dos grandes compañías aeronáuticas: Boeing y Airbus.

La búsqueda de la optimización de los procesos productivos, ha hecho que el sector aeronáutico adopte una tendencia que comenzó en el sector automovilístico cuando Taiichi Ohno desarrolló el sistema de producción Just In Time para Toyota, sistema que supuso el origen del Lean Manufacturing, una filosofía que está integrándose en toda la industria aeroespacial. El Lean Manufacturing puede definirse, según se indica en [1], como “la combinación de una serie de herramientas para ayudar a eliminar las actividades que no añaden valor al producto, servicio y/o proceso incrementando el valor de cada actividad, con el objetivo de eliminar o reducir los desperdicios y mejorar las operaciones”. Es una filosofía de trabajo que se basa principalmente en las personas y que define la forma de mejora y optimización de un sistema de producción enfocándose en identificar y eliminar todo tipo de desperdicios, entendiendo éstos como aquellos procesos o actividades que usan más recursos de los necesarios, como por ejemplo sobreproducciones, tiempos de espera, exceso de procesado, elevados inventarios, movimientos innecesarios, no conformidades, etc.

Lean no es algo estático, es una filosofía que combina distintos elementos, aplicaciones y técnicas que han surgido del estudio a pie de máquina y que están apoyadas por la dirección en el pleno convencimiento de su necesidad. Este pensamiento va evolucionando continuamente debido al aprendizaje que se va consiguiendo al implementarse y adaptar las diferentes técnicas a los distintos entornos industriales.

Aunque el Lean Manufacturing comenzó en el sector automovilístico, desde la publicación de [2]

otros sectores se decidieron a aplicar esta filosofía en sus procesos. La metodología Lean se aplica en la industria Aeroespacial Europea, no siempre con éxito ya que aún queda mucho por mejorar, desde la publicación de [3], en el que se recogen investigaciones y avances encontrados por LAI (Lean Aircraft Initiative), consorcio formado por el MIT (Massachusetts Institute of Technology), la mayoría de las compañías aeronáuticas de los EE.UU., entre las que se encontraba Boeing, y con la colaboración de las Fuerzas Aéreas Norteamericanas.

El sector aeronáutico partía de una situación en la que las empresas fabricantes de aviones estaban casi totalmente integradas, es decir, la mayoría de las operaciones y componentes requeridos en la construcción de una aeronave eran realizados por ellas mismas. Se distribuían en diferentes plantas especializadas, cada una en una parte del avión, y posteriormente se ensamblaban todas las partes en la línea final de ensamblado (FAL: Final Assembly Line). Si existía algún componente o pieza que no podían fabricar, se hacía uso de los proveedores, pero sin modificar ninguna de las especificaciones del fabricante. Este modelo permitía muy poca flexibilidad y cambio ante los continuos cambios en el mercado y en el entorno. Debido a la tendencia al alza que existe en la demanda del tráfico aéreo, estas empresas fabricantes la distribución de la cadena de suministro del sector aeronáutico se ha visto afectada. Las grandes empresas aeronáuticas han tenido que enfocarse en aquellas actividades que les aportan valor y por tanto les permiten obtener ventajas competitivas frente a los competidores y por tanto han tenido que externalizar todas las demás. Este nuevo enfoque es en el que se encuentra en la actualidad el sector aeronáutico y la mayoría de los sectores productivos.

El aumento de la demanda y la necesidad de adaptación a estos cambios, ha requerido que las grandes empresas multinacionales del sector hayan desarrollado nuevas estrategias de mejora y seguimiento de las empresas subcontratadas mediante la implantación de la filosofía Lean. Una de las tendencias actuales en línea con esta filosofía de mejora continua es la creación de polígonos industriales próximos a las líneas de ensamblaje final de los diferentes aviones, con lo que se obtiene una ventaja de tiempos en cuanto a cercanía al punto de entrega del producto.

En la actualidad los fabricantes de aviones se dedican al diseño, la integración de los sistemas o la venta entre otras, como actividades esenciales y realmente diferenciadoras respecto a sus competidores. La fabricación de piezas o el montaje de componentes ahora los realizan las empresas subcontratadas. Este modelo de subcontratación y la implicación que actualmente tiene Andalucía, principalmente Sevilla, en programas como el del A400M de Airbus, ha permitido que esta Comunidad Autónoma esté en la vanguardia de la industria aeroespacial. Actualmente en Sevilla hay aproximadamente 60 empresas situadas en el polígono Aerópolis, que se encuentra situado junto a la FAL, que se dedican al sector aeronáutico y que prestan servicios a Airbus.

Con la idea de mejorar la eficiencia del sistema de fabricación, se desarrolló lo que actualmente se

conoce como Cellular Manufacturing (Fabricación en celular). Se trata de un modelo que se basa en producir productos similares o familias de productos en células de fabricación que permitan eliminar los tiempos de ajustes de las máquinas y los costes innecesarios entre operaciones (desplazamientos de personas, transportes internos, inventarios, etc.). Cada célula es una estación de trabajo en la que las máquinas, personas y equipos están dispuestos de manera secuencial para realizar total o parcialmente un proceso determinado.

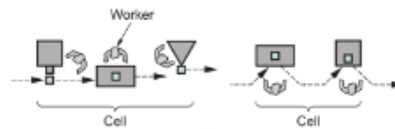


Figura 2.1 - Fabricación celular

En el presente Trabajo Fin de Máster se considera que cada una de las empresas subcontratadas que fabrican partes de un avión, que posteriormente se ensamblará en la FAL, es una célula de fabricación.

Para cada una de estas células, en este proyecto se propone que se realice una configuración tipo Job Shop con Operadores con diferentes habilidades.

Según [4], el lay-out Job Shop, también conocido por configuración tipo taller, se caracteriza porque los productos no tienen que pasar necesariamente por todos sus procesos siguiendo el mismo orden, es decir, los productos tienen una relación de procesos, secuencias y tiempos de operación particulares. En la configuración Job Shop, los productos se van moviendo por los diferentes departamentos en la secuencia requerida. Estos departamentos son agrupaciones de operarios y máquinas de acuerdo a sus funciones.

En la realidad, según [4], el flujo de trabajo no es unidireccional en una configuración Job Shop. A una máquina pueden llegar como inputs trabajos que vengan de fuera y/o de otras máquinas (como trabajo en proceso, lo que se conoce en inglés como WIP: Work In Progress), también puede ser la última máquina de un trabajo en particular e incluso una máquina intermedia.

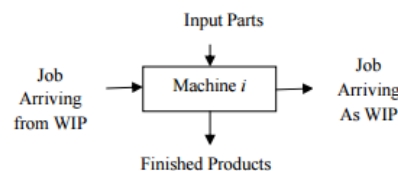


Figura 2.2 - Una máquina en un Job Shop¹

Tradicionalmente, tal y como aparece en muchas publicaciones, una de las características de la configuración Job Shop era la de estar orientado al proceso, lo que quiere decir agrupar los procesos de fabricación por tecnología. Actualmente gracias a la aplicación del Lean Manufacturing al Job Shop, las instalaciones y máquinas deben disponerse en función del producto, sin importar que

¹ Fuente: [4]

exista más de una secuencia de producción, de manera que se consigue un flujo de materiales conocido y continuo.

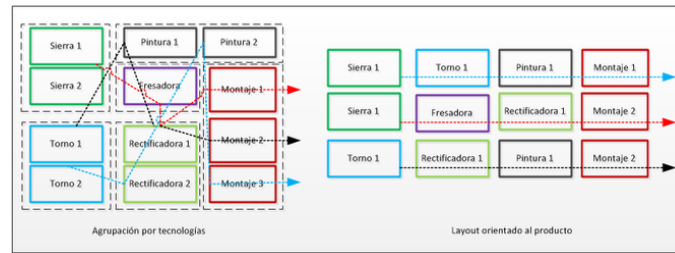


Figura 2.3 - Tipos de sistemas productivos²

Según [5], las principales ventajas de este tipo de configuración son:

- Mayor flexibilidad de producción: debido a que las máquinas que se usan suelen ser de uso general y los operarios suelen dominar más de un proceso dentro del sistema.
- Aumento del uso de las máquinas: se usan para realizar más de una tarea.

Uno de los conceptos más importantes en la industria aeronáutica es el de Takt Time. La palabra Takt viene del alemán y significa compás. El Takt Time se define como el ritmo en que los productos deben ser completados para satisfacer las necesidades de la demanda. Su valor se obtiene dividiendo el tiempo que hay disponible de trabajo en unidades temporales entre la demanda del cliente en ese periodo en unidades.

$$Takt\ Time = \frac{Tiempo\ disponible\ de\ trabajo}{Demanda\ del\ cliente}$$

El concepto de Takt Time se usa para sincronizar el ritmo de producción con el de ventas, lo que además permite alertar a los trabajadores de si se está en sobreproducción o en retraso.

Para entender mejor qué es el Takt Time, se incluye el siguiente ejemplo:

Situación de 22 días laborables por mes, con un turno que equivale a 8 horas al día lo que es igual que 480 minutos al día y los clientes demandan al mes 1.320 unidades. En este caso, el Takt Time es de 0,13 horas/unidad, lo que supone que se deben fabricar 60 unidades al día. En caso de fabricar más, se tendría una sobreproducción y en caso de fabricar menos se produciría un cuello de botella.

El factor humano es de gran importancia en la industria aeroespacial. Las organizaciones y los empleados se vuelven mejores en el desempeño de sus tareas a medida que las van repitiendo. Con esta mejora en la eficiencia se consigue por tanto que una persona pueda hacer más tareas y mejor en el mismo tiempo por lo que los costes se reducen. Este concepto se conoce como curva de aprendizaje y es muy tenida en cuenta en la industria aeronáutica para definir sus procesos. A continuación, en el apartado 2.2.2, se hace una revisión bibliográfica sobre la curva de aprendizaje que permitirá al lector comprender por qué se ha tenido en cuenta en la realización del trabajo.

² Fuente: <http://www.ingenieriaindustrialonline.com>

2.2. Revisión Bibliográfica

2.2.1 Asignación de tareas en un Sistema Tipo Taller

La gran mayoría de empresas de fabricación de componentes aeronáuticos tienen que enfrentarse diariamente a problemas de planificación en la gestión de sus líneas de producción. La planificación de talleres aparece en la literatura desde hace más de 40 años. El primer libro sobre teoría de planificación fue [6].

Dentro de los problemas de secuenciación de trabajos en máquinas, se pueden encontrar diferentes particularizaciones en cuanto al objetivo que pretende alcanzarse, este trabajo el objeto del estudio coincide con uno de los objetivos más comunes que aparecen en la literatura, minimizar el tiempo en el que se completa la última tarea planificada (lo que se conoce como makespan) ya que en la industria aeronáutica se trabaja siempre tratando de respetar el Takt Time para poder cubrir de manera correcta la demanda. El objetivo de minimización del retraso es descartado, pues suponemos que tenemos que cumplir el Takt Time fijado. Aunque en principio el estudio tiene en cuenta de partida la minimización del makespan, otros objetivos serán tenidos en cuenta como la minimización del número de operarios.

A continuación, se va a realizar una revisión bibliográfica de los problemas de asignación de tareas en un sistema tipo taller, conocidos como Job Shop Scheduling Problem. Dicha revisión permitirá al lector obtener una idea general sobre este tipo de problemas, facilitando la comprensión del modelo propuesto en el apartado 3.

Dentro de la revisión bibliográfica existen pocas referencias a problemas de tipo taller que contemplen el aprendizaje de los operarios al realizar tareas repetitivas y en ese ámbito es en el que el presente proyecto desarrolla su objeto.

2.2.1.1 JSP (Job-Shop Scheduling Problem)

El clásico JSP se define, según se indica en [7], como un conjunto de máquinas en las que se realizan una serie de tareas, con unos tiempos de proceso determinados, para completar un conjunto de trabajos. Cada trabajo tiene un orden de procesamiento específico determinado por la asignación de las tareas a las máquinas y por sus tiempos de proceso. Todo esto sujeto a las siguientes restricciones en los trabajos y las máquinas:

- No hay relaciones de precedencia entre las tareas que componen los diferentes trabajos.
- Las tareas no pueden ser interrumpidas una vez que empiezan y cada máquina puede hacer solo un trabajo la vez.
- Cada trabajo puede realizarse sólo en una máquina cada vez.

2.2.1.2 JSO (Job-Shop Scheduling Problem with Operators)

Agnētis *et al.* [8] definen el JSO como un conjunto trabajos que requieren para ser procesados un conjunto máquinas y un conjunto de trabajadores. Cada trabajo es una secuencia de tareas las cuales deben realizarse en una máquina específica en un determinado tiempo de proceso. El problema está sujeto a las siguientes restricciones:

- Una máquina puede realizar solo una tarea al mismo tiempo.
- Las tareas del mismo trabajo están ordenadas.
- No se permite la interrupción de las tareas cuando están realizándose.
- Cada tarea tiene que ser asignada a un trabajador y cada trabajador sólo puede realizar una tarea al mismo tiempo.

Se trata de una generalización del JSP, en cuanto a que en el JSP los trabajos se distribuyen en tareas y cada trabajo define una ordenación secuencial del proceso de sus tareas y en el JSO cada tarea se asigna a un trabajador disponible (todos ellos con las mismas habilidades).

2.2.1.3 JSSO (Job-Shop Scheduling Problem with Skilled Operators - Arbitrary Precedence Relations)

Como se muestra en [9] y [10], el conocido como Job-Shop Scheduling Problem with Skilled Operators and Arbitrary Precedence Relations y denotado como JSSO, se define como un conjunto de máquinas, un conjunto de operadores y una serie de tareas que deben llevarse a cabo. Para realizarse, cada tarea necesita una máquina determinada y un operario que pueda realizarla durante su tiempo de proceso, que es independiente del operario que la realice. Hay relaciones de precedencia arbitrarias entre las tareas. Y deben satisfacerse las siguientes restricciones:

- Las tareas tienen que procesarse siguiente un orden dado.
- Cada tarea debe ser asignada a un operador que tenga la habilidad de hacerla y el operador estará asignado a ella hasta que la termine.
- Dos tareas asignadas al mismo operador en la misma máquina no pueden superponerse.
- Las tareas no pueden interrumpirse.

Es importante remarcar que el problema JSSO es una generalización del JSO en cuanto a que solo un subconjunto de los trabajadores tiene las habilidades necesarias para realizar una tarea determinada, lo que se asemeja más a la realidad y puede ser de gran utilidad para ayudar a las compañías a mejorar el uso de sus recursos humanos y a planificar sus entrenamientos al personal para futuros proyectos.

2.2.1.4 JSPSO (Job-Shop Scheduling Problem with Skilled Operators – Precedence Relations)

Según se indica en [11], este problema se define como un conjunto de trabajos compuesto de una secuencia de tareas, un conjunto de máquinas y un conjunto de operarios. Para realizar cada tarea se requieren dos recursos, un operario capacitado para realizar esa tarea y una máquina asignada, además de un determinado tiempo de proceso independiente del operario que la realice. Una solución factible es aquella que consiga una asignación completa de los tiempos de comienzo y los operarios a las tareas sujeto a las siguientes restricciones:

- Las operaciones de cada trabajo están planificadas secuencialmente
- Cada máquina puede procesar como máximo una tarea al mismo tiempo.
- No puede interrumpirse el procesado de una tarea.
- Cada tarea tiene que ser asignada a un operador que pueda realizarla.
- El operador asignado a una tarea no cambia durante el tiempo de proceso.
- Un operador puede hacer solo una tarea al mismo tiempo.

Cabe indicar que el problema JSPSO es un caso especial del anteriormente expuesto JSSO, ya que las relaciones de precedencia no son arbitrarias, y que se convierte en el JSP cuando el número de operadores es lo suficientemente alto para que deje de considerarse una limitación.

2.2.2 Aprendizaje

La curva de aprendizaje se aplicó por primera vez en la industria aeronáutica en [12]. En este informe, publicado en la revista *Journal of the Aeronautical Sciences*, Wright describía como el coste directo de fabricación de fuselajes de un avión se reducía con el aprendizaje. Es decir, gracias a la experiencia obtenida tras cada fabricación de una unidad por lo operarios, la siguiente unidad requería menos horas de trabajo. Este fenómeno llevó a Wright a proponer el concepto de curva de aprendizaje en el que “para cualquier operación que se repita, el tiempo medio necesario para la operación disminuirá en una fracción fija conforme se duplique el número de repeticiones”.

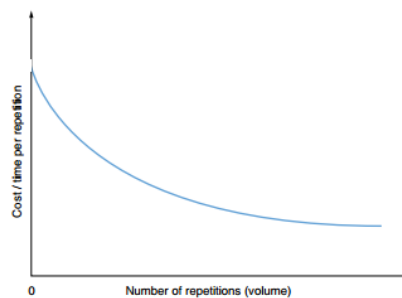


Figura 2.4 – Curva de aprendizaje³

³ Fuente: [11]

Se trata de una curva de tipo logarítmico cuya fórmula más común de cálculo, y usada en este trabajo fin de máster, es la siguiente:

$$Y_x = K \cdot x^{\log_2 b}$$

Donde:

- Y_x es el número de horas necesarias para producir la x -ésima unidad.
- K es el número de horas necesarias para producir la primera unidad.
- x es el número de la unidad
- b es el porcentaje de aprendizaje.

Según [13], tomando como base el trabajo de Wright muchos investigadores han aplicado el concepto de la curva de aprendizaje en diferentes sectores para intentar descifrar sus tendencias de aprendizaje de manera que les permita predecir sus costes futuros.

Según la literatura revisada, existen dos tipos de aprendizaje: el individual y el organizacional. El primero es aquel en el que la mejora se obtiene cuando la persona repite un proceso y adquiere eficiencia o habilidad a partir de su propia experiencia. El segundo se refiere a que la organización también aprende, este aprendizaje organizacional incluye la tecnología, la ingeniería, el diseño de procesos, la capacitación y los equipos de trabajo. El aprendizaje individual depende principalmente de que la selección de los trabajadores sea correcta, de que tengan una capacitación adecuada, de la motivación de éstos en el trabajo y también de la especialización del trabajo, es decir, de que las tareas que realiza cada operario sean determinadas y específicas.

Existen 3 suposiciones sobre las que se basa teoría de la curva de aprendizaje:

- El tiempo requerido en completar una tarea o unidad fabricada disminuye cada vez que se realiza la tarea.
- La reducción de tiempo sigue un patrón predecible.
- La tasa de reducción de tiempo por tarea o unidad fabricada es cada vez menor.

Hay que hacer notar que, aunque la curva de aprendizaje se ha introducido hace muchos años, son pocas las referencias que se pueden encontrar sobre la aplicación de dicho concepto en tareas de planificación trabajos han aplicado, y menos en la industria aeronáutica. Por tanto, en este Trabajo Fin de Máster, se centra en el problema del efecto del aprendizaje en una línea a pulso y que se ha definido como el **JSPSTO (Job-Shop Scheduling Problem with Skilled and Trained Operators – Precedence Relations)**.

En la siguiente tabla se muestran las principales características y diferencias de los problemas relacionados con el objeto de estudio.

Tipo	Operarios	Operarios con habilidades diferentes	Relaciones de precedencia	Aprendizaje
JSP	NO	NO	NO	NO
JSO	SI	NO	NO	NO
JSSO	SI	SI	Arbitrarias	NO
JSPSO	SI	SI	SI	SI
JSPSTO	SI	SI	SI	SI

Figura 2.5 - Job Shop Scheduling Problems

3 MODELADO DEL PROBLEMA JSPSTO

En este capítulo se aborda el segundo objetivo específico del Trabajo Fin de Máster, el modelado y la particularización para el caso estudiado. A continuación se describirán las ecuaciones propuestas del modelo, que tiene su origen en el modelo propuesto por A. Agnetis, G. Murgia y S. Sbrilli en [9].

3.1. Introducción

Según lo comentado en apartados anteriores, el objetivo del Proyecto es analizar la influencia en la reducción de tiempos de realización de tareas que tiene la mejora de la habilidad de los trabajadores debido al aprendizaje obtenido por la repetición de las tareas realizadas, a través del concepto de la curva de aprendizaje, en el sector aeronáutico. Para ello, partiendo de las investigaciones realizadas en [9], se propone un modelo de optimización que añade el componente de la curva de aprendizaje.

En primer lugar se mencionarán las hipótesis que se han tenido en cuenta a la hora de modelar el problema, seguidamente se presentará una descripción detallada de las variables, conjuntos y parámetros usados y finalmente se detallarán los modelos las modificaciones y adaptaciones realizadas sobre el modelo de partida para adecuarlo al objetivo que se persigue dentro de los tres escenarios que se presentan.

3.2. Hipótesis de partida

Se han tenido en cuenta las siguientes hipótesis para modelar los tres problemas que se presentan a continuación:

1. Cada una de las máquinas pueden procesar sólo una tarea al mismo tiempo.
2. Las tareas que componen cada trabajo están planificadas secuencialmente.
3. No se puede interrumpir el procesado de una tarea.
4. Cada tarea es asignada a un operario.
5. Ni la máquina ni el operario asignado a la tarea cambian durante el tiempo de proceso.
6. Cada operario puede realizar sólo una tarea al mismo tiempo.
7. Se asume que el tiempo de una tarea depende de la máquina en la que se realice y de la habilidad que tenga el operario en el uso de la máquina. Los operarios con la mejora de la experiencia podrán reducir este tiempo de procesado, mejora que viene determinada por la fórmula logarítmica de la curva de aprendizaje. La primera vez que realicen una tarea el

tiempo vendrá definido por la máquina en la que se realiza.

8. Se conoce el tiempo de pulso (Takt Time que debe cumplir)¹.
9. En el presente estudio se ha tenido en cuenta el efecto del aprendizaje de cada operario en la realización de las tareas en cada máquina. Otras interpretaciones serían posibles, teniendo en cuenta por ejemplo de que el factor de aprendizaje afecte sólo a la ejecución de la tarea.

3.3. Modelo general

El problema se formula como uno de asignación de recursos escasos, en el que se busca asignar una serie de tareas a un conjunto de máquinas y de operarios en función de las habilidades de éstos, de forma que se minimice el tiempo total de finalización del trabajo (makespan). Cabe destacar que el modelo expuesto solo tiene sentido en un horizonte corrido, ya que tiene en cuenta la mejora que supone en el tiempo de finalización de una tarea la experiencia que va consiguiendo cada operario a medida que la realiza. Esta variación supone la principal diferencia respecto al modelo propuesto por Agnetis *et al.* en [9].

3.3.1 Conjuntos, variables y parámetros

Los conjuntos empleados en el modelo son:

- Conjunto \mathcal{M} de q máquinas.
- Conjunto \mathcal{O} de o operarios.
- Conjunto \mathcal{T} de n diferentes tareas.
- \mathcal{T}_o : Conjunto de tareas que pueden ser realizadas por el operario o .
- \mathcal{O}_i : Conjunto de operarios que pueden realizar la tarea i .
- \mathcal{M}_i : Conjunto de máquinas en las que se puede realizar la tarea i .

Las variables usadas son:

- C_i : Tiempo de finalización de la tarea i .
- S_i : Tiempo de inicio de la tarea i .
- C_{max} : Tiempo de finalización de todas las tareas (makespan). Es el valor que se trata de optimizar en el modelo.
- x_{iom} : variable binaria que es igual a 1 si la tarea i se le ha asignado al operario o y 0 en el caso contrario.
- y_{it} : variable binaria cuyo valor es 1 si la tarea i va delante de la tarea t y 0 en caso contrario.
- q_o : tiempo invertido por cada operario en la realización de tareas. Es decir, el tiempo que cada

¹ Esta hipótesis es aplicable a todos los modelos excepto el primero.

operario está trabajando realizando tareas.

- $inexperiencia_{oim}^{ite}$: Valor entre 0 y 1 que indica la inexperiencia del operario o en la realización de la tarea i usando la máquina m en el periodo o iteración ite . Este valor parte de 1 y va disminuyendo lo que indica que cada vez que realiza una tarea, la inexperiencia del trabajador va bajando lo que produce que el tiempo empleado en la tarea (tiempo \cdot inexperiencia) va disminuyendo, es decir la experiencia va aumentando.

El valor de la variable $inexperiencia_{oim}^{ite}$ viene determinado por la ecuación logarítmica de la curva de aprendizaje:

$$inexperiencia_{oim}^{ite} = inexperiencia_{oim}^1 \cdot nr^{\log_2 b}$$

Donde:

- $inexperiencia_{oim}^{ite}$ = factor inexperiencia del operario o realizando la tarea i en la máquina m en la iteración nr .
- nr = número de repetición de la tarea i .
- b = porcentaje de aprendizaje tras cada repetición.

Y por último, los parámetros que se emplean son:

- pt_m : Tiempo de proceso de la tarea i en la máquina m . Se trata de un parámetro que viene dado pero que puede mejorarse gracias a la habilidad del operario realizando la tarea i en la máquina m .
- M : Número arbitrariamente grande. Se trata de un parámetro auxiliar empleado en varias restricciones.
- Las habilidades de cada operario se especifican en una matriz \mathcal{A} de habilidades, en la que cada elemento a_{io} , $i \in \mathcal{T}$, $o \in \mathcal{O}$, es igual a 1 si el operario o tiene la habilidad de realizar la tarea i y 0 en caso contrario.
- Las relaciones de precedencia entre las tareas vienen definidas en el grafo $\mathcal{G}(\mathcal{T}, \mathcal{A})$. Los nodos corresponden con tareas y el arco $(i, j) \in \mathcal{A}$ significa que la tarea i debe ser finalizada antes de que la tarea j se empiece.

3.3.2 Modelo matemático I: Minimizar makespan

A continuación, se muestra el modelo matemático inicial propuesto, para la iteración ite , para alcanzar el objetivo minimizar el makespan.

$$\min C_{max} \quad (1)$$

s.a.

$$C_{max} \geq C_i \quad \forall i \in T \quad (2)$$

$$S_i + pt_{im} x_{iom} \text{inexperiencia}_{oim}^{ite} \leq C_i \quad \forall i \in T, \forall o \in O_i, \forall m \in M_i \quad (3)$$

$$C_i \leq S_t + M(1 - y_{it}) \quad \forall i, t \in T, m_i = m_t, i \neq t \quad (4)$$

$$C_t \leq S_i + My_{it} \quad \forall i, t \in T, m_i = m_t, i \neq t \quad (5)$$

$$C_i \leq S_t + M(1 - y_{it}) + M(2 - \sum_{m \in M_i} x_{iom} - \sum_{m \in M_i} x_{tom}) \quad \forall i, t \in T, \forall o \in O_i \quad (6)$$

$$C_t \leq S_i + My_{it} + M(2 - \sum_{m \in M_i} x_{iom} - \sum_{m \in M_i} x_{tom}) \quad \forall i, t \in T, \forall o \in O_i \quad (7)$$

$$S_t \geq C_i \quad \forall i, t \in A \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M_i} \sum_{i \notin T_o} x_{iom} = 0 \quad \forall o \in O_i \quad (9)$$

$$\sum_{m \in M_i} \sum_{o \in O_i} x_{iom} = 1 \quad \forall i \in T \quad (10)$$

$$S_i \geq 0 \quad \forall i \in T \quad (11)$$

$$q_o = \sum_{i \in T_o} \sum_{m \in M_i} pt_{im} \cdot \text{inexperiencia}_{oim}^{ite} \cdot x_{iom} \quad \forall o \in O_i \quad (12)$$

$$x_{iom} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in T, \forall o \in O, \forall m \in M \quad (13)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in T \quad (14)$$

Las restricciones empleadas en el modelo tienen los siguientes objetivos:

- (1-2): Aseguran que se minimiza el tiempo de finalización de la última tarea programada.
- (3): Además de forzar la no interrupción de una tarea una vez que empieza a realizarse, se incluye que el tiempo de finalización de la tarea depende de la inexperiencia del operario que la realiza.
- (4-5): Imponen que la máquina no pueda realizar más de una tarea al mismo tiempo. Es decir, para dos tareas asignadas a la misma máquina, si el tiempo de inicio de la tarea t es mayor o igual que el tiempo de fin de la tarea i , el tiempo de fin de la tarea t debe ser menor o igual que el tiempo de inicio de la tarea i . La constante M es lo suficientemente grande como para asegurar que la restricción se mantiene para cualquier valor razonable de las variables consideradas.
- (6-7): Implican que si dos tareas diferentes i, t son asignadas al mismo operario $o \in O$, no se pueden superponer. Es decir, para dos tareas asignadas al mismo operario, imponen que si el tiempo de inicio de la tarea t es mayor o igual que el tiempo de fin de la tarea i , el tiempo de fin de la tarea t debe ser menor o igual que el tiempo de inicio de la tarea i .
- (8): Modela las relaciones de precedencia.
- (9): Asegura que un operario o no puede realizar la tarea i si no tiene la habilidad adecuada para realizada.
- (10): Impone que cada tarea i sea asignada a un operario de O .
- (11): Obliga a que los tiempos de inicio de las tareas sean mayores o iguales a 0.
- (12): Sirve para conocer el tiempo que invierte cada operario realizando tareas.
- (13-14): Definen las variables binarias usadas en el modelo.

De las restricciones contenidas en el modelo propuesto la que marca la mayor diferencia respecto al modelo extraído de [9] es la número (3), debido a que Agnetis *et al.* en [9] no contemplaron en su propuesta el impacto que tiene el aprendizaje en la reducción de los tiempos de realización de las tareas y por tanto, la mejora en el tiempo de finalización del trabajo (makespan). Con la nueva restricción propuesta en el presente proyecto, se ha tenido en cuenta este impacto mediante la curva de aprendizaje, considerando que existe una mejora cada vez que un operario repite una tarea. Además, la variable asignación, que Agnetis *et al.* en [9] consideraban con los subíndices operario y tarea, también se ha contemplado la asignación operario a tarea y a máquina, de forma que una tarea sea realizada por un operario determinado en una máquina determinada.

También se ha incluido una nueva restricción, la número (12), que se usa para indicar el tiempo invertido en cada iteración por cada operario.

En cuanto a la asignación, en el modelo presentado por Agnetis *et al.* en [9] se considera sólo asignación de operario a tarea y no se tiene en cuenta la máquina. En el presente modelo sí se ha tenido

en cuenta ese tercer índice, con lo que las restricciones que se ven afectadas por la asignación han tenido que adaptarse a este nuevo índice. Se ha incluido este nuevo índice puesto que el presente modelo tiene en cuenta, como se indica en las hipótesis de partida, el efecto del aprendizaje de cada operario en la realización de las tareas en cada máquina, es decir la mejora va asociada a realizar una tarea en una determinada máquina. En caso de no considerar la máquina en la asignación, se estaría considerando que un operario mejora en la realización de una tarea a medida que la realiza diferentes veces independientemente de la máquina que utilice, caso que no se ajusta a la realidad ya que puede haber máquinas que aunque sirvan para realizar la misma tarea, no funcionen de igual forma y requieran de práctica para mejorar en su utilización.

3.4. Modelo matemático II: Minimizar trabajadores usados

Para poder realizar el estudio del efecto de la curva de aprendizaje en el uso de la plantilla es necesario realizar unas modificaciones en el modelo de partida. Por las peculiaridades de esta segunda hipótesis es necesario cambiar el objetivo del modelo, pasando de minimizar el makespan a minimizar el número de operarios usados. También es necesario añadir tres restricciones y modificar una.

Las nuevas variables y parámetros añadidos son:

- *Takt time*: se trata del tiempo de pulso necesario para cumplir con la programación. Consideramos, por hipótesis, que todas las tareas se pueden realizar en dicho tiempo. Es decir, $C_{max} \leq Takt\ Time$
- *NumAct*: Número de actividades que hay en la instancia concreta a resolver.
- δ_o : Variable binaria que indica si se le ha asignado alguna tarea. Es decir, si está activo. El valor es 1 si el trabajador o está activo y 0 en caso contrario.

El nuevo modelo, para la iteración ite , es el siguiente:

$$\min \sum_{o \in O_i} \delta_o \quad (1)$$

s.a.

$$C_{max} \leq Takt\ Time \quad \forall i \in T \quad (2)$$

$$C_{max} \geq C_i \quad \forall i \in T \quad (3)$$

$$S_i + pt_{im} x_{iom} \text{inexperiencia}_{oim}^{ite} \leq C_i \quad \forall i \in T, \forall o \in O_i, \forall m \in M_i \quad (4)$$

$$C_i \leq S_t + M(1 - y_{it}) \quad \forall i, t \in T, m_i = m_t, i \neq t \quad (5)$$

$$C_t \leq S_i + My_{it} \quad \forall i, t \in T, m_i = m_t, i \neq t \quad (6)$$

$$C_i \leq S_t + M(1 - y_{it}) + M(2 - \sum_{m \in M_i} x_{iom} - \sum_{m \in M_i} x_{tom}) \quad \forall i, t \in T, \forall o \in O_i \quad (7)$$

$$C_t \leq S_i + My_{it} + M(2 - \sum_{m \in M_i} x_{iom} - \sum_{m \in M_i} x_{tom}) \quad \forall i, t \in T, \forall o \in O_i \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M_i} \sum_{o \in O_i} x_{iom} \leq M\delta_o \quad \forall i \in T \quad (9)$$

$$\sum_{m \in M_i} \sum_{o \in O_i} x_{iom} \leq M(1 - \delta_o) + NumAct \quad \forall i \in T \quad (10)$$

$$S_t \geq C_i \quad \forall (i, t) \in T \quad (11)$$

$$\sum_{m \notin M_i} \sum_{i \notin T_o} x_{iom} = 0 \quad \forall o \in O_i \quad (12)$$

$$\sum_{m \in M_i} \sum_{o \in O_i} x_{iom} = 1 \quad \forall i \in T \quad (13)$$

$$S_i \geq 0 \quad \forall i \in T \quad (14)$$

$$x_{iom} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in T, \forall o \in O, \forall m \in M \quad (15)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in T \quad (16)$$

$$\delta_o \in \{0, 1\} \quad \forall o \in O \quad (17)$$

El objetivo de las nuevas restricciones es el siguiente:

- (1): Asegura que se minimice el número de operarios activos para la realización de todas las tareas.
- (2): Asegura que se cumpla el tiempo de pulso necesario para cumplir con la programación.
- (9-10): Asegura que, si un trabajador está asignado a una tarea, se encuentre como activo. Estas dos ecuaciones sirven para poder establecer el objetivo de minimizar el número de trabajadores activos.

- (17): Define la variable δ_o como binaria.

3.5. Modelo Matemático III: Equilibrado de la carga de trabajo

Dentro del proyecto, para hacerlo más completo, el último de los escenarios propuestos es el de equilibrar las cargas de los trabajadores, teniendo en cuenta el aprendizaje de cada uno de ellos tras la repetición de las tareas. Para poder realizar este escenario, es necesario añadir 2 restricciones al modelo matemático I y modificar la función objetivo.

En este nuevo modelo aparecen nuevas variables que no han sido usadas anteriormente:

- Q_{max} : Variable que indica el tiempo empleado por el operario que más tiempo invierte en cada iteración.
- Q_{min} : Variable que indica el tiempo empleado por el operario que menos tiempo invierte en cada iteración

Además utiliza un parámetro $q_{o\ acum}$ que tiene en cuenta la carga acumulada de trabajo para cada operario:

- $q_{o\ acum}$: tiempo invertido por cada operario en la realización de tareas desde el inicio. Es decir, el tiempo que cada operario está trabajando realizando tareas acumulado. Esta variable será de utilidad para realizar dos de las tres simulaciones realizadas para este tercer modelo.

El tercer modelo del presente Trabajo Fin de Máster, para la iteración ite , es el siguiente:

$$\min(Q_{max} - Q_{min}) \quad (1)$$

s.a.

$$C_{max} \leq Takt\ Time \quad \forall i \in T \quad (2)$$

$$C_{max} \geq C_i \quad \forall i \in T \quad (3)$$

$$S_i + pt_{im} x_{iom} \text{inexperiencia}_{oim}^{ite} \leq C_i \quad \forall i \in T, \forall o \in O_i, \forall m \in M_i \quad (4)$$

$$C_i \leq S_t + M(1 - y_{it}) \quad \forall i, t \in T, m_i = m_t, i \neq t \quad (5)$$

$$C_t \leq S_i + My_{it} \quad \forall i, t \in T, m_i = m_t, i \neq t \quad (6)$$

$$C_i \leq S_t + M(1 - y_{it}) + M(2 - \sum_{m \in M_i} x_{iom} - \sum_{m \in M_i} x_{tom}) \quad \forall i, t \in T, \forall o \in O_i \quad (7)$$

$$C_t \leq S_i + My_{it} + M(2 - \sum_{m \in M_i} x_{iom} - \sum_{m \in M_i} x_{tom}) \quad \forall i, t \in T, \forall o \in O_i \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M_i} \sum_{o \in O_i} x_{iom} \leq M\delta_o \quad \forall i \in T \quad (9)$$

$$\sum_{m \in M_i} \sum_{o \in O_i} x_{iom} \leq M(1 - \delta_o) + NumAct \quad \forall i \in T \quad (10)$$

$$S_t \geq C_i \quad \forall (i, t) \in A \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M_i} \sum_{i \notin T_o} x_{iom} = 0 \quad \forall o \in O_i \quad (12)$$

$$\sum_{m \in M_i} \sum_{o \in O_i} x_{iom} = 1 \quad \forall i \in T \quad (13)$$

$$q_o = q_o \text{ acum} + \sum_{i \in T_o} \sum_{m \in M_i} pt_{im} \cdot \text{inexperiencia}_{oim}^{ite} \cdot x_{iom} \quad \forall o \in O_i \quad (14)$$

$$Q_{max} \geq q_o \quad \forall o \in O_i \quad (15)$$

$$Q_{min} \leq q_o \quad \forall o \in O_i \quad (16)$$

$$S_i \geq 0 \quad \forall i \in T \quad (17)$$

$$x_{iom} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in T, \forall o \in O, \forall m \in M \quad (18)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in T \quad (19)$$

$$\delta_o \in \{0, 1\} \quad \forall o \in O \quad (20)$$

El objetivo de las nuevas restricciones es el siguiente:

- (1): Asegura que se minimice la diferencia entre el tiempo invertido del operario que más invierte y el tiempo del que menos invierte, de forma que se consigan equilibrar las cargas de trabajo.
- (15): Asegura que el Q_{max} sea el máximo q_o .
- (16): Asegura que el Q_{min} sea el mínimo q_o .

4 EXPERIENCIA COMPUTACIONAL

Tras haber descrito los modelos matemáticos de interés con el problema objeto de en este proyecto, se aborda el tercer objetivo específico necesario para conseguir el objetivo general el trabajo. Para ello se procede a mostrar los tres escenarios de simulación realizadas y a analizar los resultados obtenidos.

4.1. Casos estudiados

Cabe destacar que para los tres modelos, el tiempo necesario para resolver el problema depende del tamaño del problema, el ordenador y la herramienta de resolución usadas. El primero de los factores mencionados, el tamaño del problema, puede suponer elevados tiempos computacionales debido a la complejidad y cantidad de combinaciones posibles que existen en el problema.

Para resolverlos se ha utilizado el software Visual Studio con el Solver Gurobi en su versión 6.5.2. Los modelos se alimentan con un archivo .txt que contiene los parámetros que se deseen emplear (número de tareas, número de operarios, número de máquinas, número de iteraciones, tiempos de procesado de las tareas, habilidades de los operarios y precedencias entre tareas). Al finalizar, el programa devuelve un archivo .xlsx con los resultados, lo que facilita el análisis de éstos, ofreciendo información general e información particular para cada uno de los operarios.

Según lo comentado anteriormente, se presentan 3 escenarios distintos sobre los que se han realizado simulaciones, todos ellos en base a la misma instancia.

El primer escenario es el relativo al objetivo general, con el que se busca comprobar la influencia que tiene la curva de aprendizaje en el C_{max} .

Con el segundo, se trata de analizar el efecto que tiene este aprendizaje en la plantilla para lo que se debe cambiar el objetivo del modelo y añadir algunas restricciones adicionales que se explicarán a continuación.

Y por último, con el tercer escenario se busca que las cargas de trabajo se repartan entre los operarios de forma que sea el reparto de tiempos sea lo más equitativo posible.

Consideraciones iniciales:

- Se considera un horizonte de trabajo de 52 semanas (iteraciones).
- Tras cada iteración los operarios obtienen una mejora definida por la fórmula logarítmica de la curva de aprendizaje en las tareas que hayan realizado.
- El factor de aprendizaje considerado tras cada vuelta es de 0,9. El factor de inexperiencia

parte de uno en la primera iteración y va disminuyendo en función a la fórmula logarítmica presentada en los apartados anteriores. Lo que indica que cada operario va reduciendo su inexperiencia realizando una tarea a medida que la repite.

La instancia utilizada para la resolución de los tres escenarios planteados, se trata de un escenario genérico y sencillo de forma que permita, de manera fácil, la interpretación del efecto de la curva de aprendizaje en el sistema productivo. Dicha instancia es la siguiente:

- Tareas: se consideran 10 tareas cuyo gráfico de precedencias es el siguiente:



Figura 4.1 - Gráfico de precedencias

- Máquinas: se consideran 7 máquinas.
- Operarios: se consideran 4 operarios.
- Matrices de tiempos de proceso y habilidades:

Tarea (i)	Máquina (m)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	93	0	125	0	0	194	0
2	0	0	188	159	0	0	0
3	0	0	165	153	0	0	29
4	100	0	0	58	0	0	0
5	0	196	0	110	0	0	0
6	0	46	78	0	0	0	36
7	145	0	0	77	23	0	0
8	0	146	200	0	0	72	0
9	0	0	0	0	87	0	150
10	0	0	176	0	0	96	128

Figura 4.2 - Matriz de tiempos de proceso (i x m)

Tarea (i)	Operario (o)			
	1	2	3	4
1	1	0	1	1
2	0	0	1	1
3	1	0	1	1
4	0	1	0	1
5	0	1	0	1
6	0	1	1	1
7	1	1	1	0
8	0	1	1	1
9	0	1	0	1
10	1	1	1	0

Figura 4.3 - Matriz de habilidades (i x o)

4.2. Escenario I: Influencia de la curva de aprendizaje en C_{max}

Tras lanzar el modelo, se observa como la asignación de tarea-operario-máquina se repite a lo largo de las 52 iteraciones, dado que tras realizarlo una vez se consiguen reducir los tiempos necesarios para finalizar las tareas, quedando la distribución de la siguiente forma:

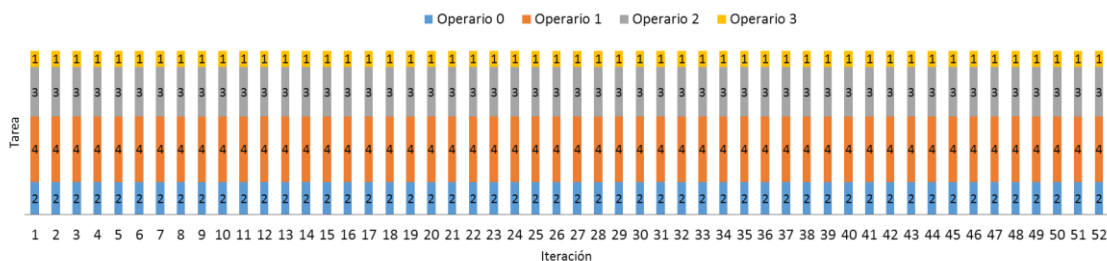


Figura 4.4 - Distribución del número de tareas entre los operarios (Esc. I)

En la figura 4.4, se representa la distribución del número de tareas a realizar por cada uno de los operarios y en la figura 4.5, el tiempo que se tarda en realizar todas las tareas en cada iteración, el C_{max}.

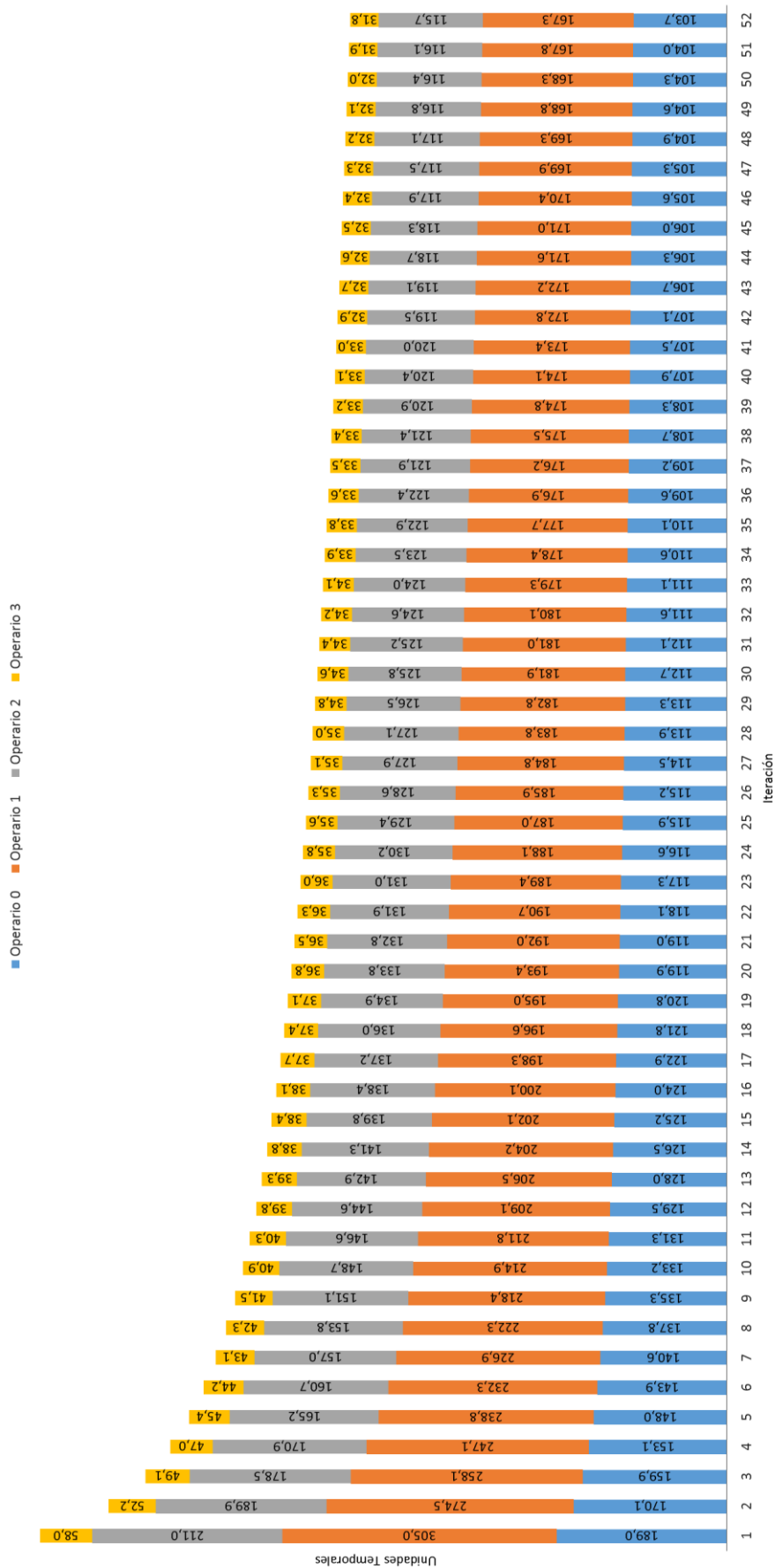


Figura 4.5 - Distribución de tiempos realizando tareas entre los operarios (Esc. I)

Se comprueba como la asignación de tareas a operario y a máquina es la misma durante las 52 iteraciones y esto se debe a que cada vez que se realizan, se consigue disminuir en tiempo necesario para realizarlas gracias a la reducción de la inexperiencia del operario realizando la tarea determinada.

Iteracion	Tarea	Operario	Maquina
1 - 52	0	0	0
	1	2	3
	2	2	6
	3	3	3
	4	1	3
	5	1	6
	6	2	4
	7	1	5
	8	1	4
	9	0	5

Figura 4.6 - Asignación Tarea-Operario-Máquina (Esc. I)

A continuación se muestra el diagrama de Gantt para las iteraciones 1 y 52, de tal forma que pueda comprobarse la reducción de los tiempos en los que los operarios están realizando tareas:

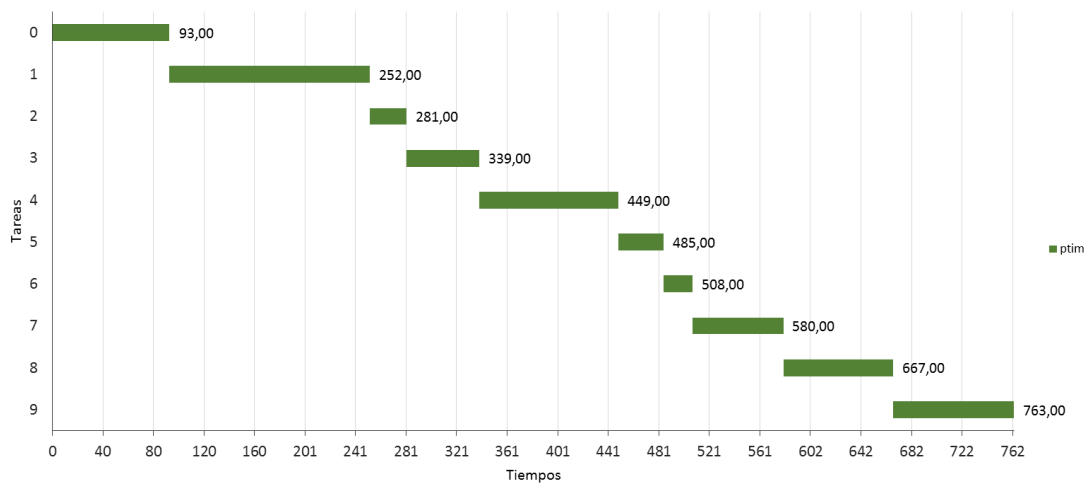


Figura 4.7 - Diagrama de Gantt para Iteración 1 (Esc. I)

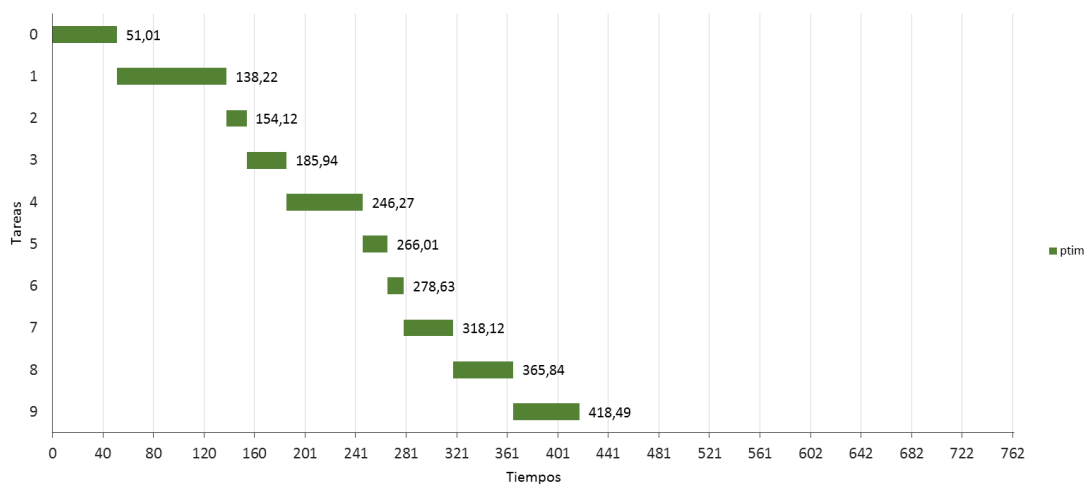


Figura 4.8 - Diagrama de Gantt para Iteración 52 (Esc. I)

Comparando las figuras 4.7 y 4.8, se aprecia como hay una reducción notable en el tiempo de realización de cada una de las tareas, lo que demuestra el efecto del aprendizaje en la finalización de los trabajos.

De estos resultados se puede concluir que en la primera iteración se selecciona la combinación óptima de asignación de operarios a tareas que minimiza el C_{max} . A partir de esta primera asignación y debido a que cada uno de los operarios seleccionados para realizar cada tarea mejora tras haberla realizado una vez, los operarios asignados para las siguientes iteraciones vuelven a ser los mismos. Este hecho permite concluir la importancia que tiene la especialización de los trabajadores en las tareas debido a la mejora que consiguen tras las repeticiones.

Este análisis también puede aportar a una empresa una pista más sobre en qué máquinas sería interesante realizar inversiones para mejorarlas o para duplicarlas debido a que hay unas más saturadas que otras y las máquinas que no son necesarias ya que no se utilizan (las máquinas 1 y 2 no tienen ninguna tarea asignada).

Otro de los aspectos que pueden extraerse de estos resultados es la posibilidad de realizar cursos para mejorar las capacidades de los trabajadores e incrementar la velocidad a la que adquieren mejora de habilidad.

En cuanto al objetivo de esta primera iteración, los resultados que se obtienen tras la simulación en cuanto a la reducción del makespan son los siguientes:

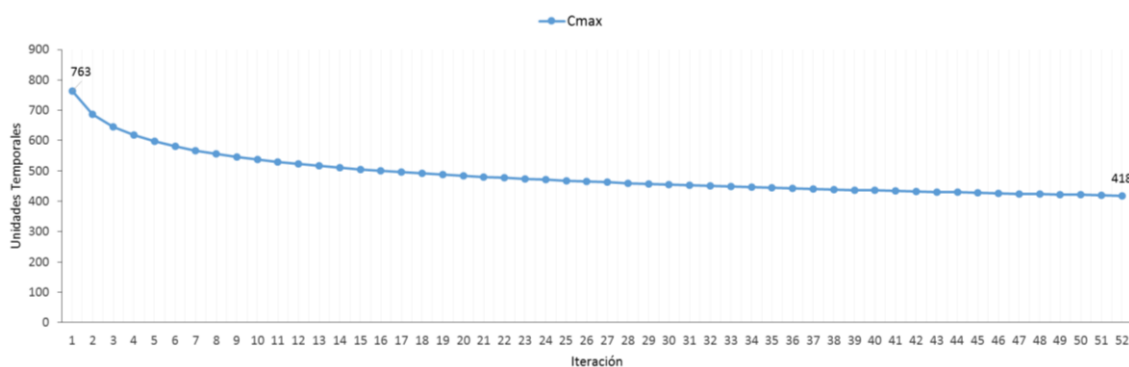


Figura 4.9 - Evolución C_{max} (Esc. I)

Se observa como gracias a la mejora obtenida debido a la experiencia que obtienen los operarios por la repetición de las tareas, se consigue que el tiempo necesario para completar el trabajo (makespan) vaya disminuyendo. En este caso, en 52 iteraciones pasa de 763 unidades de tiempo a 418 unidades de tiempo. Esto implica una reducción del 45% respecto a la primera iteración, lo cual es bastante significativo en cuanto a efectos de la planificación.

Este resultado apoya aún más la teoría de la importancia que tiene el aprendizaje en la reducción de los tiempos de realización de los trabajos. Esta reducción permite que puedan llegarse a realizar más trabajos en el mismo tiempo.

4.3. Escenario II: Efecto de la curva de aprendizaje en el uso de la plantilla

Debido a la mejora considerable en la habilidad de los trabajadores al realizar las tareas de forma repetitiva, se considera interesante ver cómo afecta la curva de aprendizaje al uso de la plantilla.

Para realizar esta segunda experiencia, se parte de fijar un Takt Time igual al makespan obtenido en el primer periodo (763 unidades temporales) y establecerlo como límite máximo que no puede superarse para poder cumplir con el ritmo de trabajo marcado para poder satisfacer la demanda (Takt Time). Los resultados extraídos del modelo para esta segunda experiencia son los siguientes:

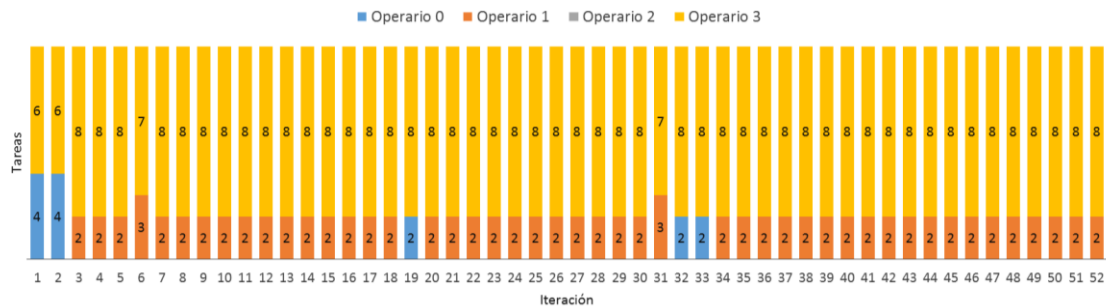


Figura 4.10 - Distribución del número de tareas entre los operarios (Esc. II)

Analizando la figura 4.10, se puede concluir que para cumplir con el Takt Time establecido, sólo son necesarios dos de los cuatro trabajadores. Esto puede permitir a la empresa utilizar los recursos ociosos en la realización de otro tipo de tareas o puede ser de utilidad a la hora de dimensionar la plantilla necesaria para cumplir con los trabajos, lo que supondría un importante ahorro en costes.

También se observa como la asignación tarea-operario-máquina no es siempre la misma debido a que no se ha establecido como objetivo la reducción de los tiempos de proceso.

En la simulación de este escenario, los resultados muestran que en todas las iteraciones el Cmax obtenido es igual al Takt Time de 763 u.t. establecido como restricción. Tras analizar los resultados mediante diagramas de Gantt en cada iteración, se observa como el modelo establece holguras en las iteraciones, que para el caso estudiado en el que las tareas son secuenciales, no son necesarias ya que la finalización de una tarea implica el comienzo de la siguiente, por lo que con el simple reproceso de eliminar la holgura se puede reducir el Cmax, representado en figura 4.11 como Cmax'.

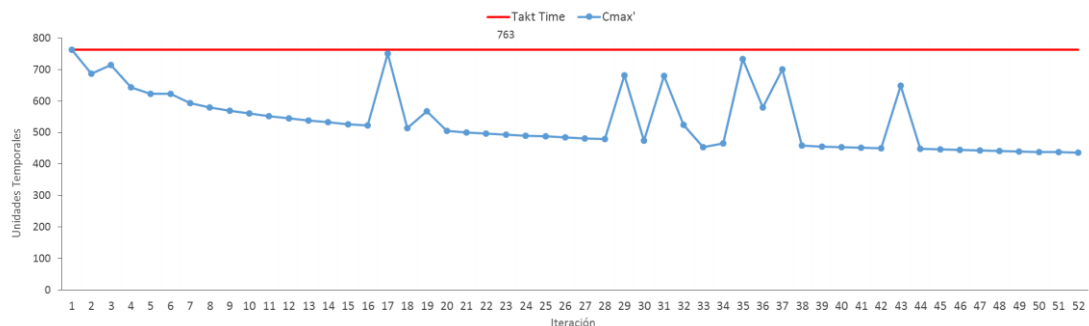


Figura 4.11 - Takt Time vs Cmax' (Esc. II)

El presente modelo no minimiza las holguras puesto que no están dentro de la función objetivo. Los picos que aparecen en la figura 4.11 (por ejemplo, en las iteraciones 17,19 o 29) son debidos a que las asignaciones tarea-operario-máquina son diferentes, con lo que la ventaja de la reducción de la inexperiencia por repetición de las tareas desaparece.

Cabe destacar que en casos más complejos, el reproceso no es tan simple como en el utilizado para realizar estos escenarios. Por ejemplo, el caso en el que la holgura sea necesaria para que otro operario termine de hacer la tarea que esté realizando previamente.

Para mostrar el efecto de las holguras, a continuación se representan dos iteraciones, la número 10 y la número 25, en las que la asignación tarea-operario-máquina es la misma por lo que el Cmax debería disminuir (figuras 4.12, 4.13 y 4.14). Se observa como en ambas iteraciones, la holgura aparece al final de la última tarea, por lo que con el reproceso de eliminarlas, se consigue además la reducción del Cmax (figura 4.15). Se comprueba como el tiempo de finalización de la última tarea es menor en la iteración 25 que en la iteración 10.

Iterac.	Tarea	Operario	Máquina	Iterac.	Tarea	Operario	Máquina
10	0	3	0	25	0	3	0
	1	3	3		1	3	3
	2	3	6		2	3	6
	3	3	3		3	3	3
	4	3	3		4	3	3
	5	3	6		5	3	6
	6	1	4		6	1	4
	7	3	5		7	3	5
	8	3	4		8	3	4
	9	1	6		9	1	6

Figura 4.12 - Asignación Tarea-Operario-Máquina en iteraciones 10 y 25 (Esc. II)

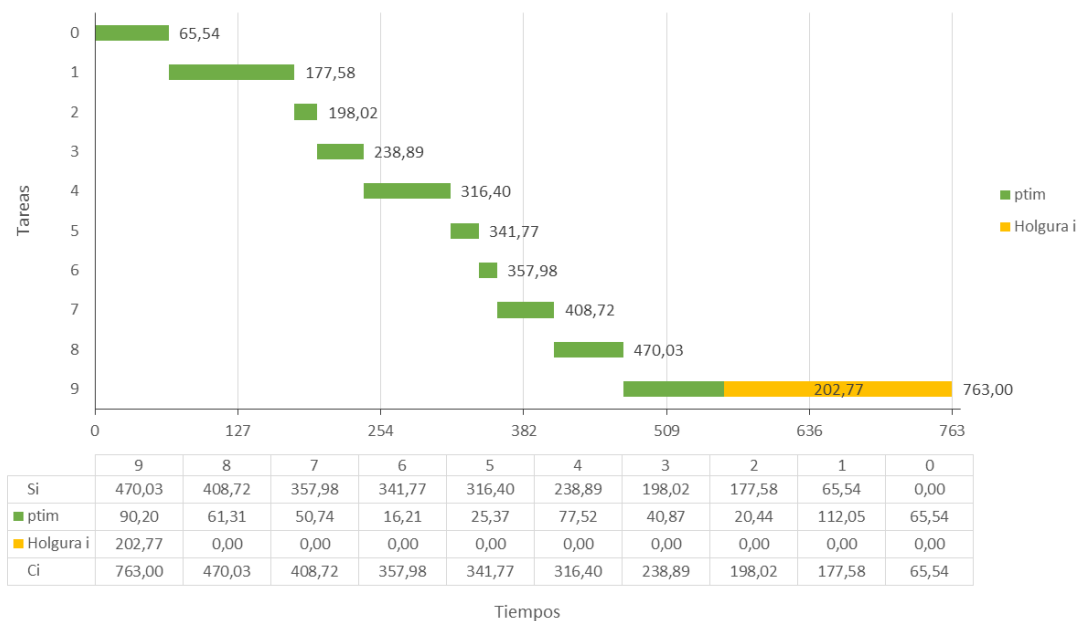


Figura 4.13 - Diagrama de Gantt para Iteración 10 (Esc. II)

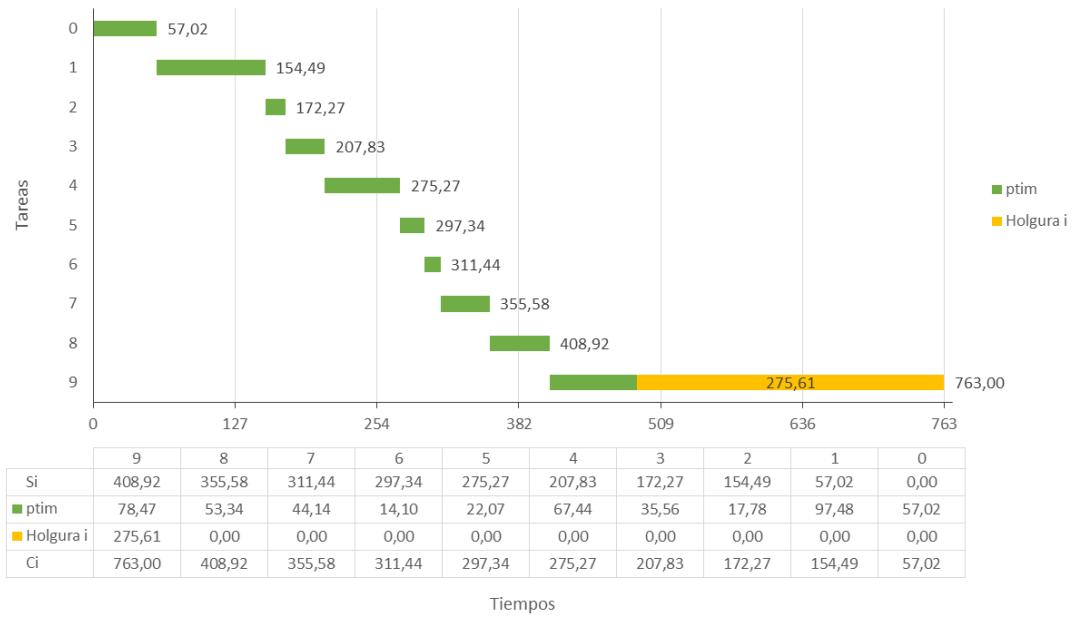


Figura 4.14 - Diagrama de Gantt para Iteración 25 (Esc. II)

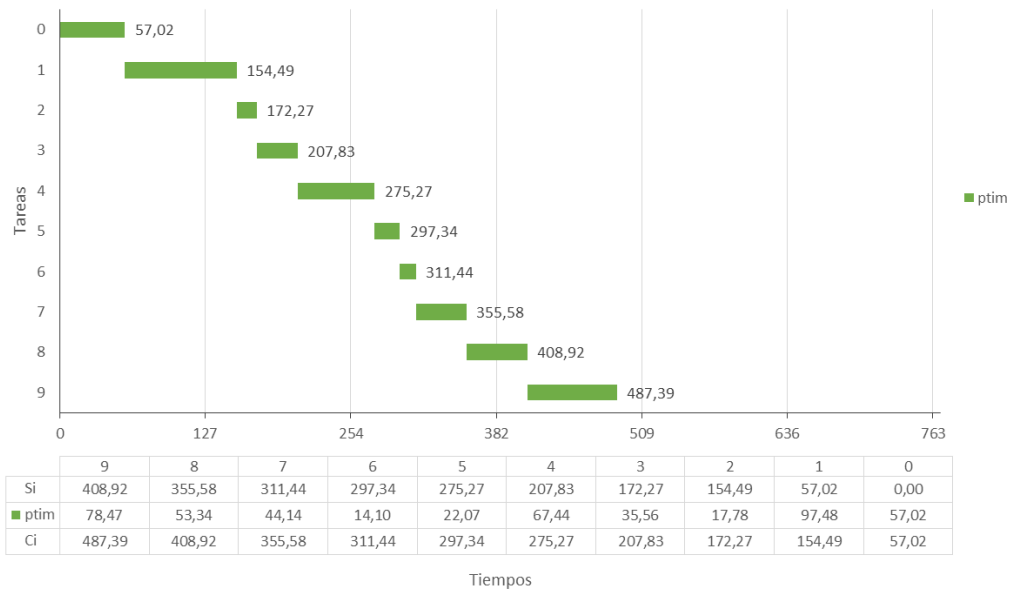


Figura 4.15 - Diagrama de Gantt para Iteración 25 tras reproceso (Esc. II)

En la siguiente página, figura 4.16, se muestra la distribución de tiempos que dedica cada operario en la realización de tareas y la holgura establecida por el modelo. Como se ha comentado anteriormente, para el ejemplo con tareas secuenciales tratado en este proyecto, eliminando las holguras se consigue la reducción el Cmax. También se observa como gracias al aprendizaje de los operarios, los tiempos que dedican realizando tareas en cada iteración se reducen, cuando las asignaciones tarea-operario-máquina son las mismas.

Tras analizar los resultados obtenidos, una propuesta interesante para una empresa es mantener, para todo el horizonte temporal estudiado, la primera asignación tarea-operario-máquina resultante de la primera iteración y conseguir el beneficio de la reducción de tiempos de proceso de las tareas gracias al aprendizaje por repetición, reduciendo el tiempo de finalización tras cada iteración.

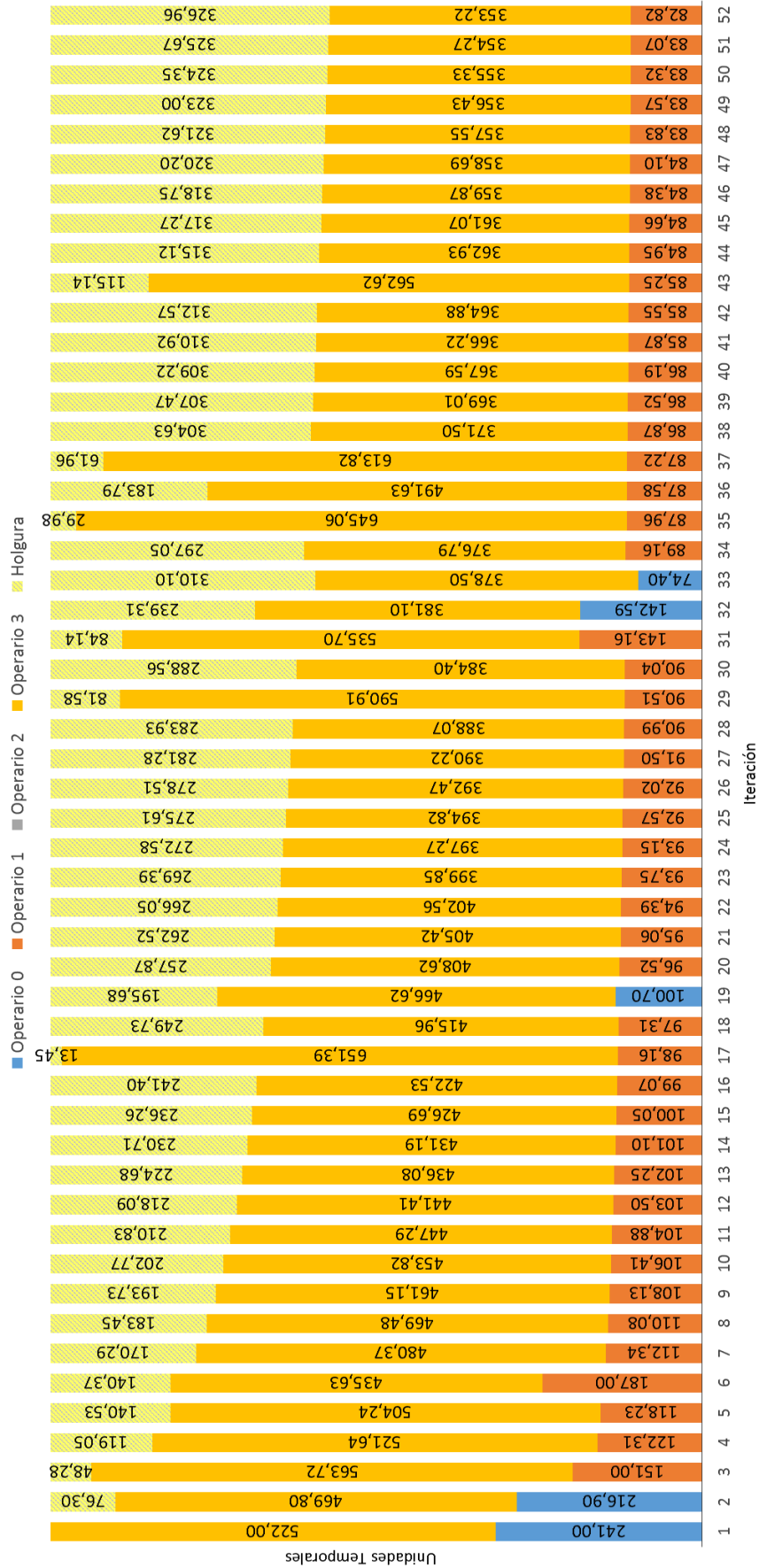


Figura 4.16 - Distribución de tiempos realizando tareas entre los operarios y holguras (Esc. II)

4.4. Escenario III: Equilibrado de la carga de trabajo

Tras el primer escenario simulado, los resultados muestran como no existe un equilibrado en la carga de trabajo de los operarios. Para ello, se ha realizado el tercer modelo, en el cual se han realizado diferentes simulaciones para comparar los resultados. Se ha utilizado la instancia que los anteriores, fijando como dato que el Takt Time sea 763 unidades temporales, al igual que en el escenario anterior. Los resultados son los siguientes:

4.4.1 Escenario III.1: Equilibrado individual en cada iteración

En este caso, se equilibra la carga de trabajo en cada iteración, sin tener en cuenta la carga acumulada, dejando libre el número de operarios necesarios. Por tanto se adaptan las restricciones (14) al modelo 3 introducido en el capítulo 3, estableciendo que $q_{o\text{acum}} = 0$ en cada iteración.

Como el objetivo no es minimizar el makespan, ni reducir el número de operarios usados, el modelo busca la mejor solución que cumpla el requisito de que C_{\max} sea menor o igual que Takt Time, que está asignado con un valor de 763 unidades temporales.

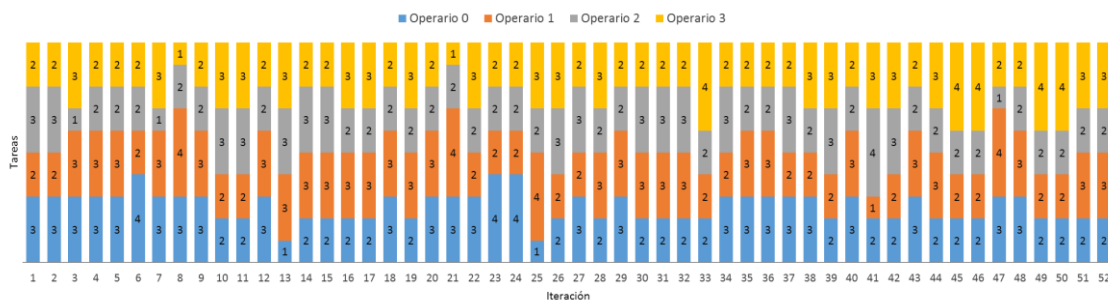


Figura 4.17 - Distribución del número de tareas entre los operarios (Esc. III.1)

Los resultados de la simulación de este escenario muestran, que en todas las iteraciones, el C_{\max} obtenido es igual al Takt Time de 763 u.t. establecido como restricción. Tras analizar los resultados mediante diagramas de Gantt en cada iteración, se observa como el modelo, al igual que ocurría en el Escenario II, establece holguras en las iteraciones. Como se ha comentado en el escenario anterior, debido a la instancia elegida para realizar las simulaciones, en el que las tareas son secuenciales, dichas holguras no son necesarias porque que la finalización de una tarea implica el comienzo de la siguiente, por lo tanto realizando el reproceso de eliminar la holgura se puede reducir el C_{\max} , representado en figura 4.18 como C_{\max}' . Como ocurría en la simulación anterior, estas holguras no son minimizadas en el modelo puesto que no están dentro de la función objetivo.

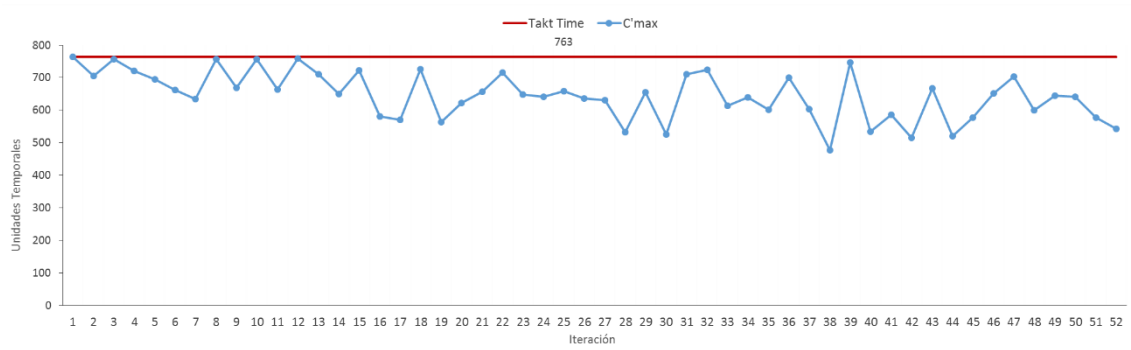


Figura 4.18 - Takt Time vs Cmax' (Esc. III.1)

A continuación se presenta el diagrama de Gantt para dos iteraciones (figuras 4.20 y 4.21), cuyas asignaciones tarea-operario-máquina son las siguientes:

Iterac.	Tarea	Operario	Máquina	Iterac.	Tarea	Operario	Máquina
1	0	2	0	17	0	0	0
	1	3	3		1	2	2
	2	0	6		2	2	6
	3	0	3		3	3	0
	4	1	3		4	1	3
	5	3	6		5	3	6
	6	2	4		6	1	4
	7	2	5		7	3	5
	8	1	4		8	1	4
	9	0	5		9	0	6

Figura 4.19 - Asignación Tarea-Operario-Máquina en iteraciones 1 y 17 (Esc. III. 1)

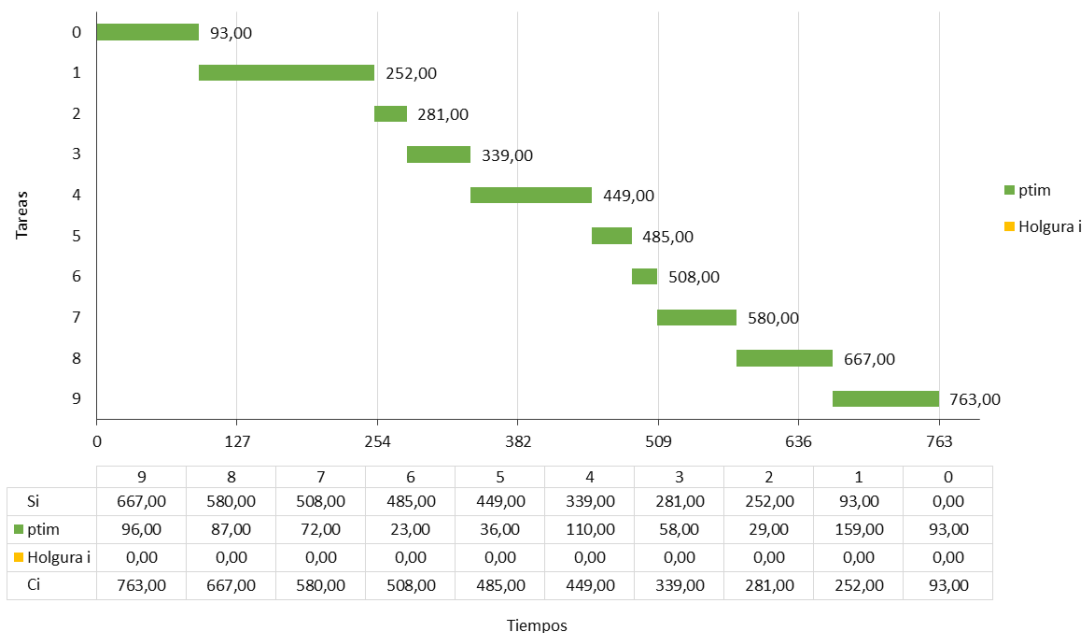


Figura 4.20 - Diagrama de Gantt para Iteración 1 (Esc. III.1)

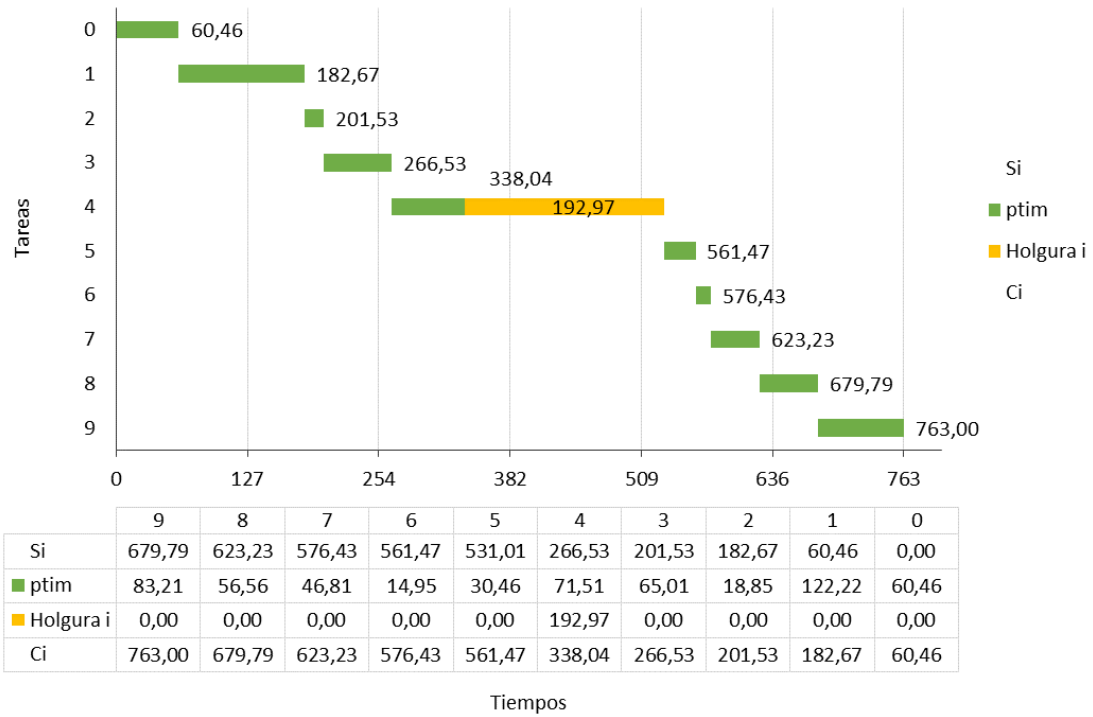


Figura 4.21 - Diagrama de Gantt para Iteración 17 (Esc. III.1)

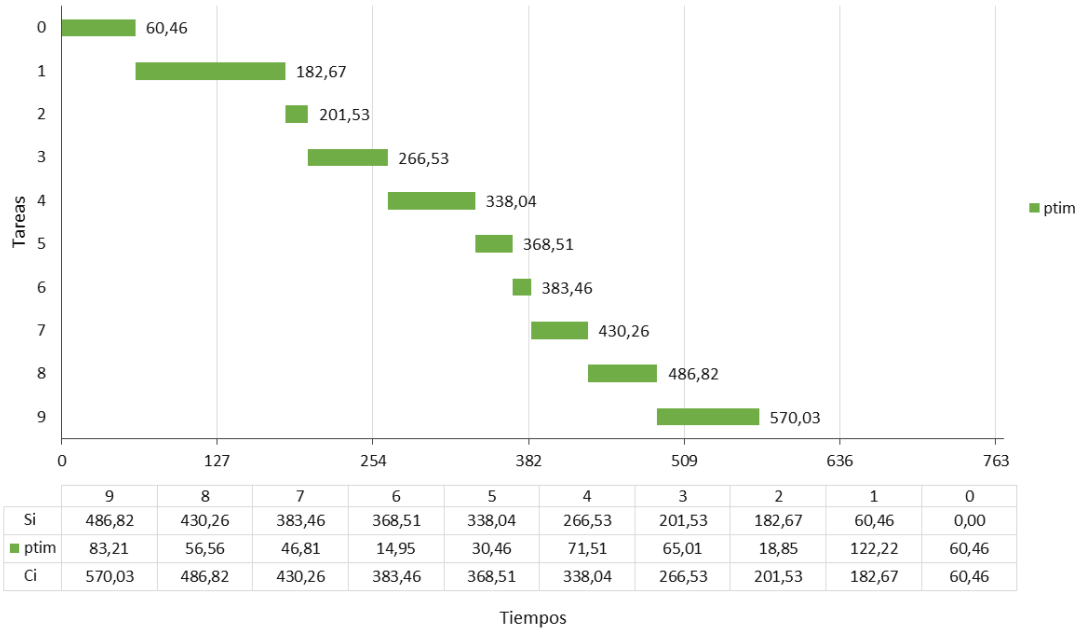


Figura 4.22 - Diagrama de Gantt para Iteración 17 tras reproceso (Esc. III.1)

En la figura 4.20, se muestra el diagrama de Gantt para la iteración 1 y se observa como la asignación tarea-operario-máquina seleccionada cumple exactamente el Takt Time.

La figura 4.21, representa la iteración 17 ya ahí si aparece la holgura, que dado que las tareas son secuenciales y el fin de una tarea establece el inicio de la siguiente, puede ser eliminada de forma

que se reduzca el C_{max} . En este caso, la reducción del C_{max} es de 192,97 unidades temporales (figura 4.22), quedando $C_{max}' = 570,03$ u.t.

En la figura 4.23, que aparece en la siguiente página, se muestran los tiempos que emplea cada operario realizando tareas y se puede comprobar como en cada iteración los trabajadores tienen el trabajo repartido de forma que invierten aproximadamente el mismo tiempo que sus compañeros realizando tareas.

En la figura 4.24, se representan los tiempos acumulados que emplea cada operario realizando tareas, lo que servirá para comparar los resultados con los obtenidos en el Escenario III.2.

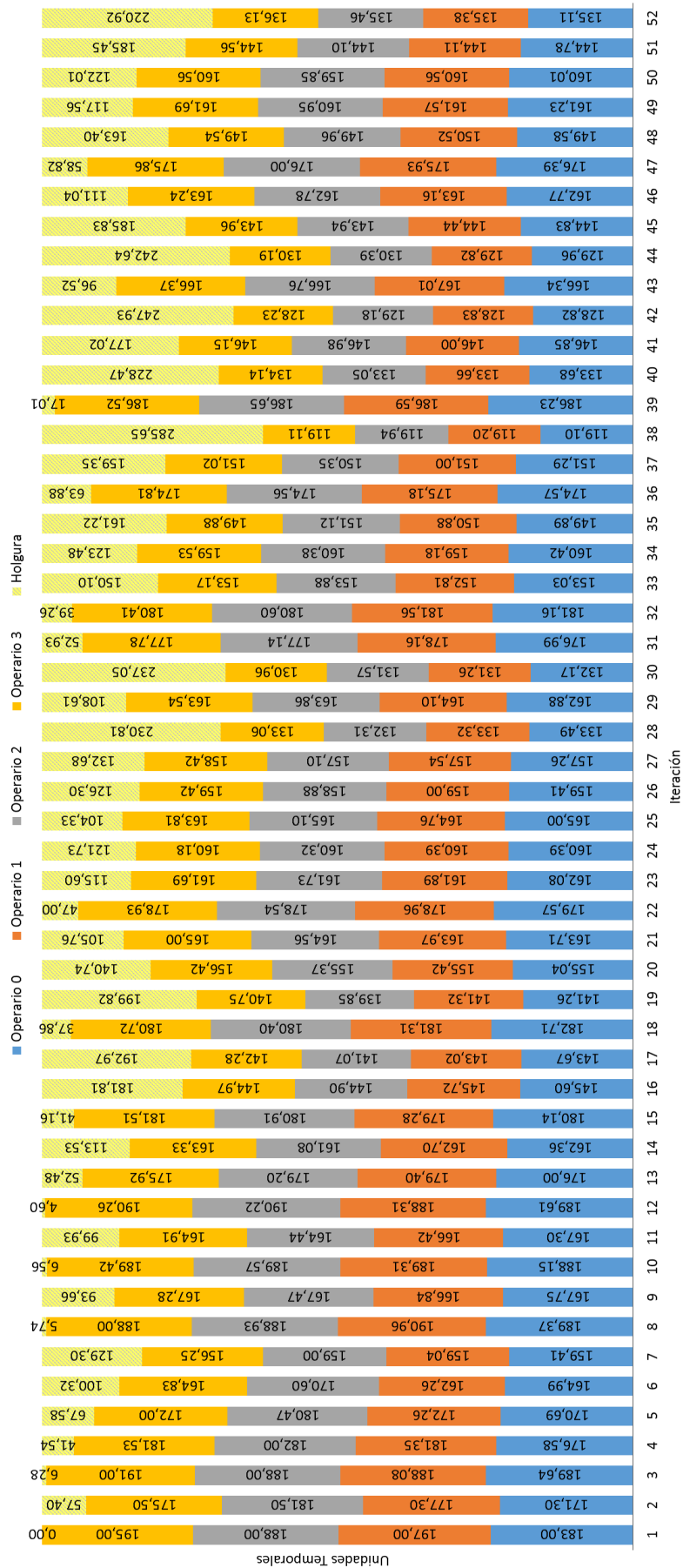


Figura 4.23 - Distribución de tiempos realizando tareas entre los operarios y holguras (Esc. III.1)

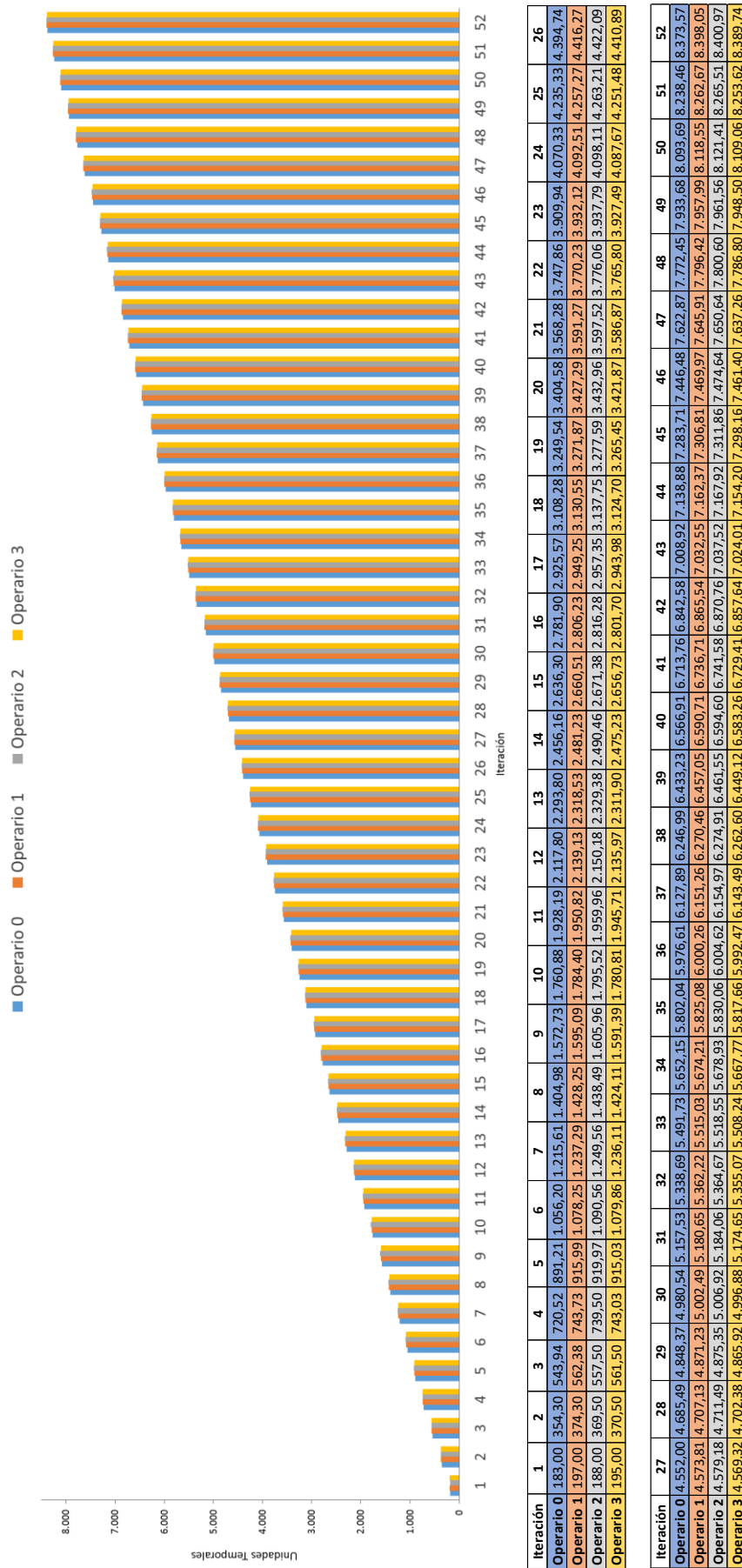


Figura 4.24 - Tiempos acumulados (Esc. III. 1)

4.4.2 Escenario III.2: Equilibrado de la carga acumulada

En este caso se equilibra la carga de trabajo acumulada sin restricción en el uso de operarios, de forma que en la última iteración todos los operarios hayan realizado un trabajo equitativo en tiempo.

Tras realizar la simulación III.1, el siguiente paso es realizar la representación para el caso en el que se equilibre la carga de trabajo acumulada, de forma que un operario pueda tener una mayor carga de trabajo al principio y una menor en las últimas iteraciones resultando finalmente que el tiempo invertido por cada operario sea equitativo.

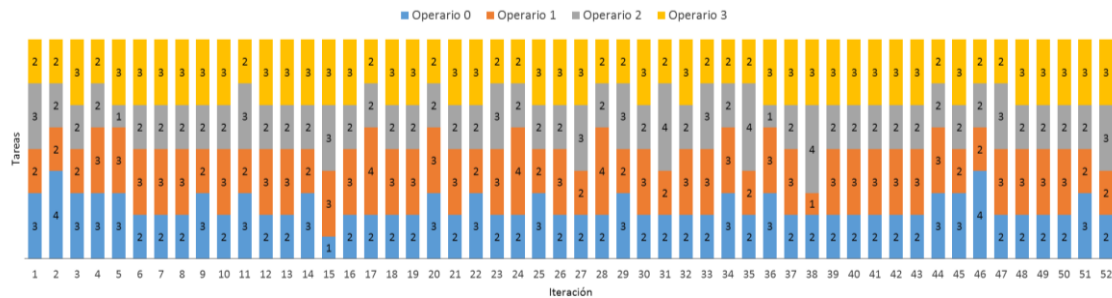


Figura 4.25 - Distribución del número de tareas entre los operarios (Esc. III.2)

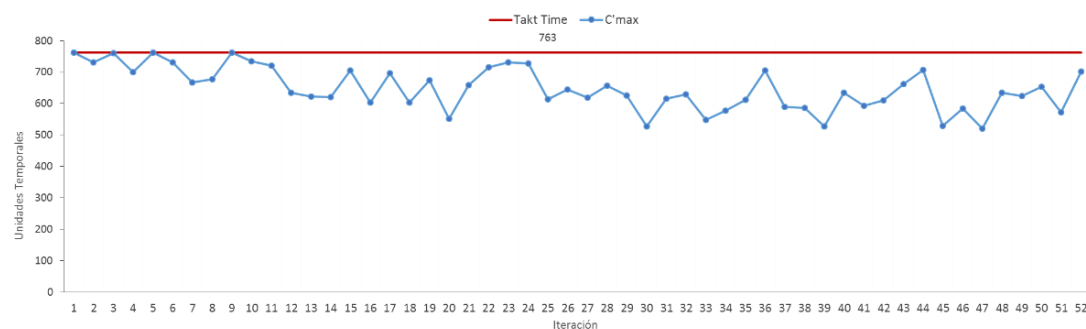


Figura 4.26 - Takt Time vs Cmax' (Esc. III.2)

Dado que en esta simulación no se ha establecido un número máximo de operarios a utilizar, el modelo hace una distribución bastante semejante a la observada en la simulación anterior, en el que el equilibrado se realiza iteración a iteración (figuras 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28). En esta simulación también aparecen las holguras observadas anteriormente, que como también se ha comentado con anterioridad, en este caso, pueden eliminarse sin ningún tipo de problema.

Vuelta	Tarea	Operario	Máquina
20	0	2	5
	1	3	2
	2	2	6
	3	0	3
	4	1	3
	5	1	6
	6	0	0
	7	2	5
	8	1	6
9	0	5	

Figura 4.27 - Asignación Tarea-Operario-Máquina en Iteración 20 (Esc. III. 2)

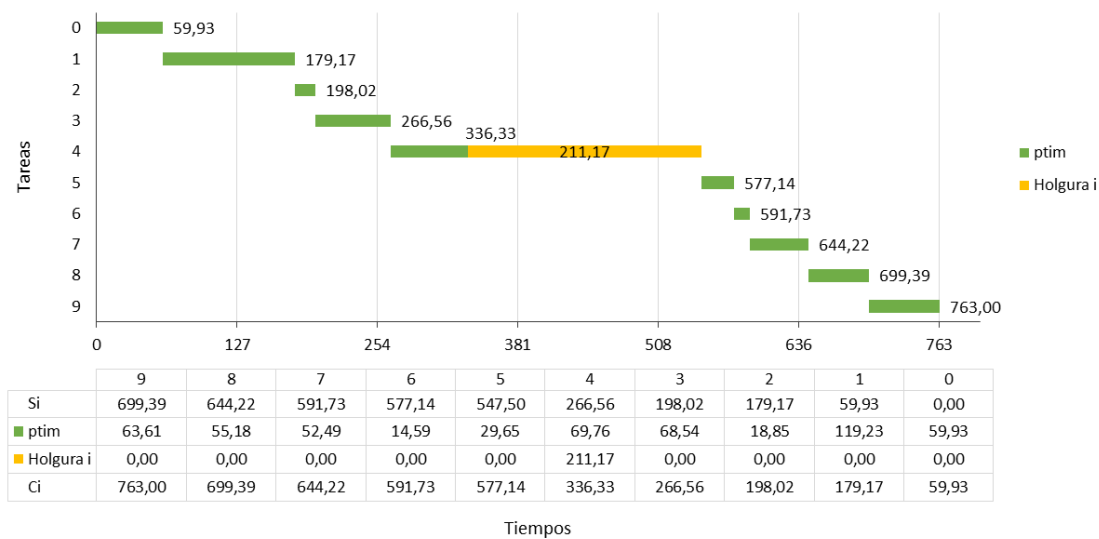


Figura 4.28 - Diagrama de Gantt para Iteración 20 (Esc. III.2)



Figura 4.29 - Diagrama de Gantt para Iteración 20 tras reproceso (Esc. III.1)

En la figura 4.29 se comprueba cómo puede reducirse el Cmax en 211,17 unidades temporales, simplemente eliminando la holgura que aparece al final de la tarea 4 (figura 4.28). Cabe recordar que esta holgura puede eliminarse debido al tipo de ejemplo representado en el que el fin de una tarea constituye el inicio de la siguiente.

Para el ejemplo utilizado, en el que hay más tareas que operarios, el modelo equilibra desde la primera iteración las cargas de trabajo de los operarios. Lo que consigue es que el equilibrado de las cargas de trabajo es más exacto a medida que ocurren las sucesivas iteraciones, tal y como se muestra en la figura 4.31, consiguiendo que en la última iteración los cuatro operarios tengan unas cargas de trabajo acumuladas de 8.414 unidades temporales cada uno.

Este escenario puede ser útil para casos en los que haya más operarios que tareas, por ejemplo si se tienen dos grupos de trabajo y se quiere que la carga de trabajo de todos los operarios esté equilibrada al final de un horizonte temporal establecido.

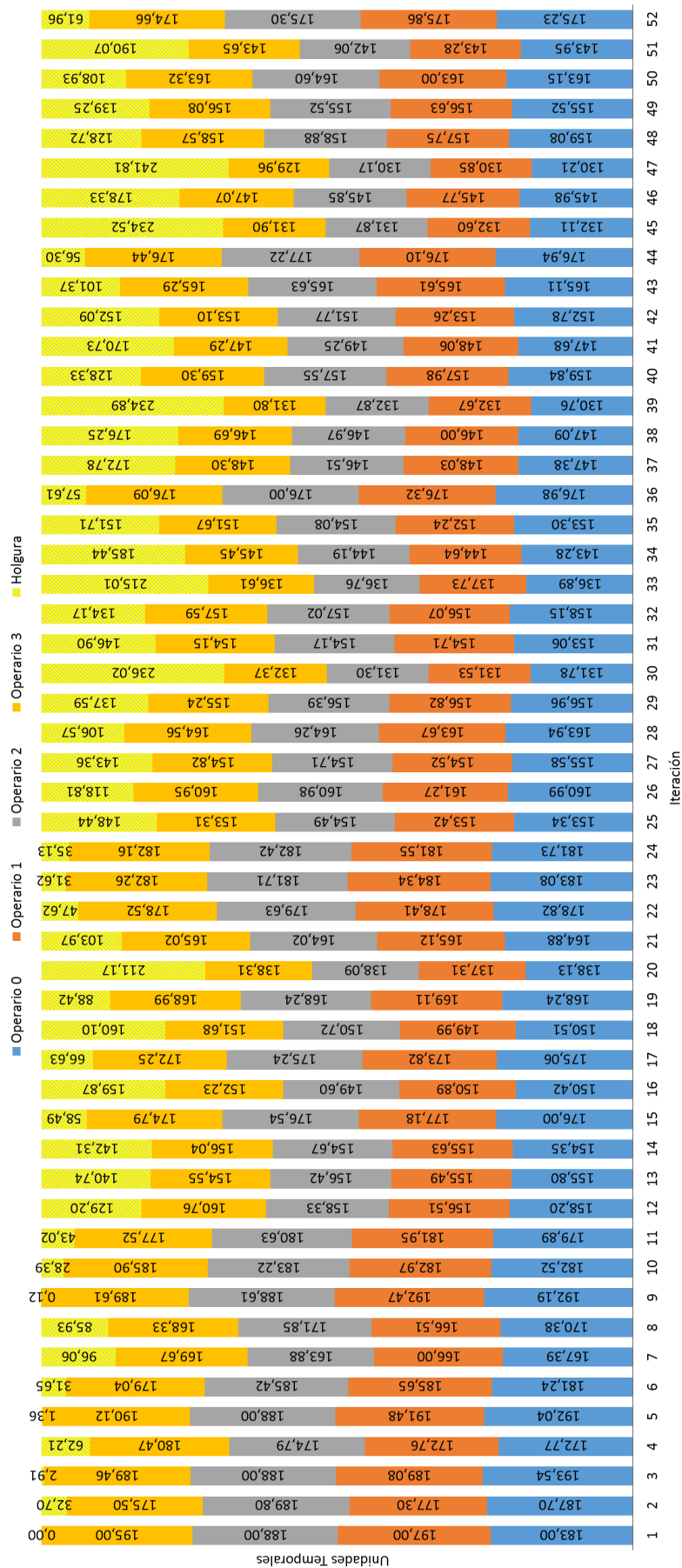


Figura 4.30 - Distribución de tiempos realizando tareas entre los operarios y holguras (Esc. III.2)

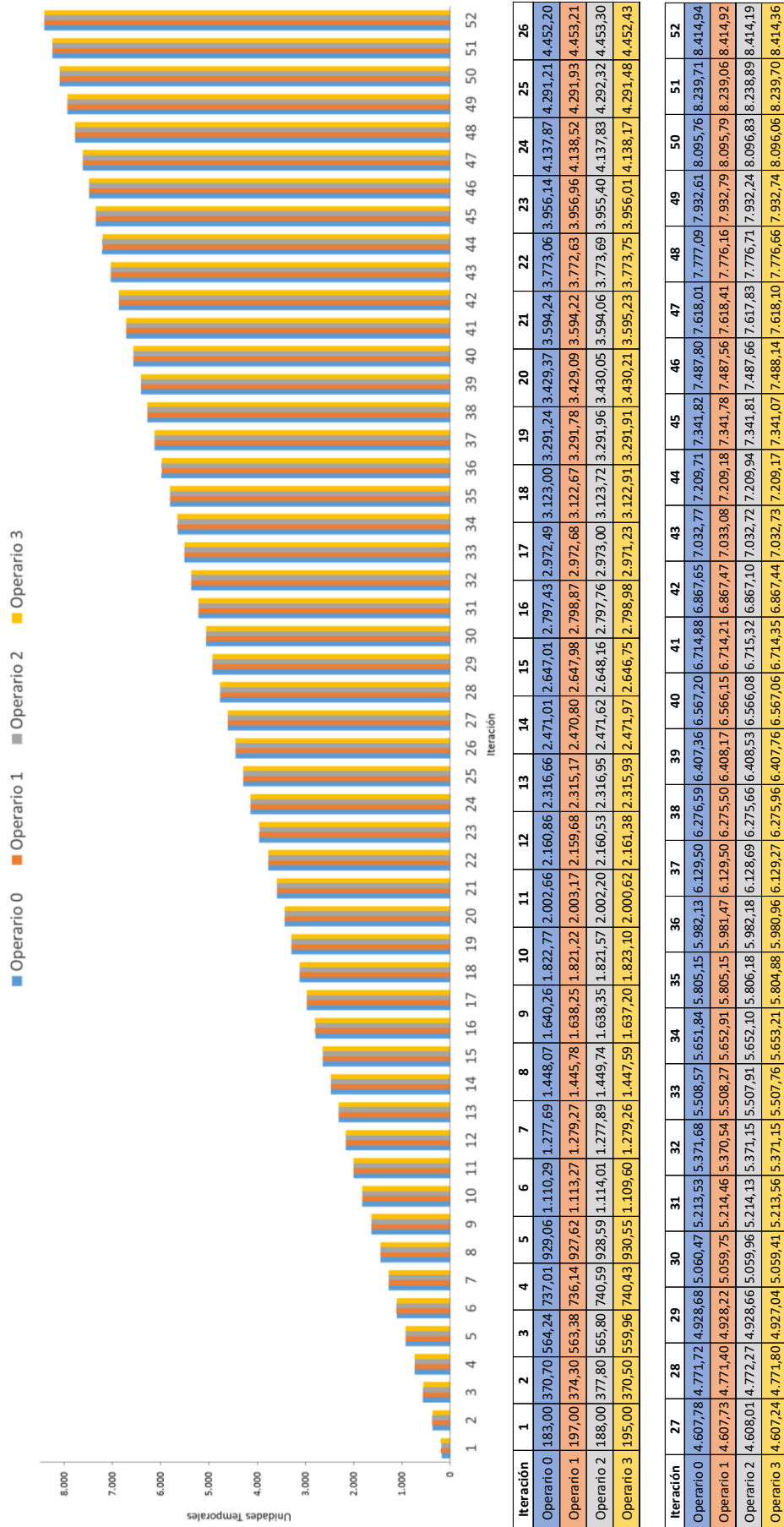


Figura 4.31 - Tiempos acumulados (Esc. III. 2)

En este caso en concreto y para los datos usados, el modelo de equilibrar iteración a iteración la carga de trabajo, Escenario III.1, da como resultado que los operarios están menos tiempo realizando tareas, pero se ha equilibrado la carga de trabajo de todos los operarios. Para una aplicación práctica real o en otro escenario diferente habría que plantear qué ventajas tiene aplicar un método sobre otro.

En la siguiente gráfica se ha incluido el cálculo del error cuadrático medio (diferencia cuadrática media del tiempo que cada trabajador está ocupado en cada iteración respecto al valor medio), es decir:

$$MSE = \frac{\sum_{vit,o} (q_o^{it} - \bar{q})^2}{numOperarios \cdot num_iter}$$

$$\text{donde } \bar{q} = \frac{\sum_{vit,o} q_o^{it}}{numOperarios \cdot num_iter}$$

	Esc. III.1	Esc. III.2
Operario 0	8.373,57	8.414,94
Operario 1	8.398,05	8.414,92
Operario 2	8.400,97	8.414,19
Operario 3	8.389,74	8.414,36
ECM	2,18	0,00

Figura 4.32 - Simulación III.1 vs Simulación III.2

Dado que el objetivo es equilibrar las cargas y según los resultados obtenidos en el cálculo del Error Cuadrático Medio, el Escenario III.2 es el que proporciona resultados más equilibrados ya que su ECM es 0 y el del Escenario III.1 es 2,18. Por tanto, en cuanto a equilibrado de horas de trabajo, los resultados apoyan que es más adecuado usar el Escenario III. 2.

4.4.3 Escenario III.3: Equilibrado de la carga para un número máximo de operarios dado.

Para comprobar realmente la utilidad del modelo, la última simulación se realiza fijando un número máximo de operarios por iteración, que en este caso es 3, de forma que al final de las 52 iteraciones, los 4 operarios de la plantilla tengan una carga de trabajo acumulada lo más pareja posible.

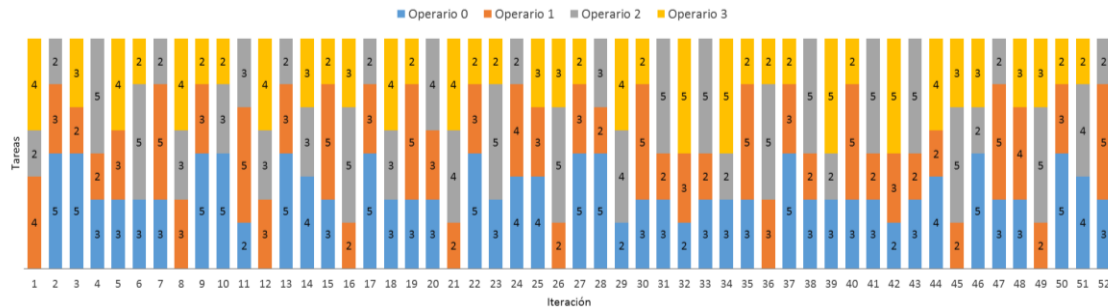


Figura 4.33 - Distribución del número de tareas entre los operarios (Esc. III.3)IV

En la figura 4.33 se puede comprobar como en cada iteración se seleccionan 3 operarios, que no siempre son los mismos, cumpliendo la restricción de que el máximo número de operarios sea 3.

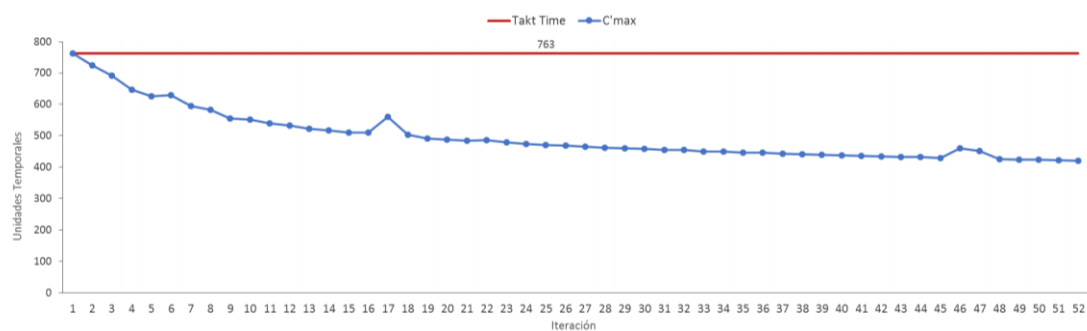


Figura 4.34 - Takt Time vs Cmax' (Esc. III.3)

Al igual que en los escenarios anteriores se observa como el modelo establece holuras que pueden eliminarse, en el caso estudiado de tareas secuenciales en las que el fin de una tarea determina el inicio de la siguiente, haciendo que el Cmax' (Cmax tras eliminar las holuras) disminuya.

La figura 4.34 recoge la reducción del Cmax tras la eliminación de las holuras tras el simple reproceso (Cmax').

A continuación, en la figura 4.35, se muestra el efecto de la holura en la iteración número 16.

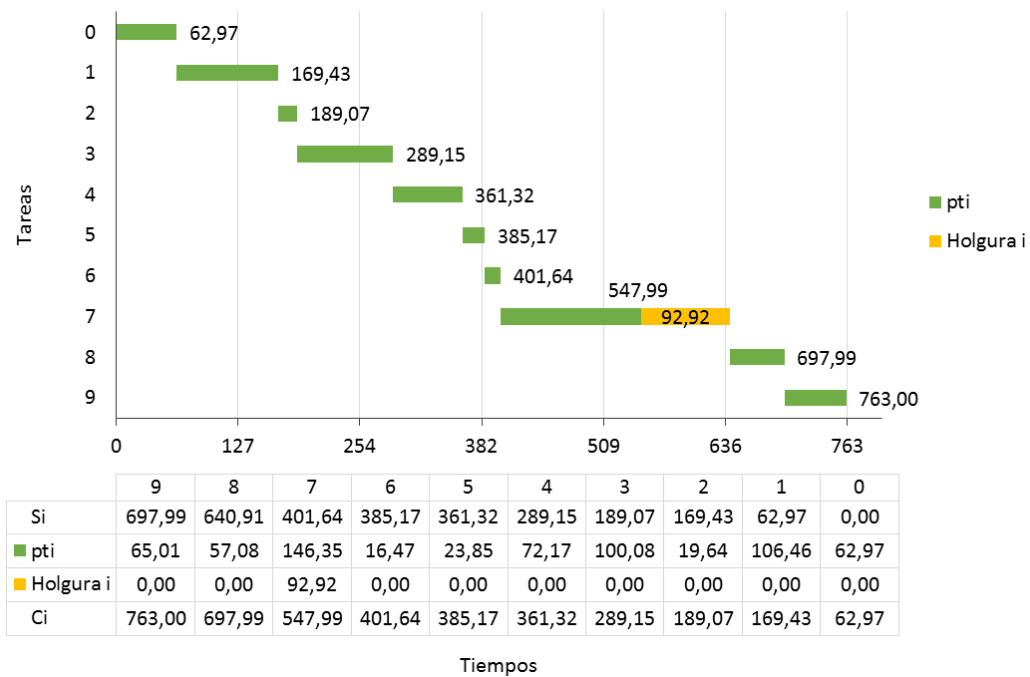


Figura 4.35 - Diagrama de Gantt para Iteración 16 (Esc. III.3)

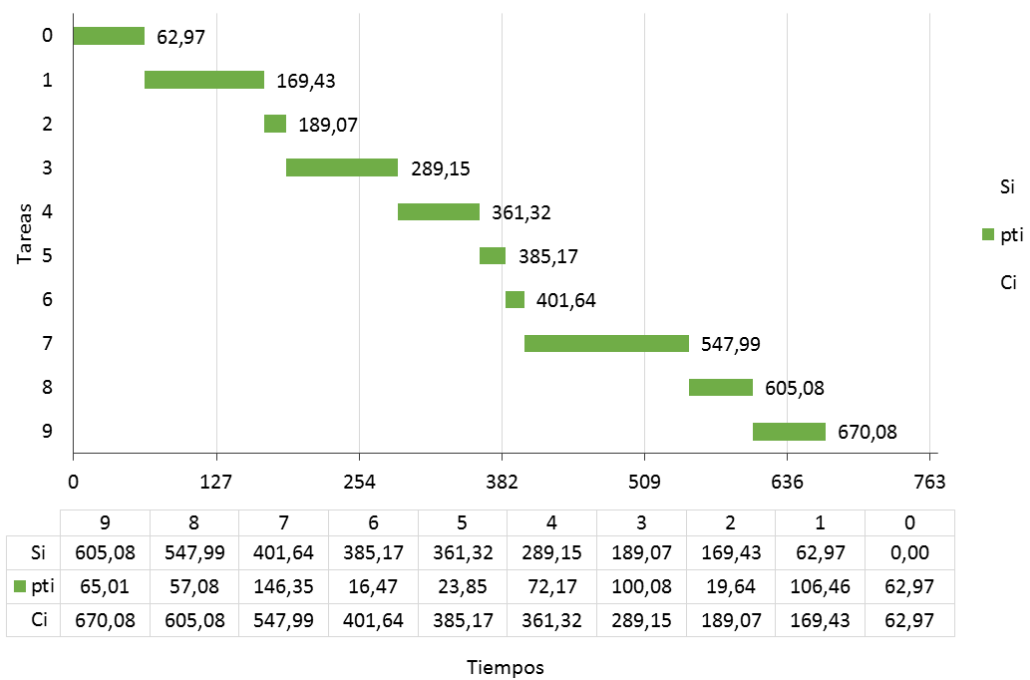


Figura 4.36 - Diagrama de Gantt para Iteración 16 tras reproceso (Esc. III.3)

La figura 4.36 muestra como con el reproceso de eliminar la holgura que el modelo establece al final de la tarea 7, se consigue que el makespan se reduzca.

En la figura 4.37 se observan los tiempos que están realizando tareas cada operario en cada iteración.

En la figura 4.38, se muestra cómo se va equilibrando la carga de trabajo de los operarios de forma que en la última iteración, la 52, los 4 operarios ven repartidas sus cargas de trabajo de la forma más equitativa posible.

Estos resultados pueden ser útiles para establecer diferentes cuadrantes de trabajo entre operarios de forma que se aproveche al máximo la plantilla disponible.

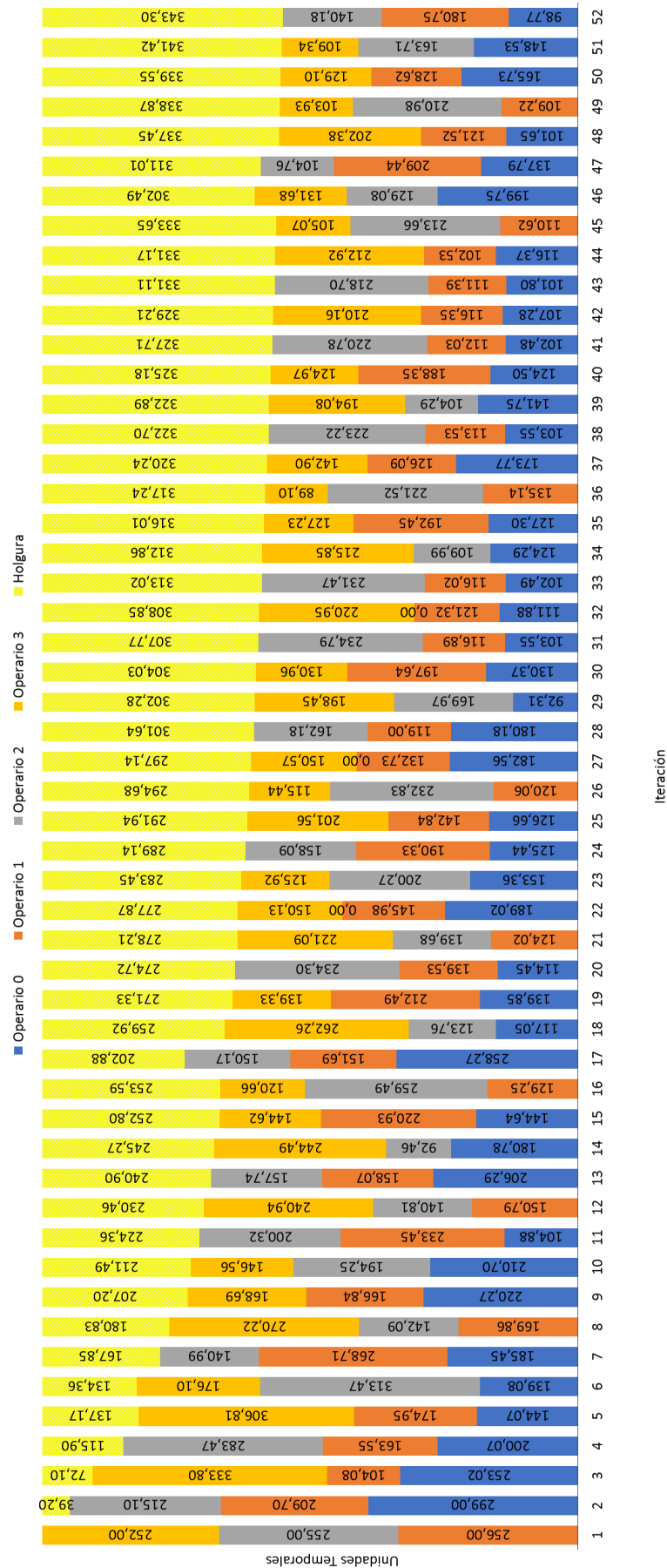


Figura 37 - Distribución de tiempos realizando tareas entre los operarios y holguras (Esc. III.3)

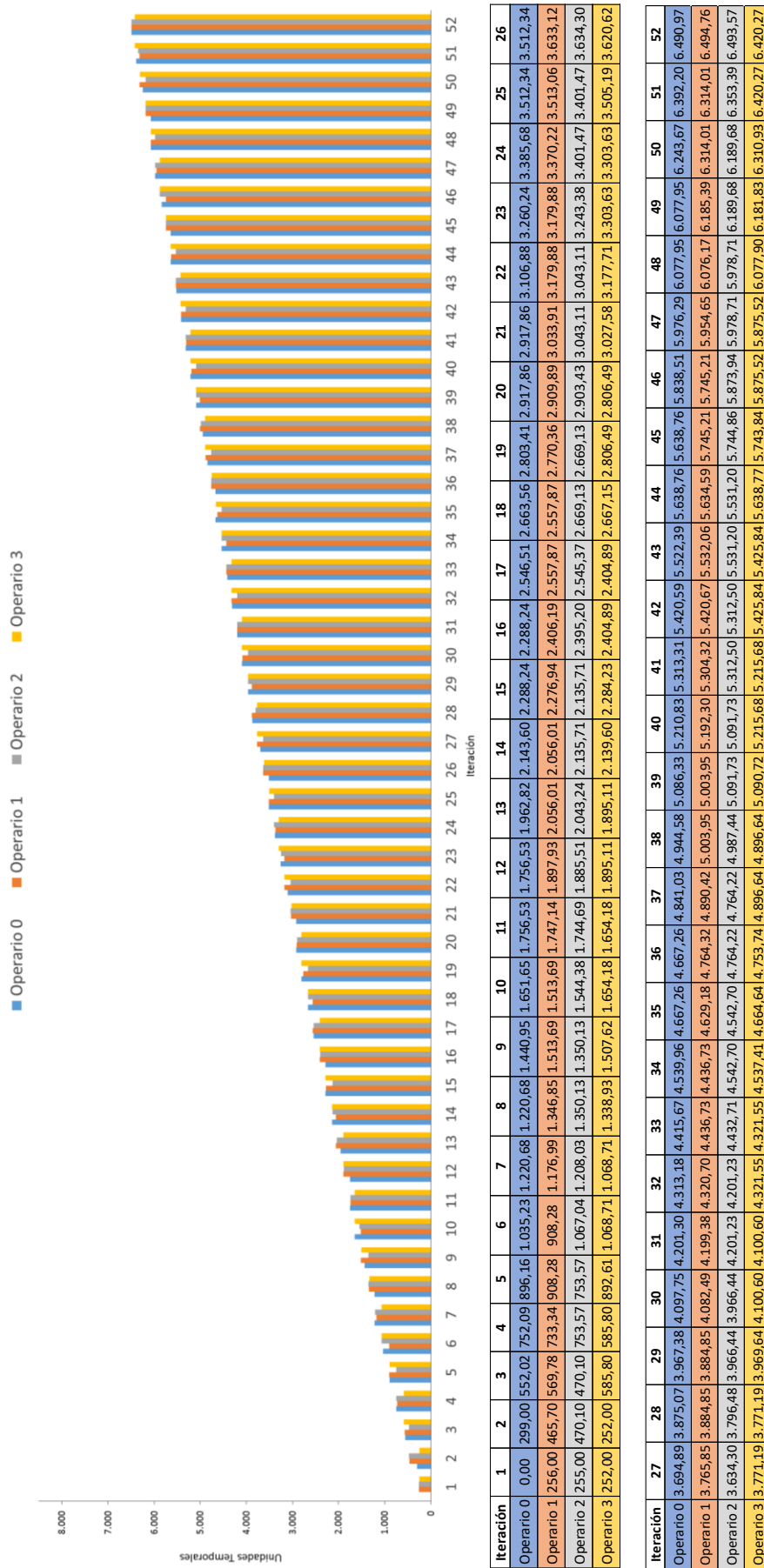


Figura 38 - Tiempos acumulados (Esc. III. 3)

5 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este apartado se presentan las principales conclusiones obtenidas tras la realización del proyecto y se detalla cómo se han alcanzado los objetivos específicos del proyecto. Además se enumeran un listado de contribuciones del trabajo y una serie de implicaciones a nivel práctico que aportan los resultados obtenidos. Por último, se aportan algunas posibles líneas de investigación futuras que pueden enriquecer el modelo desarrollado.

5.1. Conclusiones

Tal y como se ha manifestado durante todo este Trabajo Fin de Máster, el aprendizaje de los operarios en la realización de tareas es un aspecto muy importante y a tener en cuenta en los problemas de planificación de la producción en la industria aeronáutica, la que es muy dependiente del cumplimiento de los tiempos de pulso (Takt Time) debido a su estructura. A lo largo de los diferentes apartados que componen el proyecto, se ha facilitado al lector una visión general de los diferentes tipos de los problemas de asignación de tipo Job Shop, con foco especial en los que consideran dos recursos (operario y máquina), y de la importancia de la curva de aprendizaje. De esta forma, se puede dar por resuelto el primer objetivo específico presentado en el Capítulo 1.1.

El segundo objetivo específico del proyecto se puede dar por alcanzado con la propuesta de modelo, presentada en el capítulo 3 para resolver el problema propuesto (JSPSTO), que combina el problema de asignación tipo Job Shop con los recursos máquina y operario (con diferentes habilidades para realizar tareas) y el efecto que tiene la curva de aprendizaje en la reducción del tiempo de finalización del trabajo. Con esta propuesta se cubre un vacío existente en la bibliografía revisada. Además de este modelo, se ha presentado un modelo que es de gran ayuda para comprobar el efecto que tiene la curva de aprendizaje sobre la plantilla. Con este último estudio se pueden dar nuevos usos a la plantilla que hay en exceso.

Para finalizar y cumpliendo con el tercer y último objetivo específico, las simulaciones realizadas en este proyecto demuestran que es un modelo válido y para los casos propuestos se ha llegado a una solución óptima en las simulaciones realizadas a través del software elegido.

Alcanzados los tres objetivos específicos propuestos al inicio del proyecto, se puede llegar a la conclusión de que el objetivo general del Trabajo Fin de Máster se cumple de forma satisfactoria.

5.2. Contribuciones del Trabajo

Las principales contribuciones de este proyecto a futuras investigaciones son:

1. El trabajo puede servir como punto de partida para futuras revisiones del Estado del arte sobre un tema nuevo y aplicable en la industria y que hasta ahora está poco estudiado como es el del efecto que tiene el aprendizaje en los tiempos de finalización de tareas.
2. El nuevo problema propuesto, definido como JSPSTO, puede dar lugar a nuevas investigaciones que contribuyan a la aplicación de estas técnicas en la industria.
3. Se ha modelado el problema para 3 situaciones diferentes, atendiendo a la minimización del C_{max} y a la optimización de la plantilla, en cuanto a minimización del número de trabajadores necesarios y al equilibrado de la carga de trabajo entre los operarios.
4. La resolución del modelo para 4 escenarios posibles permite verificar la validez del modelo y aporta ideas sobre su aplicación en casos reales.

5.3. Implicaciones a nivel práctico

Tras analizar los resultados obtenidos, se puede concluir que este modelo es aplicable en el contexto actual de la industria auxiliar aeronáutica en la región, dado a que estas empresas trabajan bajo la premisa de cumplir el Takt Time. Los modelos matemáticos desarrollados en este proyecto demuestran que el aprendizaje influye en los tiempos de realización de tareas y cómo a partir de dicho aprendizaje se pueda buscar disminuir el tiempo de finalización de los trabajos u optimizar el uso de los trabajadores.

Dada la competitividad existente entre las empresas del sector aeronáutico en la región, el uso óptimo de la plantilla y la reducción de tiempos en la ejecución de tareas puede hacer conseguir a una empresa una ventaja competitiva frente a sus competidoras. Conocer la asignación óptima que permita cumplir con el Takt Time, en la que los operarios tengan una carga de trabajo equilibrada y que gracias al aprendizaje puedan reducir el tiempo de finalización de la tareas es de gran ayuda a la hora de dimensionar la plantilla o de usarla de la manera más adecuada posible reubicando a los trabajadores en las actividades que requieran más apoyo, lo que puede suponer una importante reducción de costes en las empresas.

5.4. Futuras Líneas de Investigación

Una vez desarrollado el proyecto, se han descubierto líneas de investigación con las que se puede mejorar y ampliar el espectro del problema. A continuación, se enumeran algunas de ellas:

- Los modelos 2 y 3, tienen la debilidad de establecen holguras innecesarias entre tareas, que impiden minimizar el C_{max} . Estas holguras aparecen debido a que la función objetivo de estos modelos no es la de minimizar el C_{max} , sino que es en un caso minimizar el número de trabajadores y en el otro equilibrar las cargas. Como gracias al aprendizaje que obtienen los operarios al realizar las tareas más de una vez, se consigue reducir los tiempos de realización de dichas tareas, realmente el C_{max} si se reduce pero para ello hay que realizar un reproceso para eliminar las holguras innecesarias. Una posible mejora puede ser la de desarrollar un modelo multi-objetivo para sistemas productivos más complejos en el cual se trate de minimizar esas holguras.
- En este proyecto se ha tenido en cuenta el efecto del aprendizaje de cada operario en la realización de las tareas en cada máquina. Pueden existir otras interpretaciones, teniendo en cuenta que el factor de aprendizaje solo influya en la ejecución de la tarea independientemente de la máquina en la que se realice.
- Establecer un límite a partir del cual puede ser interesante realizar un cambio de operarios, para que exista más de un trabajador con experiencia en la realización de cada tarea, de forma que se evite que los empleados pierdan interés una vez que tienen dominadas las tareas que realizan.
- También puede ser interesante para la aplicación práctica, que exista un operario que esté formado en la realización de varias tareas para servir como apoyo en caso de baja de alguno de los operarios principales.
- En lo que respecta a la resolución, debido a que para problemas grandes (con muchas tareas) el tiempo para resolverlo se extiende en exceso, se podrían desarrollar heurísticas que resolvieran el problema de forma rápida proporcionando una solución que aunque no fuese la óptima, no se alejase mucho de ésta.
- Como es conocido, no todas las personas aprenden o mejoran al mismo ritmo que las demás. En este punto hay una línea de mejora del modelo ya que el modelo actual contempla que todos los operarios haciendo una tarea aprenden al mismo ritmo.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] García J.; Maldonado A.; Cortes G. (2014). *Lean Manufacturing in the Developing World: Methodology, Case Studies and Trends from Latin America*. Springer. 1, 5.
- [2] Womack J.; Jones D.; Roos D. (1990). *The Machine That Changed the World*.
- [3] Murman E.; Allen T.; Bozdogan K.; Cutcher-Gershenfeld J.; McManus H.; Nightingale D.; Rebentisch E.; Shields T.; Stahl F.; Walton M.; Warmkessel J.; Weiss S.; Widnall S. (2002). *Lean Enterprise Value: Insights from Mit's Lean Aerospace Initiative*.
- [4] Parveen S.; Ullah H. (2010). Review on Job-Shop and Flow-Shop Scheduling using Multi criteria decision making. *Journal of Mechanical Engineering*. 41(2). 130-145.
- [5] Framinan J.; Leistein R.; Ruiz R. (2014). *Manufacturing Scheduling Systems. An integrated view on Models, Methods and Tools*. 51-63.
- [6] Conway W.; Maxwell L.; Miller L. (1967). *Theory of Scheduling*.
- [7] Błażewicz, J.; Domschke, W.; Pesch, E. (1996). The job shop scheduling problem: Conventional and new solution techniques. *European Journal of Operational Research*. 93(1), 1-33.
- [8] Agentis A.; Flamini M.; Nicosia G.; Pacifici A. (2011). A job-shop problem with one additional resource type. *Journal of Scheduling*. 14 (3), 225–237.
- [9] Agnetis A., Murgia G.; Sbrilli S. (2013). A Job-Shop Scheduling Problem with human operators in handicraft production. *International Journal of Production Research*. 52(13), 3820-3831.
- [10] Mencía R.; Sierra M.; Mencía C.; Varela R. (2015). Schedule Generation Schemes and Genetic Algorithm for the Scheduling Problem with Skilled Operators and Arbitrary Precedence Relations. *Association for the Advancement of Artificial Intelligence. ICAPS 2015*. 165-173
- [11] Mencía R.; Sierra M.; Varela R. (2015). Genetic Algorithm for the Job-Shop Scheduling with Skilled Operators. *IWINAC 2015. Part II. LNCS 9108*. 41-50.
- [12] Wright T. (1936). Factors Affecting the Cost of Airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 3(4). 122-128.
- [13] Kar A. A Cost Modeling Approach Using Learning Curves to Study the Evolution of Technology. (2007). Thesis (S.M.). Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Materials Science and Engineering.
- [14] Slack N.; Brandon A., Johnston R. *Operations Management*. 7th Edition

- [15] Bharadwaj N.; Shashank S.; Harish M.; Garre P. (2015). A Review On Lean Manufacturing to Aerospace Industry. *International Journal of Engineering Research and General Science*. 3 (4). 429 – 439.
- [16] Abdulmaleka F.; Rajgopalb J. (2007). Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: A process sector case study. *International Journal of Production Economics*. 107(1). 223-236.
- [17] Souza J.; Alves J.; Silva M. (2014). Quality Improvement in the Aerospace Industry: Investigation of the Main Characteristics. *International Review of Mechanical Engineering*. 8(5). 893-900.
- [18] Chang H.; Huang C.; Torng C. (2013) Lean Production Implement Model for Aerospace Manufacturing Suppliers. *International Journal of Innovation, Management and Technology*. 4 (2). 248-252.
- [19] Crute. V; Ward Y.; Brown S.; Graves A. (2003). Implementing Lean in aerospace - challenging the assumptions and understanding the challenges. *Technovation*. 23(12). 917-928
- [20] Guoyong S. (1997). A genetic algorithm applied to a classic job-shop scheduling problem. *International Journal of Systems Science*. 28(1). 25-32.
- [21] Jain A.S; Meeran, S. (1999). A State-of-the-art Review of Job-shop Scheduling Techniques. *European Journal of Operations Research*. 113 (2). 390-434.
- [22] Castrillón O.; Giraldo J.; Sarache W. (2009). Job Shop problem solution with an intelligent agent. *Ingeniería y Ciencia*. 5 (10). 75-92.
- [23] Liu C.; Yang N.; Li W.; Lian J.; Evans S.; Yin Y. (2013). Training and assignment of multi-skilled workers for implementing seru production systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 69 (5). 937-959.
- [24] Varela R.; Serrano D.; Sierra M. (2005). New Codification Schemas for Scheduling with Genetic Algorithms. *Artificial Intelligence and Knowledge Engineering Applications: A Bioinspired Approach*. 3562 (Lecture Notes in Computer Science). 11-20.
- [25] Battaia, O.; Delorme X.; Dolgui A.; Hagemann J.; Horlemann A.; Kovalev, S.; Malyutin, S. Workforce minimization for a mixed-model assembly line in the automotive industry. *International Journal of Production Economics*. 170. 489-500.
- [26] Corominas A.; Pastor R.; and Plans J. (2008). Balancing assembly line with skilled and unskilled workers. *Omega*. 36(6). 1126-1132
- [27] Sector aeronáutico en Andalucía - Una región innovadora que apuesta por el sector aeronáutico. Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía IDEA.

[28] Retos del Sector Aeronáutico en España. Guía Estratégica 2015-2025. Asociación Española de Empresas Tecnológicas de Defensa, Aeronáutica y Espacio (TEDAE).

[29] El sector aeronáutico y espacial español: Situación actual y perspectivas. (2011). Observatorio Industrial del Sector de Fabricantes de Bienes de Equipo.