ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
DEPARTAMENTO DE ORGANIZACIÓN DE EMPRESAS
Programa de Doctorado en Administración y Dirección de Empresas

MODELADO Y RESOLUCIÓN DE VARIANTES DEL PROBLEMA DE SECUENCIACIÓN DE MODELOS MIXTOS CON MINIMIZACIÓN DE LA SOBRECARGA (*MMSP-W*), CON FACTORES DE ACTIVIDAD Y REGULARIDAD EN LA PRODUCCIÓN

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTORA POR LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DOCTORANDA:
ROCÍO ALFARO POZO

DIRECTOR DE TESIS:
JOAQUÍN BAUTISTA VALHONDO

Barcelona, SEPTIEMBRE de 2014

AGRADECIMIENTOS

Quisiera dedicar unas palabras a todas las personas que, de una u otra manera, han hecho posible que el trabajo, desarrollado durante los tres últimos años, haya dado su tan deseado fruto.

En especial quisiera agradecer al Catedrático Joaquín Bautista Valhondo, director de esta investigación, todo la ayuda brindada desde el primer día en que pisé esta escuela como investigadora. Gracias por la orientación, por el seguimiento y supervisión continua de mi trabajo, por enseñarme día a día, por transmitirme tantos conocimientos, pero sobre todo por la confianza que en su día depositó en mí y que ha hecho que todo esto sea posible.

Gracias a mis compañeros, en especial a Cristina Batalla, con los cuales he compartido despacho y muchas horas de trabajo. Gracias por aguantarme y por ayudarme cuando lo he necesitado. Sin vosotros, todos los momentos vividos no hubieran sido lo mismo.

Gracias a Carlos, mi compañero de vida, por su incondicional apoyo, por motivarme en los momentos más difíciles, por no dejarme tirar la toalla y por estar a mi lado. Gracias por cada día que pasamos juntos, y por hacer que todo parezca más sencillo.

Y por último, pero no menos importante, gracias a mis padres y a mis hermanas, por apoyarme y respetarme cuando tomé la decisión de venirme a Barcelona, por estar siempre a mi lado, a pesar de la distancia que nos separa, por inculcarme valores y principios, por vuestra sinceridad y vuestro cariño, por hacer de mí la persona que soy hoy en día. Gracias a Xabi, por hacer que los problemas desaparezcan y llenar de alegría nuestras vidas. Por vosotros soy quien soy y sin vosotros no soy nada.

A todos ellos, y todas las personas, amigos, familia, compañeros, profesores y alumnos, que han colaborado en mi formación, tanto profesional como personalmente, gracias. Jamás podría encontrar las palabras necesarias para demostrarles mi gratitud. Esta tesis, fruto de la dedicación, esfuerzo y trabajo, también es su regalo.

Gracias también a Nissan Spanish Industrial Operations por su colaboración y por facilitarnos el caso de estudio objeto de esta investigación y al proyecto de investigación PROTHIUS-III, DPI2010-16759.

RESUMEN

Actualmente, son muchos los sistemas productivos en los que la fabricación o montaje, de toda o parte de la producción, se lleva a cabo en líneas de producción. Además, la exigencia actual del mercado hace que cada vez sea más necesario que las compañías ofrezcan una gran variedad de productos con diferentes opciones. Esta situación podemos encontrarla fácilmente en el sector del automóvil, donde se fabrican diferentes tipos de productos que, a pesar de pertenecer a la misma familia, poseen diferentes características y requieren, por tanto, diferente consumo de componentes y uso de recursos. En efecto, no todos los vehículos llevan el mismo tipo de motor y no todos los vehículos están equipados con los mismos componentes, tanto interiores como exteriores.

Un claro ejemplo de este tipo de líneas de productos mixtos (*MMAL*, Mixed-Model Assembly Lines) son las líneas de motores o las líneas de ensamblaje donde se incorporan los diferentes componentes (asientos, pedales) al cuerpo del vehículo. Esta variedad en la gama de productos provoca la necesidad de que las líneas de producción actuales sean flexibles y, por tanto, puedan adaptarse a la diversidad de productos que se realizan en ellas, sin incurrir en costes excesivos.

Así, con el objetivo de flexibilizar y reducir costes, tanto de mano de obra como de manipulación y almacenamiento, las líneas de montaje de productos mixtos presentan dos problemas básicos: (1) el equilibrado de la línea y (2) la secuenciación de unidades de productos mixtos.

Dentro de estos últimos se encuentra el problema, objeto de estudio de esta tesis, conocido en la literatura como *MMSP* (Mixed-Model Sequencing Problem). Este problema consiste en establecer un orden de fabricación de los productos con el objetivo de: (1) minimizar los niveles de stock de productos y componentes; (2) minimizar la sobrecarga de trabajo o cantidad de trabajo no completado; o (3) minimizar el número de sub-secuencias con opciones especiales.

Concretamente, en esta tesis se estudia el problema de secuencias de productos mixtos, en líneas de producción, que minimizan el trabajo no completado o sobrecarga (*MMSP-W*: Mixed-Model Sequencing Problem with Workload Minimisation). En efecto, con el objetivo de orientar el problema de la literatura no sólo a la mejora de la productividad, sino también a la mejora de las condiciones laborales de los operarios de la línea, se estudian cuatro variantes, en las que se incorporan aspectos propios de las situaciones reales que se dan en los sistemas productivos actuales.

La primera variante estudiada, además de considerar estaciones de trabajo dispuestas en serie y, por tanto, vinculadas entre sí, considera la posibilidad de que en una misma estación puedan concurrir diversos procesadores homogéneos, así como la posibilidad de que todas las estaciones puedan retener todas las unidades de producto un tiempo superior al tiempo de ciclo, con el fin de completar el trabajo requerido. Esta variante dará como resultado dos modelos matemáticos equivalentes, cuyos objetivos se basarán en la optimización de la sobrecarga o del trabajo completado y que servirán como punto de partida de las siguientes variantes estudiadas.

La segunda variante, incorpora conceptos propios de la ideología de gestión *JIT* (Just In Time), pues además de minimizar la sobrecarga o maximizar el trabajo completado, se considera la conveniencia de obtener secuencias de productos de forma que, tanto el trabajo requerido, como el completado o como la sobrecarga, correspondiente a todas las estaciones en una jornada laboral, se distribuya homogéneamente a lo largo del tiempo. Este estudio dará lugar a nuevos modelos multi- y mono-objetivos, cuyo propósito será el de minimizar la sobrecarga de trabajo evitando sobre-esfuerzos no deseables para los recursos humanos.

En la tercera variante, se consideran tiempos variables de las operaciones en función del ritmo de actividad de los operarios a lo largo de la jornada. Así, en base a la idea de que la actividad de los operarios no se mantiene constante a lo largo el tiempo, se definen diferentes perfiles para el factor de actividad de los operarios. Estos perfiles forzarán un aumento de la velocidad de trabajo de los operarios, en determinados momentos de la jornada laboral, completando así mayor cantidad de trabajo requerido y, por tanto, reduciendo la sobrecarga global.

Por último, teniendo en cuenta, también, la presencia de recursos humanos en las estaciones de trabajo, se consideran las condiciones laborales pactadas entre empresa y sindicatos, respecto a la saturación o nivel de ocupación de los operarios de la línea. De este modo, se formulan nuevos modelos matemáticos para el *MMSP-W*, que además de minimizar la cantidad de trabajo perdido, respetan los valores máximos, establecidos por convenios, en cuanto a la saturación media y máxima de los procesadores de las estaciones de trabajo.

Finalmente, cabe destacar que todas las variantes estudiadas se evalúan mediante un caso de estudio vinculado a la planta de motores de Nissan en Barcelona. De esta manera, se podrán comparar los resultados obtenidos con los modelos de referencia, con los obtenidos con los modelos propuestos a lo largo de esta tesis, desde un punto de vista computacional, económico, social y legal.

RESUM

Actualment, són molts els sistemes productius en els quals la fabricació o muntatge, de tota o part de la producció, es duu a terme en línies de producció. A més, l'exigència actual del mercat fa que cada vegada sigui més necessari que les companyies ofereixin una gran varietat de productes amb diferents opcions. Aquesta situació podem trobar-la fàcilment al sector de l'automòbil, on es fabriquen diferents tipus de productes, que malgrat pertànyer a la mateixa família, posseeixen diferents característiques i requereixen, per tant, diferent consum de components i ús de recursos. En efecte, no tots els vehicles porten el mateix tipus de motor i no tots els vehicles estan equipats amb els mateixos components, tant interiors com a exteriors.

Un clar exemple d'aquest tipus de línies de productes mixtos (*MMAL*, Mixed-Model Assembly Lines) són les línies de motors o les línies d'assemblatge on s'incorporen els diferents components (seients, pedals) al cos del vehicle. Aquesta varietat a la gamma de productes, provoca la necessitat que les línies de producció o muntatge actuals siguin flexibles i, per tant, puguin adaptar-se a la diversitat de tipus de productes que es realitzen en elles, sense incórrer en costos excessius.

Així, amb l'objectiu de flexibilitzar i reduir costos, tant de mà d'obra com de manipulació i emmagatzematge, les línies de muntatge de productes mixtos presenten dos problemes bàsics: (1) l'equilibrat de la línia i (2) la seqüenciació d'unitats de productes mixts.

Dins d'aquests últims es troba el problema, objecte d'estudi d'aquesta tesi, conegut dins la literatura com *MMSP* (Mixed-Model Sequencing Problem). Aquest problema consisteix en establir un ordre de fabricació dels productes amb l'objectiu de: (1) minimitzar els nivells d'estoc de productes i components; (2) minimitzar la sobrecàrrega de treball o la quantitat de treball no completat; o (3) minimitzar el nombre de sub-seqüències amb opcions especials.

Concretament, en aquesta tesi s'estudia el problema de seqüències de productes mixtos, dins línies de producció, que minimitzen el treball no completat o sobrecàrrega (*MMSP-W*: Mixed-Model Sequencing Problem with Workload Minimisation). En efecte, amb l'objectiu d'orientar el problema de la literatura no només a la millora de la productivitat, sinó també a la millora de les condicions laborals dels operaris de la línia, s'estudien quatre variants, en les quals s'incorporen aspectes propis de les situacions reals que es donen en els sistemes productius actuals.

La primera variant estudiada, a més de considerar estacions de treball disposades en sèrie i, per tant, vinculades entre si, considera la possibilitat que en una mateixa estació puguin concórrer diversos processadors homogenis, així com la possibilitat que totes les estacions puguin retenir totes les unitats de producte un temps superior al temps de cicle, amb la finalitat de completar el treball requerit. Aquesta variant donarà com a resultat dos models matemàtics equivalents, els objectius dels quals es basaran en l'optimització de la sobrecàrrega de treball o del treball completat i ambdós serviran com a punt de partida per a les següents variants estudiades.

La segona variant, incorpora conceptes propis de la ideologia de gestió *JIT* (Just In Time), doncs a més de minimitzar la sobrecàrrega o maximitzar el treball completat, es considera la conveniència d'obtenir seqüències de productes de manera que, tant el treball requerit, com el completat, o com la sobrecàrrega de treball, corresponent a totes les estacions en una jornada laboral, es distribueixi homogèniament al llarg del temps. Aquest estudi donarà lloc a nous models multi i mono-objectius, el propòsit dels quals serà el de minimitzar la sobrecàrrega de treball evitant sobre-esforços no desitjables per als recursos humans.

A la tercera variant, es consideren temps variables de les operacions en funció del ritme d'activitat dels operaris al llarg de la jornada. Així, sobre la base de la idea que l'activitat dels operaris no es manté constant al llarg el temps, es defineixen diferents perfils per al factor d'activitat dels operaris. Aquests perfils forçaran un augment de la velocitat de treball dels operaris, en determinats moments de la jornada laboral, completant així major quantitat de treball requerit i, per tant, reduint la sobrecàrrega global.

Per últim, tenint en compte, també, la presència de recursos humans en les estacions de treball, es consideren les condicions laborals pactades entre empresa i sindicats, respecte a la saturació o nivell d'ocupació dels operaris de la línia. D'aquesta manera, es formulen nous models matemàtics per el *MMSP-W*, que a més de minimitzar la quantitat de treball perdut, respecten els valors màxims, establerts per convenis, quant a la saturació mitjana i màxima dels processadors de les estacions de treball.

Finalment, cal destacar que totes les variants estudiades s'avaluen mitjançant un cas d'estudi vinculat a la planta de motors de Nissan a Barcelona. D'aquesta manera, es podran comparar els resultats obtinguts amb els models de referència, amb els obtinguts amb els models proposats al llarg d'aquesta tesi, des d'un punt de vista computacional, econòmic, social i legal.

ABSTRACT

Nowadays, there are many production systems in which the manufacture of all or part of the production takes place in assembly lines. In addition, the current demand of the market makes necessary that companies provide a wide range of products with different options. This situation can easily be found in the automobile sector, where different product types have different characteristics and therefore require different component consumptions and resource use, despite belonging to the same family. Indeed, not all vehicles carry the same type of engine, and not all vehicles are equipped with the same components, both indoors and outdoors.

A clear example of this type of assembly lines with mixed products (*MMAL*, Mixed-Model Assembly Lines), is found in the engine lines or in assembly lines, where different components (seats, pedals) are incorporated into the body of the vehicle. This variety of the product range leads to the need for the current production or assembly lines are flexible and, therefore, the lines can adapt to the diversity of product types that are manufactured in them, without incurring excessive costs .

Thus, with the aim of making flexible and reducing costs by labor, handling and storage, the mixed product lines have two basic problems: (1) the balancing assembly line and (2) the sequencing of units of mixed-products.

Among the latter problems, we find the study object of this thesis, that is known as *MMSP* (Mixed-Model Sequencing Problem) in the literature. This problem consist of establishing a manufacturing order of the products with the aim of: minimising the product and component stock levels; (2) minimising the work overload or the uncompleted work; or (3) minimising the sub-sequence number with special options.

Specifically, in this thesis we study the mixed-model sequencing problem, in assembly lines, with the minimisation of the uncompleted work or work overload (*MMSP-W*: Mixed-Model Sequencing Problem with Workload Minimisation). Indeed, with the focus of addressing the literature problem, not only to the improvement of productivity, but also to the improvement of the working conditions of the operators of the line, we study four variants, in which we incorporate aspects of the real-life situations that occur in the current production systems.

In the first studied variant, in addition to consider workstations arranged in series and, therefore, interlinked, we consider that in a same workstation may coincide different homogeneous processors, as well as the possibility that all stations can hold all product units a time longer than the cycle time, in order to complete the required work. This variant will result in two equivalent mathematical models, whose objectives will be based on the optimization of the work overload or the completed work and which will serve as the starting point of the following studied variants.

The second variant incorporates concepts from the management ideology *JIT* (Just In Time) since, in addition to minimise the work overload or maximise the completed work, this extension considers the convenience of obtaining product sequences that distribute evenly over time the required work, the completed work or the work overload corresponding to all work stations in a workday. This study will give rise to new multi and mono-objectives mathematical models, whose purpose will be to minimize the workload avoiding undesirable excess efforts for human resources.

In the third variant variable processing times of operations are considered according to the rhythm of activity of operators throughout their workday. Thus, based on the idea that the activity of operators is not maintained constant along the time, different profiles for the factor of activity or work pace are defined. These profiles will force an increase of the working speed of the operators, at certain times of the workday, and thus it is completing more required work and, therefore, the overall work overload is reduced.

At last, taking into account the presence of human resources on workstations, we consider the working conditions agreed between the company and trade unions with respect to saturation or level of employment of the workers of the line. Thus, we formulate new mathematical models for the *MMSP-W* which respect the maximum values laid down by collective agreements, in terms of average and maximum saturation of workstation processors, in addition to minimise the amount of lost work.

Finally, note that all studied extensions for the *MMSP-W* are evaluated through a case study linked to the plant of engines from Nissan in Barcelona. In this way, we can compare the results obtained with the reference models, with those obtained by the proposed models throughout this thesis, from a computational, economic, social and legal point of view.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS III

RESUMEN V

RESUM VII

ABSTRACT IX

ÍNDICE GENERAL XI

ÍNDICE DE TABLAS XV

ÍNDICE DE FIGURAS XXI

I MARCO TEÓRICO 1

1. INTRODUCCIÓN 3

1.1. Preliminares . . . 3

1.2. Marco General de la Secuenciación de Unidades en Contexto *JIT* . . . 8

1.2.1. Secuenciación de la Producción en una Línea de Montaje . . . 9

1.3. Objetivos, Resultados Esperados e Hipótesis de Partida . . . 16

1.3.1. Objetivos y Resultados Esperados . . . 16

1.3.2. Hipótesis de Partida . . . 19

1.4. Motivación y Principales Contribuciones . . . 20

1.5. Estructura del Documento . . . 24

II EL *MMSP-W* Y SUS VARIANTES 27

2. EL *MMSP-W* 29

2.1. Introducción . . . 29

2.2. Formulación del Problema . . . 30
2.2.1. Métodos de Resolución . . . 33
2.3. Modelos de Referencia . . . 34
2.3.1. Modelo $M3$ . . . 37
2.3.2. Modelo $M4$ . . . 40

3. INTREGRACIÓN DE MODELOS PARA EL *MMSP-W* 43
3.1. Introducción . . . 43
3.2. Modelos Integradores para el *MMSP-W* . . . 44
3.2.1. Modelo $M3 \cup 4$ . . . 45
3.2.2. Modelo $M4 \cup 3$ . . . 46
3.2.3. Comparativa entre Modelos . . . 47
3.3. Un Ejemplo Ilustrativo . . . 48
3.4. Experiencia Computacional . . . 51
3.4.1. Experiencia Computacional con Instancias de la Literatura . . . 52
3.4.2. Caso de Estudio de la Planta de Motores de Nissan en Barcelona . . . 56
3.4.3. Análisis de la distribución de la Sobrecarga . . . 60
3.5. Conclusiones . . . 63

4. INCORPORACIÓN DEL CONCEPTO REGULARIDAD EN EL *MMSP-W* 65
4.1. Introducción . . . 65
4.2. Regularidad del Trabajo en una Línea de Producción . . . 67
4.2.1. Trabajo Requerido . . . 68
4.2.2. Trabajo Completado . . . 69
4.2.3. Sobrecarga de Trabajo . . . 69
4.2.4. Relaciones entre los Enfoques de la Regularidad de la Carga de Trabajo . . . 71
4.3. Modelos para el *MMSP-W* con Regularidad de la Carga de Trabajo en la Línea . . . 73
4.3.1. Modelos Multi-objetivo . . . 73
4.3.2. Modelos Mono-objetivo con Restricciones sobre el Mix de Producción . . . 77
4.3.3. Modelos Mono-objetivo con Ponderación de Funciones . . . 78
4.4. Un Ejemplo Ilustrativo . . . 80
4.5. Experiencia Computacional . . . 82
4.5.1. Evaluación de Modelos con Restricciones en el Mix de Producción . . . 82
4.5.2. Evaluación del Modelo Mono-objetivo con Ponderación de Funciones . . . 90
4.6. Conclusiones . . . 93

5. INCORPORACIÓN DEL FACTOR DE ACTIVIDAD EN EL *MMSP-W* 97
5.1. Introducción . . . 97

5.2. Conceptos Previos . . . 98
5.2.1. La Jornada Laboral . . . 99
5.2.2. La Actividad Normal Concertada . . . 100
5.3. Incorporando el Factor de Actividad al *MMSP-W* . . . 101
5.3.1. El Factor de Actividad a lo largo de la Jornada Laboral . . . 102
5.3.2. Modelos para el *MMSP-W* con Factor dinámico de Actividad de Trabajo . . . 106
5.4. Un Ejemplo Ilustrativo . . . 110
5.5. Experiencia Computacional . . . 112
5.5.1. Reducción de la Sobrecarga a través del Aumento del Factor de Actividad . . . 113
5.5.2. Análisis de la Calidad de las Soluciones . . . 118
5.6. Conclusiones . . . 122

6. CONTROL DE LA SATURACIÓN DE LAS ESTACIONES EN EL *MMSP-W* 125
6.1. Introducción . . . 125
6.2. Saturación de los Procesadores de la Línea de Montaje . . . 126
6.2.1. Saturación Estática de la Línea de Montaje . . . 127
6.2.2. Saturación Dinámica de la Línea de Montaje . . . 128
6.3. Efecto de la Saturación de los Procesadores sobre la Sobrecarga de Trabajo . . . 129
6.4. Medidas para reducir la Sobrecarga de Trabajo generada por la Limitación de la Saturación . . . 130
6.4.1. Refuerzos . . . 131
6.4.2. Rotaciones . . . 136
6.5. Modelos para el *MMSP-W* limitando la Saturación Dinámica Máxima y Media de los Procesadores . . . 139
6.6. Experiencia Computacional . . . 140
6.6.1. Cálculos Previos . . . 141
6.6.2. Evaluación de los Modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ 144
6.7. Conclusiones . . . 151

III COMENTARIOS Y CONCLUSIONES FINALES 157

7. APORTACIONES Y CONCLUSIONES 159
7.1. Principales Aportaciones y Resultados . . . 159
7.2. Conclusiones . . . 171

8. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN 181
8.1. Investigaciones Futuras sobre el *MMSP-W* . . . 181
8.2. Otras Futuras Líneas de Trabajo . . . 184

9. PUBLICACIONES **187**
9.1. Publicaciones relacionadas con el *MMSP-W* 187
9.2. Otras Publicaciones 192

IV Anexos **199**

A. Equilibrado de la Línea de Motores del Caso NISSAN-9ENG **201**

B. Resultados Experiencias Computacionales **207**
B.1. Integración de Modelos para el *MMSP-W* 207
B.2. Incorporación del Concepto Regularidad en el *MMSP-W* 212
B.3. Incorporación del Concepto de Actividad en el *MMSP-W* 264
B.4. Control de la Saturación de las Estaciones de Trabajo en el *MMSP-W* 268

BIBLIOGRAFÍA **293**

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Comparativa de los modelos $M1$, $M2$, $M3$, $M4$, $M4'$, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ 47
3.2. Ejemplo. Número de procesadores por estación y tiempos de proceso requeridos por unidad de producto y procesador 48
3.3. Ejemplo. Soluciones ofrecidas por $M1$, $M2$, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ 51
3.4. Planes de producción $(P_1, \ldots, P_{45})$ agrupados en cinco bloques $(B1, \ldots, B2)$ 52
3.5. Estructuras de tiempos de proceso por tipo de producto y estación 53
3.6. $CPU_{\text{mín}}$, $CPU_{\text{máx}}$ y $\overline{CPU}$, por bloques y estructuras, utilizados para resolver los 225 ejemplares con $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ 54
3.7. Soluciones óptimas obtenidas con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ para los 225 ejemplares de la literatura 55
3.8. Tiempos de proceso, $p_{i,k}$, por tipo de motor i y estación de trabajo k 56
3.9. Ejemplares NISSAN-9ENG 57
3.10. Sobrecarga (W) de los 46 ejemplares NISSAN-9ENG obtenida mediante CPLEX con $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$. 59
3.11. Mapas de sobrecarga, $w^{\circ}_{i,k}$, para los casos favorable, intermedio y desfavorable del conjunto de ejemplares NISSAN-9ENG 61

4.1. Ejemplo. Número de procesadores por estación y tiempos de proceso requeridos por unidad de producto y procesador 80
4.2. Ejemplo. Soluciones ofrecidas por $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ 82
4.3. Tiempos de CPU mínimo, máximo y promedio requeridos por $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$ para los óptimos 85
4.4. Valores de $RPD_1(f)$, $RPD_2(f)$ y $RPD_6(f)$ $(\forall f \in \Im)$, por estructuras y bloques, y valores medios para las 225 instancias 85
4.5. Valores de sobrecarga (W) y ratios $(RPD_1, \ldots, RPD_6)$ de $M3 \cup 4_pmr$, $M4 \cup 3_pmr$, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ para 23 ejemplares del conjunto NISSAN-9ENG 87
4.6. RPD_1, RPD_2 y RPD_6, para las funciones $\Delta_Q(X)$, $\Delta_Q(P)$, $\Delta_Q(W)$ y $\Delta_Q(V)$, correspondientes a los 23 ejemplares del conjunto NISSAN-9ENG 88

4.7. Tiempos de CPU mínimo, máximo y promedio para obtener los óptimos de las 225 instancias con el modelo $M4'_RWR$ en función de β 90
4.8. Valores RPD_W y RPD_{Δ_P}, por estructuras y bloques, y valores promedio para las soluciones de los 225 ejemplares con $M4'_RWR$ en función de β 92
4.9. Tiempos promedio de CPU de CPLEX y Gurobi para los 225 ejemplares de la literatura con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ 95

5.1. Ejemplo. Número de procesadores por estación y tiempos de proceso requeridos por unidad de producto y procesador 110
5.2. Ejemplo. Resultados obtenidos por $M4 \cup 3$, $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)$ 112
5.3. Tiempos de CPU empleados por $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$ para alcanzar los óptimos . 116
5.4. Valores de sobrecarga y reducción de la sobrecarga obtenida con $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ 116
5.5. Pérdidas (€/*año*) debidas a la sobrecarga obtenida con $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ 119
5.6. Ganancias (€/*año*) obtenidas al aumentar el factor de ritmo de trabajo 119
5.7. Beneficio neto que se podría obtener al aumentar el factor de ritmo de trabajo, compensando a los trabajadores 121

6.1. Ejemplares que provocan sobre-saturación en las estaciones de trabajo 142
6.2. Sobrecarga inevitable de la línea, debida al mix de producción (ϵ), a la saturación media admisible (η_{med}^{∞}) y al factor de actividad ($\alpha_{i,k}$) 143
6.3. Sobrecarga obtenida con $M3 \cup 4_\eta$ y $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y desviaciones porcentuales 146
6.4. Tiempos, mínimo, máximo y medio de CPU, empleados por $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ 147
6.5. Pérdidas (€/*año*) debidas a la cantidad de motores no completados, dadas las secuencias de los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ 148
6.6. Beneficios netos anuales obtenidos al reducir la sobrecarga dinámica, mediante la activación de los procesadores, con $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ 149
6.7. Costes anuales del número mínimo de operarios refuerzo necesarios para eliminar la sobrecarga obtenida con $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ 150
6.8. Costes anuales del número máximo de operarios refuerzo necesarios para eliminar la sobrecarga obtenida con $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ 150
6.9. Beneficios (millones de €) netos anuales, obtenidos al eliminar la sobrecarga dinámica de trabajo, mediante la activación de los trabajadores y la incorporación de operarios refuerzo 150

7.1. Modelo con mejor resultado, para las 225 instancias de la literatura, en cuanto a W, $\Delta_Q(X)$), $\Delta_Q(P)$, $\Delta_Q(W)$, $\Delta_Q(V)$ y el tiempo de CPU . . . 163
7.2. Modelo con mejor resultado, para las 23 instancias del caso NISSAN-9ENG, en cuanto a W, $\Delta_Q(X)$), $\Delta_Q(P)$, $\Delta_Q(W)$ y $\Delta_Q(V)$ . . . 163
7.3. Beneficios económicos (€/*año*) que se pueden obtener mediante el aumento del factor de ritmo de trabajo . . . 166
7.4. Resumen comparativo de los modelos de la literatura, los modelos de referencia y los modelos propuestos en esta tesis . . . 174
7.5. Número medio de motores perdidos anualmente por la sobrecarga obtenida con los modelos estudiados . . . 176

A.1. Equilibrado de la línea de motores del caso NISSAN-9ENG . . . 205

B.1. Tiempos de CPU, de $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, para los 225 ejemplares de la literatura . . . 208
B.2. Resultados obtenidos con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ para el $Bloque - I$ del conjunto de datos NISSAN-9ENG . . . 210
B.3. Resultados obtenidos con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ para el $Bloque - II$ del conjunto de datos NISSAN-9ENG . . . 211
B.4. Soluciones óptimas (W) obtenidas con $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ (o $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$) para cada plan de producción *P/E* . . . 215
B.5. Tiempos de CPU, de $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$, para los 225 ejemplares de la literatura . 216
B.6. Tiempos de CPU, de $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$, para los 225 ejemplares de la literatura . 217
B.7. No-regularidad del mix de producción, $\Delta_Q(X)$, de las secuencias ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ para los 225 ejemplares de la literatura . . . 218
B.8. No-regularidad del trabajo requerido, $\Delta_Q(P)$, de las secuencias ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ para los 225 ejemplares de la literatura . . . 219
B.9. No-regularidad de la sobrecarga de trabajo, $\Delta_Q(W)$, dada por las secuencias ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ para los 225 ejemplares de la literatura . . . 220
B.10. No-regularidad del trabajo completado, $\Delta_Q(V)$, dadas las secuencias ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ para los 225 ejemplares de la literatura . . . 221
B.11. No-regularidad del mix de producción, $\Delta_Q(X)$, de las secuencias ofrecidas por $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ para los 225 ejemplares de la literatura . . . 222
B.12. No-regularidad del trabajo requerido, $\Delta_Q(P)$, dadas las secuencias ofrecidas por $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ para los 225 ejemplares de la literatura . . . 223
B.13. No-regularidad de la sobrecarga de trabajo, $\Delta_Q(W)$, dadas las secuencias ofrecidas por $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ para los 225 ejemplares de la literatura . . . 224
B.14. No-regularidad del trabajo completado, $\Delta_Q(V)$, dadas las secuencias ofrecidas por $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ para los 225 ejemplares de la literatura . . . 225

B.15. RPD_1 y RPD_2 de las funciones W, $\Delta_Q(X)$, $\Delta_Q(P)$, $\Delta_Q(W)$ y $\Delta_Q(V)$ para los 225 ejemplares de la literatura 232
B.16. RPD_3 y RPD_6 de las funciones W, $\Delta_Q(X)$, $\Delta_Q(P)$, $\Delta_Q(W)$ y $\Delta_Q(V)$ para los 225 ejemplares de la literatura 238
B.17. RPD_4 y RPD_5 de las funciones W, $\Delta_Q(X)$, $\Delta_Q(P)$, $\Delta_Q(W)$ y $\Delta_Q(V)$ para los 225 ejemplares de la literatura 245
B.18. RPD_1, RPD_2, RPD_3, RPD_4, RPD_5 y RPD_6, para las funciones $\Delta_Q(X)$ y $\Delta_Q(P)$, correspondientes a los 23 ejemplares del conjunto NISSAN-9ENG. 246
B.19. RPD_1, RPD_2, RPD_3, RPD_4, RPD_5 y RPD_6, para las funciones $\Delta_Q(W)$ y $\Delta_Q(V)$, correspondientes a los 23 ejemplares del conjunto NISSAN-9ENG. 247
B.20. Comparación de resultados entre CPLEX y Gurobi 248
B.21. Tiempos de CPU de $M4'_RWR$, en función de β, para resolver los 225 ejemplares de datos 251
B.22. Valores de sobrecarga, W, dados por $M4'_RWR$, en función de β, para resolver los 225 ejemplares de datos 254
B.23. No-regularidad del trabajo requerido, Δ_P, dada por $M4'_RWR$, en función de β, para los 225 ejemplares de la literatura 257
B.24. RPD_W y RPD_{Δ_P} entre las mejores soluciones encontradas ($W(\beta = 1)$ y $\Delta_P(\beta = 0)$) y el resto de soluciones de $M4'_RWR$ en función de β, para los 225 ejemplares de la literatura 263
B.25. Sobrecarga dada por $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$ para los 23 planes de demanda de NISSAN-9ENG, en función del factor de actividad 265
B.26. Tiempos de CPU utilizados por $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ para resolver los 23 ejemplares de NISSAN-9ENG, en función del factor de actividad utilizada 266
B.27. Tiempos de CPU utilizados por $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$ para resolver los 23 ejemplares de NISSAN-9ENG, en función del factor de actividad utilizada 267
B.28. Saturación estática máxima (η°_{max}) de las estaciones ($\forall k \in K$), dado un factor de actividad promedio a lo largo de la jornada ($\overline{\alpha_{i,k}}$). 269
B.29. Saturación estática media (η°_{med}) por estación ($\forall k \in K$) en función del mix de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$), para $\overline{\alpha_{i,k}} = 1$ 270
B.30. Saturación estática media (η°_{med}) por estación ($\forall k \in K$), en función del mix de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$), para $\overline{\alpha_{i,k}} = 1.0\widehat{33}$ 271
B.31. Saturación estática media (η°_{med}) por estación ($\forall k \in K$) en función del mix de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$) , para $\overline{\alpha_{i,k}} = 1.05$ 272
B.32. Saturación estática media (η°_{med}) por estación ($\forall k \in K$) en función del mix de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$), para $\overline{\alpha_{i,k}} = 1.0\widehat{66}$. 273

B.33. Sobrecarga inevitable, por ejemplar ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$), considerando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ y un factor de activación normal a lo largo de toda la jornada 274
B.34. Sobrecarga inevitable, por ejemplar ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$), considerando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ y la función escalón para el factor de actividad 275
B.35. Sobrecarga inevitable, por ejemplar ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$), considerando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ y la función triangular del factor de actividad 276
B.36. Sobrecarga obtenida con $M3 \cup 4_\eta$ cuando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ 278
B.37. Sobrecarga obtenida con $M4 \cup 3_\eta$ cuando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ 279
B.38. Sobrecarga obtenida con $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ cuando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ y $\dot{\alpha}_t = \dot{\alpha}^S$ 280
B.39. Sobrecarga obtenida con $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ cuando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ y $\dot{\alpha}_t = \dot{\alpha}^T$ 281
B.40. Sobrecarga obtenida con $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ cuando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ y $\dot{\alpha}_t = \overline{\alpha^S}$ 282
B.41. Sobrecarga obtenida con $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ cuando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ y $\dot{\alpha}_t = \overline{\alpha^T}$ 283
B.42. Sobrecarga obtenida con $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ cuando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ y $\dot{\alpha}_t = \dot{\alpha}^S$ 284
B.43. Sobrecarga obtenida con $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ cuando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ y $\dot{\alpha}_t = \dot{\alpha}^T$ 285
B.44. Sobrecarga obtenida con $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ cuando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ y $\dot{\alpha}_t = \overline{\alpha^S}$ 286
B.45. Sobrecarga obtenida con $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ cuando $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$ y $\dot{\alpha}_t = \overline{\alpha^T}$ 287
B.46. Tiempos de CPU requeridos por los modelos $M3 \cup 4_\eta$ y $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ 289
B.47. Tiempos de CPU requeridos por los modelos $M4 \cup 3_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ 290
B.48. Cota inferior y superior del número de operarios refuerzo, necesarios para eliminar la sobrecarga de trabajo en función del factor de actividad 291

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Modelo de jerarquización de decisiones. 5
1.2. Esquema de línea mono-producto. 9
1.3. Esquema de línea multi-producto. 9
1.4. Esquema de línea de productos mixtos. 10

2.1. Esquema de una línea de montaje 31
2.2. Sobrecarga, tiempo muerto y trabajo completado en función de la secuencia. 32

3.1. Ejemplo. Soluciones óptimas obtenidas con los modelos $M1$ y $M3 \cup 4$ 49
3.2. Ejemplo. Soluciones óptimas obtenidas con los modelos $M2$ y $M4 \cup 3$ 50

4.1. Ejemplo. Soluciones óptimas obtenidas con los modelos $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ . . . 81
4.2. Tiempos medios de CPU (s) utilizados por $M4'_RWR$ para distintos valores del coeficiente de ponderación β 91
4.3. Mejora de la no-regularidad del trabajo requerido frente al empeoramiento de la sobrecarga en función del coeficiente de ponderación (β), con $M4'_RWR$ 93

5.1. Curva de Yerkes-Dodson, -U invertida-. 102
5.2. Función escalón para el factor dinámico de ritmo de trabajo, $\dot{\alpha}^S$. 104
5.3. Función triangular para el factor dinámico de ritmo de trabajo, $\dot{\alpha}^T$. 105
5.4. Función trapezoidal para el factor dinámico de ritmo de trabajo, $\dot{\alpha}^Z$. 105
5.5. Función parabólica para el factor dinámico de ritmo de trabajo, $\dot{\alpha}^P$. 106
5.6. Ejemplo. Soluciones ofrecidas por $M4 \cup 3$, $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)$ 111
5.7. Función escalón para el factor de ritmo de trabajo en el caso de Nissan. 114

7.1. Tiempos de CPU, utilizados por $M4'_RWR$, en función del valor de β. (b) RPD_W y RPD_{Δ_P} obtenidos con $M4'_RWR$ en función del coeficiente de ponderación β . . 164
7.2. Comparativa de los valores de sobrecarga dados por $M3 \cup 4$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$, $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ 166

7.3. Ganancias (€/*año*) obtenidas con $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)$, $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ frente a costes por compensación del sobre-esfuerzo 167
7.4. Comparativa de los valores de sobrecarga dados por $M3 \cup 4_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^Z)_\eta$ y $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^P)_\eta$ 169
7.5. Beneficios netos (€/*año*) obtenidos por la reducción de la sobrecarga de trabajo, al limitar la saturación dinámica y compensar el aumento del ritmo de trabajo 170
7.6. Beneficios netos (€/*año*) obtenidos por la reducción de la sobrecarga, al aumentar la actividad, incorporar operarios refuerzo y limitar la saturación dinámica 171
7.7. Comparativa del número de soluciones óptimas encontradas por los modelos evaluados 175
7.8. Comparativa de los tiempos de ejecución utilizados por los modelos evaluados que alcanzaron todos los óptimos 176
7.9. Comparativa de las pérdidas anuales (miles de €/*año*) provocadas por la sobrecarga obtenida con los modelos evaluados 177

— Parte I —

Marco Teórico

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Preliminares

Desde sus inicios, los sistemas de producción han evolucionado considerablemente. Después de que la producción manual fuera sustituida por la industria con la primera Revolución Industrial, se pasó a una producción más especializada que, gracias al desarrollo de industrias como la eléctrica, del petróleo y del acero, dio lugar a la producción en masa.

Posteriormente, con la constante de reducir costes y aumentar la eficiencia, esta producción en serie mediante cadenas de montaje pasó a los sistemas de producción flexible, presentes hoy en día en muchos sectores industriales. Gracias a este tipo de sistemas de producción flexible, ha sido posible aumentar la variedad de la oferta en cada segmento de mercado, mejorar la calidad e introducir constantemente nuevos productos a bajo coste.

Evidentemente, todos estos cambios en los sistemas productivos fueron acompañados de nuevos sistemas organizativos cada vez más orientados a la obtención de una alta calidad, bajos costes, tiempos de entrega cortos y mayor flexibilidad. Así, con el fin de disponer de materias primas y demás elementos de fabricación, en el momento oportuno y lugar requerido, reduciendo lo posible los tiempos improductivos, la planificación de la producción cobró, cada vez, más importancia.

La planificación de la producción tiene por objeto asignar, explotar y controlar, de forma legal, eficiente y económica los recursos productivos, en principio limitados, con la finalidad de alcanzar los objetivos marcados a unas actividades potenciales, es decir, satisfacer la demanda de productos prevista por la empresa.

La definición anterior marca los objetivos de la planificación, pero no concreta la manera de llevarla a cabo. Por ello, es preciso adoptar una ideología de gestión de la producción y una metodología de planificación. En cuanto a los enfoques de gestión, los más consolidados son (Bautista, 1993):

- El enfoque ***centralizado***, cuya ideología más extendida es el *MRP*[1] (Material Requeriments Planning) en sus versiones I, II y III, y que se reduce, básicamente, al cálculo de necesidades de materiales requeridos por los productos finales para su total confección. En su primera versión, a partir de un plan de producción, la estructura del producto, *BOM* (Bill Of Materials), la situación de inventarios y los plazos de entrega entre las distintas fases productivas, se calculan las compras y fabricaciones cualitativa, cuantitativa y temporalmente. En versiones posteriores, a la hora de realizar el cálculo de necesidades se tienen en cuenta, además, la capacidad de producción y distribución y los objetivos estratégicos de la empresa. Este tipo de sistema de gestión también se conoce como sistema tipo empuje[2] (push), pues a partir de previsiones y pedidos en firme se generan las órdenes de aprovisionamiento y producción.

- El enfoque ***utilización de la capacidad limitada de los recursos productivos y de distribución del sistema*** se centra en la detección de los centros de trabajo que marcan las tasas de producción: los cuellos de botella[3]. Es la capacidad de los cuellos de botella la base sobre la que se lleva a cabo la planificación de la producción. Este enfoque pretende la mejora continua del sistema productivo, por lo que se proponen acciones de mejora que reduzcan la influencia de los cuellos de botella.

- En el enfoque ***descentralizado***, encontramos la ideología de gestión *JIT*[4](Just In Time), cuya idea es elaborar los productos en las cantidades, lugares e instantes precisos. La aplicación de esta ideología implica la fabricación y transferencia de lotes pequeños, lo que hace necesaria la reducción de los tiempos de preparación y el aumento de la flexibilidad, tanto por parte del equipo, como de los operarios. Esta implicación supone, por otro lado, la reducción de la capacidad de los almacenes y, por consiguiente, la reducción de los costes asociados a ellos. En este tipo de sistemas de gestión de la producción, también llamados sistemas tipo arrastre[5] (pull), la producción viene dada por la demanda, de forma que cada proceso solicita al anterior lo que ha consumido con el fin de reponer los materiales. La mejora continua se consigue a través del control de procesos que requieren estos sistemas.

[1]Sistema de planificación de la producción y de gestión de stocks, de origen estadounidense (empresa IBM), que permite determinar, partiendo de expectativas de ventas, cuales son los materiales y materias primas necesarias para el cumplimiento del plan de producción.

[2]Sistema en el que se opera hacia adelante. La producción es empujada hacia el cliente.

[3]Etapas del proceso productivo que, debido a su limitada capacidad, ralentizan la velocidad de producción.

[4]Técnica de planificación y control de la producción de origen japonés y desarrollado, originariamente, por Toyota Motor Co. Filosofía que define la forma en que debería optimizarse un sistema de producción, reduciendo lo máximo posible los inventarios.

[5]Sistema que opera hacia atrás. La demanda atrae a la producción.

Una vez adoptada la ideología de gestión, es preciso concretar una metodología de planificación de la producción. Básicamente, en la literatura encontramos dos metodologías en función de los niveles en la toma de decisiones. Por una parte, los modelos monolíticos (Kanyalkar y Adil, 2005), basados en la planificación simultánea y que integran todos los tipos de decisiones; y por otra, los modelos de jerarquización de decisiones (Alemany, Alarcón, Lario y Boj, 2011), que consisten en la división del problema de la planificación de la producción en subproblemas parciales, respondiendo cada uno de ellos a decisiones con menor alcance temporal pero mayor incidencia en el sistema productivo.

En la toma de decisiones jerarquizada, no existe un consenso en cuanto a la denominación de las fases o a los intervalos temporales de las mismas. Por ello, en el presente trabajo estableceremos una jerarquización temporal de las decisiones, pudiendo diferenciar entre planificación a medio plazo o táctica y planificación a corto plazo u operativa (Figura 1.1).

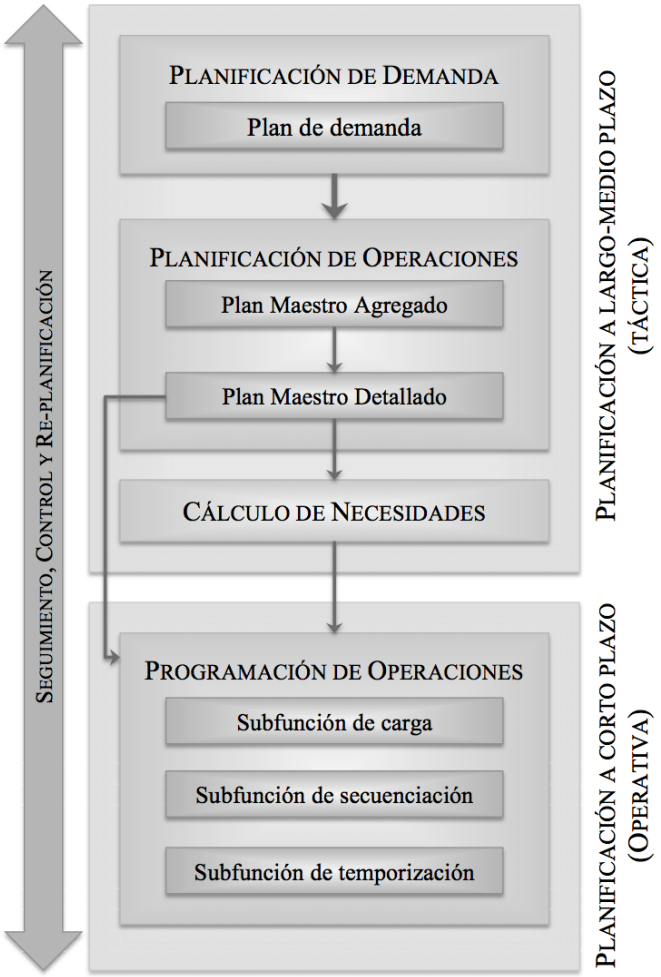


Figura 1.1: Modelo de jerarquización de decisiones.

La planificación a medio plazo, pretende transformar las previsiones de demanda y los pedidos en firme, en un plan de demanda y de producción, con un horizonte suficientemente amplio como para poder tomar medidas de ajuste en los recursos críticos de producción. El plan de demanda, agrupa las decisiones tomadas a partir de las previsiones anuales de demanda de los distintos productos y de los pedidos concertados para dicho año. Este plan, permite establecer la planificación de operaciones en función de las limitaciones de capacidad del sistema productivo, como son: equipos, materiales y recursos humanos; y de diversos criterios marcados por el sistema productivo: días laborables en cada periodo, regularidad en la producción, plazos para la recepción de materias primas, plazos para las expediciones de productos, costes de fabricación bajo las diversas modalidades de producción, costes de posesión de stocks, costes de ruptura de stock, etc.

Esta fase de planificación de operaciones, generalmente, se desarrolla en dos niveles, en función del grado de detalle. En primer lugar, se define el Plan Maestro de Producción Agregado, en el que se recogen las cantidades a producir de los diferentes productos, agrupados en familias, en intervalos de tiempo de un horizonte medio. Y, en segundo lugar, a partir de este plan agregado, se realiza el Plan Maestro Detallado, que con un horizonte menor, desagrupa las familias en clases más reducidas (Companys, 1989).

Generalmente, en la industria del automóvil, sector de producción en el que se centrará esta tesis, los intervalos de tiempo para cada uno de los planes anteriormente comentados son de un horizonte anual, dividido en etapas de decisión mensuales, para el caso del Plan de Demanda y el Plan Maestro de Producción Agregado, y de un horizonte trimestral y periodicidad semanal para el Plan Maestro Detallado. Estos planes son actualizados con una frecuencia mensual o semanal, definiendo un plazo de rigidez, que fija los requerimientos del sistema, de dos meses o uno, respectivamente.

El Plan Maestro Detallado da lugar al cálculo de necesidades de materiales, equipos y recursos humanos, así como las necesidades de distribución de los productos con un horizonte trimestral, periodicidad semanal y rigidez mensual.

Tras la fase de planificación de operaciones y cálculo de necesidades, cuyos resultados son los planes a medio plazo, se lleva a cabo la programación detallada de operaciones. En esta segunda fase, correspondiente a las decisiones a corto plazo, se transforma el Plan Maestro Detallado en las órdenes de producción y aprovisionamiento que conducirán a su realización. Estos programas a corto plazo, normalmente con un horizonte semanal y periodicidad diaria, deben detallar de forma precisa el orden, medio e intervalo, en que debe realizarse cada operación.

Cabe destacar, que en todas las fases de la planificación, es necesario establecer mecanismos de seguimiento, control y re-planificación de los planes originales, de forma que, definidos los plazos de revisión, se reduzcan al mínimo las desviaciones que puedan producirse entre el plan maestro (ideal establecido) y la producción consolidada (realidad) en cada periodo. Obviamente, las revisiones en cada uno de los planes deben ser coherentes con los objetivos fijados en los niveles superiores, y los periodos que abarca el plazo de rigidez deben ser fijados en un plan firme que debe cumplirse en la medida de lo posible.

El presente estudio se enmarca en el último nivel de planificación comentado, es decir, en la programación detallada de operaciones. Dentro de esta función, se encuentran las siguientes tres subfunciones (Bautista, 1993):

- Subfunción de carga (loading): asigna las operaciones a los centros o estaciones de trabajo.
- Subfunción de secuenciación (sequencing): establece el orden de ejecución de las operaciones.
- Subfunción de temporización (scheduling): determina los instantes de inicio y finalización de las distintas operaciones en los centros de trabajo.

Una vez definido el programa de producción y, por tanto, la carga asignada a las estaciones de trabajo, módulos o procesos, debe establecerse el orden en el que se llevaran a cabo las operaciones. Esta subfunción de secuenciación se convierte en un aspecto fundamental en los sistemas de producción tipo arrastre con ideología de gestión *JIT*, en los que los sistemas de fabricación por células y líneas de producción y montaje son muy frecuentes.

Estos sistemas de fabricación, compuestos por células y líneas de producción, son capaces de tratar diversos productos que, aunque similares, pues pueden pertenecer a la misma familia, pueden tener diferentes aspectos relacionados con la utilización de recursos y consumo de componentes y, por consiguiente, pueden presentar diferentes tiempos de proceso a la hora de completar las operaciones. Esta flexibilidad, deseable a la hora de producir, es la que condiciona el orden en que deben fabricarse las unidades de producto y, por tanto, la que hace necesaria la subfunción de secuenciación.

Así, a lo largo de este trabajo se estudia el problema de secuenciación en un entorno industrial con ideología de gestión *JIT*, como es la industria del automóvil.

1.2. Marco General de la Secuenciación de Unidades en Contexto Just In Time

Los sistemas de producción *JIT*, son conocidos en todo el mundo por lograr alcanzar una alta eficiencia. Este tipo de sistema de producción fue desarrollado originalmente por Toyota Motor Corporation, en Japón, con el fin de responder a los diversos cambios de circunstancias que se estaban dando, como las fluctuaciones de demanda y el aumento de la diversidad de productos (Ohno, 1988).

Los sistemas *JIT* requieren la producción del producto necesario en las cantidades y momentos adecuados. Por este motivo, estos sistemas de producción deben ser capaces de procesar diferentes modelos de productos sin aumentar los costes de conmutación de un modelo a otro. De ahí, la necesidad de sistemas de producción y/o montaje flexibles, cuyo objetivo primordial sea aumentar los beneficios mediante la reducción de costes.

Sin perder de vista la intención de este tipo de sistemas de satisfacer la demanda, de una gran variedad de productos, por parte de los clientes, sin incurrir en grandes inventarios o escasez de los mismos, se parte de sistemas de producción compuestos por células o líneas de producción y montaje. En dichos sistemas, los productos (motores, piezas de estampación, pintura de carrocerías, etc.) se fabrican en una serie de etapas o procesos de fabricación que agregan valor a las materias primas hasta llegar al producto final (automóvil). De esta manera, con la fabricación en flujo, se permite la fabricación de pequeños lotes de tipos de producto en lugar de grandes lotes de un único modelo, ya que los costes de setup[6] son insignificantes.

Sin embargo, el hecho de que no todos los modelos de productos sean completamente idénticos provoca que su fabricación pueda requerir tiempos de proceso diferentes, o incluso, consumo de materiales o uso de recursos diferentes, pues no todos los tipos de productos suponen la misma carga de trabajo en cada etapa de fabricación.

Así, uno de los problemas de optimización más importantes que implican los sistemas *JIT* con modelos mixtos, es determinar la secuencia en la que los diferentes modelos o productos deben producirse.

[6]Costes de conmutación de un modelo de producto a otro.

1.2.1. Secuenciación de la Producción en una Línea de Montaje

La líneas de montaje son sistemas de producción en flujo y consisten en un conjunto de estaciones[7] dispuestas en serie y conectadas a a través de un sistema de transporte, que permite el movimiento del *WIP* (Work in Progress) a velocidad constante. Dichas líneas pueden ser, en función del tipo de producto que procesan:

(1) ***Líneas mono-producto***: se utilizan para un único tipo o modelo de producto (ver figura 1.2). En estas líneas se fabrican grandes cantidades de productos que tienen las mismas características físicas de diseño. Esto provoca que los operarios, asignados a las estaciones de trabajo, realicen la misma cantidad de trabajo cuando la secuencia de productos pasa por ellos a velocidad constante. El objetivo principal en este tipo de líneas de montaje es asignar los recursos necesarios a las estaciones de trabajo (herramientas, componentes, operarios ...), de modo que todas las estaciones tengan, aproximadamente, la misma carga[8] de trabajo y así encontrar el número mínimo de estaciones necesarias para satisfacer la tasa de producción determinada.

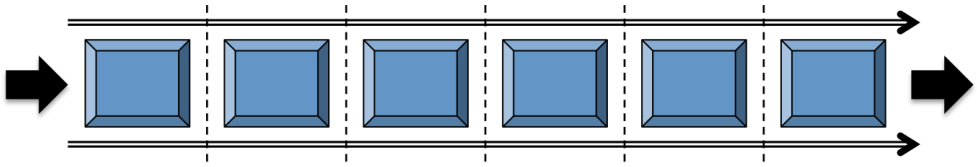


Figura 1.2: Esquema de línea mono-producto.

(2) ***Líneas multi-producto***: cuando hay que fabricar varios tipos de productos, con diferencias significativas en los procesos de producción, se utiliza este tipo de líneas (ver figura 1.3). En ellas, la fabricación de los productos es por lotes de gran volumen debido a los cambios de configuración de la línea, requeridos por las diferencias entre productos. De esta manera, se minimizan los costes por ineficiencia de la línea.

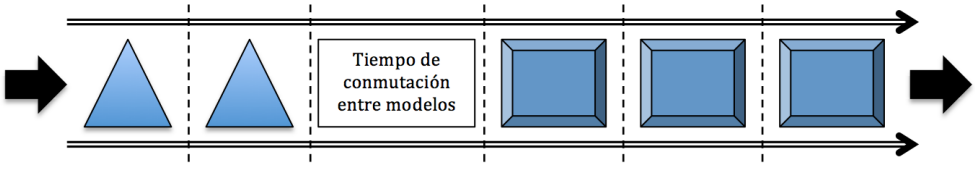


Figura 1.3: Esquema de línea multi-producto.

[7]Parte de la línea en la que se lleva a cabo un determinado número de tareas elementales u operaciones. Pueden componerse por maquinaría, operarios, robots, herramientas, etc.

[8]Conjunto de tareas elementales u operaciones asignadas, S_k, a una estación de trabajo.

(3) ***Líneas de productos mixtos***: cuando se fabrican, al mismo tiempo, varios tipos de productos con pequeñas diferencias, nos encontramos ante este tipo de líneas (ver figura 1.4). En ellas, los modelos de los productos van cambiando continuamente, ya que las diferencias entre ellos no afectan a la configuración de la línea y los costes de conmutación de un modelo a otro pueden considerarse insignificantes. Son el gran paradigma de los sistemas de producción *JIT*.

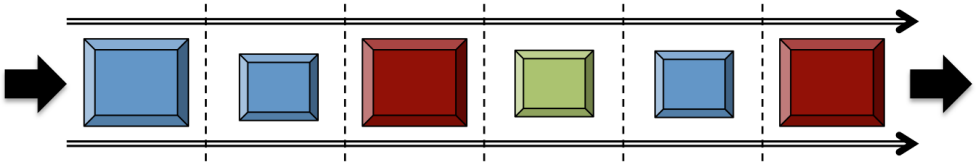


Figura 1.4: Esquema de línea de productos mixtos.

Las líneas de producción de modelos mixtos, *MMAL* (Mixed Model Assembly Line), caracterizadas por la fabricación de diversas versiones de un producto, ocasionan dos grandes inconvenientes a la hora de gestionarlas. En primer lugar, están los problemas de asignación de las tareas, necesarias para la fabricación de los productos, a las estaciones de trabajo. Estos problemas, conocidos en la literatura bajo el nombre *ALBP* (Assembly Line Balancing Problems, Salveson, 1955), equilibran la carga de las estaciones fijando un tiempo de ciclo[9].

Debido a la variedad de productos de una *MMAL*, el tiempo de ciclo se determina a partir del promedio de los tiempos de proceso de las tareas, en función de las proporciones en las que están presentes las variantes en el plan de producción. Este hecho, provoca que ciertas unidades de producto presenten una mayor o menor carga de trabajo, respecto al tiempo de ciclo determinado, en la estaciones. Debido a esto, aparece la otra gran familia de problemas de líneas mixtas, la determinación del orden de fabricación de los distintos modelos en la línea.

Los problemas de secuenciación de modelos mixtos pueden dividirse, de acuerdo a la discrepancia entre los tiempos de procesamiento de las tareas u operaciones, necesarias para el montaje o fabricación de un producto, en los siguientes tipos:

I. **Problemas *Flow-Shop* o de *permutación***. Este tipo de problema se da cuando los tiempos de proceso de los diferentes productos son muy distintos en cada etapa del proceso productivo, independientemente de que haya o no buffers intermedios entre dichas etapas.

[9]Tiempo que transcurre entre la llegada de dos piezas consecutivas a la estación de trabajo.

Una de la versiones más populares de este tipo de problemas es el *PFSP* (Permutation Flow Shop Problem) en el que la capacidad de almacenamiento entre dos fases consecutivas del proceso, donde los trabajos pueden esperar hasta ser procesados en la siguiente etapa, es ilimitada (Ruiz y Vázquez-Rodríguez, 2010 y Pan y Ruiz, 2013).

Por otro lado, en la variante conocida como *BFSP* (Blocking Flow Shop Problem) la capacidad de almacenamiento entre dos etapas consecutivas es limitada y, por tanto, los puestos de trabajo de la etapa anterior quedan bloqueados hasta que se libere el espacio necesario. Algunos trabajos recientes sobre este último tipo de problemas son los de Bautista, Cano, Companys y Ribas (2012h) y Lin y Ying (2013).

II. **Problemas *ELSP* (Economic Lot Scheduling Problems)**. Cuando el tiempo de proceso depende del número de unidades que componen un lote de piezas aparece este tipo de problemas, que consisten en determinar el punto de equilibrio entre los costes de setup y posesión[10]. Esta situación es común en la secuencia de piezas en una línea de estampación de carrocerías de automóviles.

Elmaghraby (1978) publicó una de las obras más pioneras con respecto a estos problemas y, más recientemente, Raza y Akgunduz (2008) presentaron una revisión de las heurísticas utilizadas para resolver el *ELSP*.

III. ***MMSP* (Mixed-Model Sequencing Problems)**. Si los tiempos de proceso de los productos son ligeramente diferentes (unidades homogéneas) en cada etapa, nos encontramos ante este tipo de problemas. En ellos, el objetivo es establecer un orden de fabricación de los productos, siendo muy frecuente que dicho orden se intente mantener, dentro de lo posible y proceso a proceso, en todos los eslabones de la cadena de fabricación y suministro de los sistemas productivos regidos por las filosofías *JIT* (Toyota) y *DS*[11] (Douki-Seisan).

Son muchos los trabajos publicados que tratan este tipo de problemas, entre ellos se encuentra la revisión de la literatura de Boysen, Fliedner y Scholl (2009b) y los trabajos de Bautista y Cano (2011), Solnon, Cung, Nguyen y Artigues (2008) y Boysen, Fliedner y Scholl (2009a).

El trabajo desarrollado a lo largo de esta tesis se centra en el problema de secuenciación de modelos mixtos en una línea de producción y montaje, el *MMSP*. En este tipo de problemas, a pesar de que casi cualquier secuencia de modelos entre-mezclados es técnicamente factible, los impactos económicos que conlleva una u otra secuencia requieren de una minuciosa planificación. Por este motivo, basándonos en Boysen *et al.* (2009b) podemos clasificar estos problemas según a dos criterios de optimización generales:

[10] Costes de mantenimiento de inventarios.
[11] Ideología de producción sincronizada, desarrollada por Nissan.

1. ***Sobrecarga***[12] ***de trabajo (work overload)***. Como se ha comentado anteriormente, las diferencias entre los tiempos de proceso de las distintas opciones de productos que deben tratarse en la línea, pueden provocar que una determinada operación requiera un tiempo de proceso mayor que el tiempo de ciclo. Este hecho puede suponer, si se procesan, sucesivamente, varias unidades con tiempo de proceso mayor que el ciclo, que no pueda completarse el trabajo total requerido a la línea. Es decir, puede dar lugar a un exceso de carga de trabajo en la línea, también llamado sobrecarga.

   Los problemas basados en este criterio buscan secuencias en las que las unidades de producto con alta carga de trabajo se alternen con las de menor carga y, por tanto, el trabajo no completado o sobrecarga sea lo menor posible.

2. ***Objetivos JIT***[13]. Las distintas opciones que se producen en la línea pueden requerir cantidades diferentes de materiales o semi-elaborados. Por ello, centrados en los requerimientos de materiales necesarios, estos problemas buscan secuencias que favorezcan la distribución uniforme de las necesidades de material sobre el horizonte temporal de planificación. De esta manera, se favorece un requisito importante del enfoque de secuenciación *JIT*.

En base a esta clasificación de criterios generales para los problemas de secuenciación y otras clasificaciones de la literatura (Kubiak, 1993; Scholl, 1999; Xiaobo, Zhou y Asres, 1999), podemos establecer una clasificación de los problemas de secuenciación de modelos mixtos (Bautista y Cano, 2011), basada en los elementos del sistema de producción, influyentes en la secuencia, y bajo los cuales se establecen los criterios de optimización. Específicamente, entre estos elementos se encuentran: (1) los stocks de productos y componentes; (2) los recursos humanos; y (3) las opciones especiales de los productos (techo solar, carrocería larga, bastidor reforzado,...) que generan cuellos de botella en la línea de producción. Así, los problemas de secuenciación de modelos mixtos que podemos encontrar son:

A. Problemas cuyo objetivo es establecer una secuencia de productos que minimice los niveles de stock de productos y componentes. Dentro de este tipo de problemas, cuyo elemento relevante son los stocks, encontramos en la literatura el *PRVP* (Product Rate Variation Problem) introducido por Miltenburg (1989) y el *ORVP* (Output Rate Variation Problem) propuesto por Monden (1983). En ambos casos, el objetivo es mantener estas tasas constantes en el tiempo. Específicamente, limitar o reducir al mínimo la variación de las tasas de producción en el primer caso, y limitar o reducir al mínimo la variación de las tasas de consumo de los componentes del producto, en el segundo caso.

[12] Exceso de trabajo, que se da cuando el trabajo asignado es superior al trabajo que podría realizarse en el tiempo de ciclo.

[13] Objetivos enfocados a la máxima reducción posible de inventarios o stocks.

Algunos trabajos de investigación sobre este tipo de problemas pueden encontrarse en Kubiak (1993), Bautista, Companys y Corominas (1996), Bautista, Companys y Corominas (1997), Bautista, Companys y Corominas (2000) y Dahmala y Kubiak (2005).

B. Problemas enfocados a minimizar las sobrecargas de trabajo que pueden aparecer cuando las unidades mixtas de los productos requieren diferentes tiempos de procesamiento en cada etapa o, más concretamente, en cada estación de trabajo. En este caso, los recursos humanos son el elemento relevante considerado. Una revisión y crítica de la literatura sobre este tipo de problemas se encuentra en Yano y Bolat (1989).

   Un claro ejemplo de estos problemas, es el foco de estudio de esta tesis, el *MMSP-W* (Mixed-Model Sequencing with Work Overload Minimization), presentado por Yano y Rachamadugu (1991) y del cual se han resuelto diferentes variantes (Bautista y Cano, 2011; Bautista, Cano y Alfaro, 2012g).

   El objetivo de este tipo de problemas de minimizar la sobrecarga, también puede encontrarse en la literatura como minimización del trabajo perdido (remaining work) (Bolat, 1997; Kim y Jeong, 2007) o trabajo utilitario[14] (utility work) (Hyun, Kim y Kim, 1998; Tsai, 1995) o minimización de las paradas de línea (conveyor stoppage) (Celano, Costa, Fichera y Perrone, 2004; Xiaobo y Ohno, 1997, 2000).

C. Problemas cuyo fin es reducir al mínimo el número de subsecuencias de productos con opciones especiales. Estas subsecuencias pueden ser perjudiciales para la línea de producción debido a que requieren más trabajo o espacio (en comparación con el estándar) en cada estación de trabajo.

   Uno de este tipo de problemas, donde los cuellos de botella, generados por las opciones especiales de algunos productos, son el elemento relevante del sistema de fabricación, es el *CSP* (Car Sequencing Problem), propuesto originalmente por Parrello, Kabat y Wos (1986) y del que hay otros estudios en la literatura, como son los trabajos de Drexl, Kimms y Matthiessen (2006); Fliedner y Boysen (2008); Gagné, Gravel y Price (2006); Gravel, Gagné y Price (2005), entre otros. Además puede encontrarse una revisión de la literatura en Solnon *et al.* (2008).

   Otras variantes estudiadas sobre este problema son: (1) una versión que considera un problema de optimización en lugar de un problema de satisfacción de restricciones (Bautista, Pereira y Adenso-Díaz, 2008a); y (2) una versión extendida que incorpora restricciones que permiten un número mínimo de productos con opciones especiales en una subsecuencia de productos (*xCSP*: *CSP* extendido Bautista, Pereira y Adenso-Díaz, 2008b).

[14] Exceso de trabajo que deben realizar operarios auxiliares puntualmente.

Son muchos los trabajos, presentes en la literatura, sobre los problemas mencionados anteriormente. En efecto, desde los pioneros Thomopoulos (1967), Macaskill (1973) y Okamura y Yamashina (1979), en los que ya se puede apreciar el rango de criterios para definir los objetivos (minimización de los costes de ineficiencias[15], minimización del trabajo utilitario, minimización de la longitud de la línea, etc.), ya se pone de manifiesto la variedad de percepciones que existen sobre los factores controlables y las políticas de producción.

Esta variedad en los criterios de optimización, ha provocado que en muchos de los trabajos sobre problemas de secuenciación, éstos se estudien como problemas multi-objetivo. De hecho, muchas de las investigaciones publicadas sobre alguno de los problemas *MMSP* incorporan características propias de otro problema de secuenciación.

Por ejemplo, Giard y Jeunet (2010) consideran una función objetivo de costes, en la que intervienen dos elementos: el coste asociado a los trabajadores auxiliares y el coste de setup. De esta manera, se intenta minimizar, simultáneamente, la cantidad de operarios auxiliares, necesarios para finalizar el trabajo requerido, objetivo característico del *MMSP-W*, y los tiempos de ajuste entre un modelo de producto y otro, objetivo derivado del *CSP*.

Drexl *et al.* (2006) incorporan condiciones propias del *LSP* (Level Scheduling Problem), problema relacionado con el *ORV* y el *PRV*, en el *CSP*.

Sarker y Pan (1998) y Fattahi y Salehi (2009) introducen en el problema de líneas de montaje, *MMAL* (Mixed-Model Assembly Line), la minimización del coste total del tiempo de inactividad y del tiempo de trabajo de utilidad. Igualmente, considerando el problema foco de estudio de esta tesis, Tsai (1995) resuelve una variante del *MMSP* minimizando el trabajo utilitario y el riesgo de parada de la línea.

Hyun *et al.* (1998), Rahimi-Vahed y Mirzaei (2007) y Rahimi-Vahed, Rabbani, Tavakkoli-Moghaddam, Torabi y Jolai (2007), entre otros, consideran tres objetivos simultáneamente: (1) minimizar el trabajo total de los operarios auxiliares (trabajo utilitario), (2) minimizar la variación de la tasa de producción y (3) minimizar el coste total de setup.

Por otro lado, también se han estudiado diferentes variantes en cuanto a las líneas. Algunos ejemplos de este tipo de trabajos son los de Tamura, Long y Ohno (1999) y Mirzapour Al-E-Hashem, Aryanezhad y Jabbarzadeh (2011), por un lado, y el de Fattahi, Tavakoli, Fathollah, Roshani y Salehi (2012) por otro.

[15]Tiempo ocioso, deficiencia de trabajo, sobre-esfuerzo, concentración de altas cargas de trabajo.

En concreto, en los dos primeros (Mirzapour Al-E-Hashem *et al.*, 2011; Tamura *et al.*, 1999), se estudia el problema de secuenciación de una *MMAL* con una sublínea de derivación que procesa una parte del conjunto de las operaciones de productos con tiempos de proceso relativamente largos, con el objetivo de nivelar el consumo de componentes y reducir las paradas de línea. A su vez, en el tercer trabajo (Fattahi *et al.*, 2012), se resuelve el problema de secuenciación de líneas de montaje considerando líneas de alimentación[16] (feeder lines) de componentes.

Por su lado, Sarker y Pan (1998) consideran líneas de montaje con estaciones abiertas y cerradas y Celano *et al.* (2004) trabajan el problema de minimización del tiempo de paro en líneas tipo U[17].

Incluso, pueden encontrarse trabajos en los que se tratan de forma simultánea los dos principales problemas que presenta una *MMAL*, el equilibrado y la secuenciación. Un ejemplo es el trabajo de Mosadegh, Zandieh y Fatemi Ghomi (2012), en el que se propone un nuevo modelo matemático para resolver, conjuntamente, el equilibrado de la línea y la minimización del trabajo utilitario o auxiliar.

Cabe destacar, que al igual que existe una gran variedad de problemas en cuanto a objetivos, también existen una multitud de procedimientos para resolverlos. En la literatura se pueden encontrar técnicas de resolución basadas en la programación lógica con restricciones[18] (*CLP*, Constraint Logic Programming) (Parrello *et al.*, 1986), programación matemática entera (Giard y Jeunet, 2010), algoritmos de ramificación y acotación (*B&B*, Branch and Bound) (Fliedner y Boysen, 2008; Xiaobo y Ohno, 1997), en técnicas de optimización combinatoria (Gagné *et al.*, 2006; Gravel *et al.*, 2005), programación dinámica acotada (*BDP*, Bounded Dynamic Programming) (Bautista, 1993; Bautista y Cano, 2011), así como procedimientos heurísticos (Scholl, Klein y Domschke, 1998), procedimientos de dos fases (Kotani, Ito y Ohno, 2004), procedimientos paramétricos (Aigbedo y Monden, 1997) y metaheurísticas multi-objetivo (Hyun *et al.*, 1998; Rahimi-Vahed y Mirzaei, 2007), entre otros.

Una revisión de los trabajos de la literatura sobre los tres tipos de problemas *MMSP*, expuestos en este apartado, puede encontrarse en Boysen *et al.* (2009b).

[16] Líneas auxiliares en las se realizan sub-ensamblados.
[17] Líneas de montaje dispuestas en forma de U.
[18] También llamada satisfacción de restricciones.

1.3. Objetivos, Resultados Esperados e Hipótesis de Partida

El objetivo general de esta tesis es estudiar el problema *MMSP-W* bajo un caso de estudio vinculado a la línea de producción de la planta de motores de *NSIO* (Nissan Spanish Industrial Operations), localizada en Barcelona.

Dicho estudio, se basa en la formulación de diferentes variantes del problema original, que se asemejan a situaciones más reales de entornos industriales. Así, considerando aspectos y conceptos, presentes en los entornos industriales, se pretende orientar el problema de la literatura no sólo hacia la mejora de la productividad, sino también a la mejora de las condiciones laborales.

1.3.1. Objetivos y Resultados Esperados

En concreto, para alcanzar dicho objetivo general, se marcan los siguientes objetivos particulares:

1. Profundizar en el problema objeto de estudio, ya que para poder incorporar nuevos aspectos al problema será necesario conocer los trabajos de la literatura al respecto.
2. Estudiar y definir los conceptos correspondientes a las variantes que se quieran estudiar.
3. Formular los modelos matemáticos resultantes de la incorporación de los nuevos conceptos al problema original.
4. Evaluar dichos modelos mediante ejemplares de datos de la literatura y/o a través del caso de estudio, foco de esta tesis.
5. Analizar los resultados ofrecidos por los modelos, tanto computacionalmente como económica, social y legalmente.

En cuanto a las variantes que se estudiarán, éstas son:

A. ***Integración de Modelos***:

   Considerando los modelos de la literatura de Yano y Rachamadugu (1991) y Scholl *et al.* (1998), se formularán dos nuevos modelos que integren los conceptos objetivo de dichos modelos de referencia, es decir, el trabajo total completado y la sobrecarga de trabajo total generada. Para ello, se tomarán como referencia los modelos propuestos por Bautista y Suárez (2009) y Bautista y Cano (2011).

   Esta variante incorporará los siguientes aspectos:

- Se considerarán vínculos entre estaciones consecutivas, lo cual condiciona los instantes de inicio de las operaciones. En concreto, a excepción de la primera estación de trabajo, para que una unidad de producto pueda ser procesada en una estación determinada es necesario que haya finalizado el proceso de dicha unidad de producto en la estación anterior. Por otro lado, para que una unidad de producto sea procesada en una estación de trabajo, ésta debe estar libre, en caso contrario y al no considerarse buffers intermedios, la unidad queda bloqueada en la estación anterior.
- Se considerará la presencia de más de un procesador[19] homogéneo en paralelo en cada estación de trabajo.
- Todas las estaciones de trabajo, dispondrán de un tiempo igual a la ventana temporal[20], mayor que el tiempo de ciclo, para procesar cualquier unidad de producto.
- Las operaciones podrán ser interrumpidas en cualquier instante de tiempo comprendido entre la finalización del tiempo de ciclo y la finalización de la ventana temporal.

B. ***Incorporación del concepto de regularidad***:

El objetivo de esta segunda variante del *MMSP-W* es satisfacer la necesidad industrial de obtener secuencias de productos mixtos de forma que, tanto el trabajo requerido[21], como el completado en todas las estaciones de trabajo, se mantengan lo más constante posible a lo largo de la jornada laboral. Se propondrán diferentes enfoques para formular el problema, dando lugar a diferentes modelos matemáticos.

En concreto, los enfoques que se propondrán son:

- *Trabajo requerido*: nivelado del tiempo de carga de trabajo requerido en las estaciones de trabajo, en cada momento.
- *Trabajo completado*: nivelado del tiempo de carga de trabajo completado en las estaciones, en cada momento.
- *Sobrecarga espacio-temporal*: nivelado de la sobrecarga de trabajo en las estaciones, en cada momento.
- *Sobrecarga máxima por estaciones*: minimización de la sobrecarga máxima que puede darse en las estaciones, nivelando, además, el tiempo de carga de trabajo requerido en cada una de ellas.
- *Sobrecarga máxima por unidad de producto*: minimización de la sobrecarga máxima generada en el conjunto de estaciones por las unidades de producto en la secuencia.

[19] En esta tesis, equipo de trabajo formado por dos operarios igualmente cualificados.
[20] Tiempo máximo que puede dedicarse a una operación.
[21] Trabajo necesario para completar la carga de trabajo asignada.

Obviamente, los diferentes enfoques darán lugar a nuevos modelos que mejoren la regularidad de las secuencias. Por un lado, modelos multi-objetivo y por otro, modelos mono-objetivo con restricciones adicionales. En este trabajo se estudiarán, principalmente, los modelos resultantes de la segunda opción.

C. ***Consideración de tiempos variables en función de la actividad***:

En esta variante se incorporará a los modelos para el *MMSP-W* el concepto de factor de actividad, ritmo de trabajo o velocidad de trabajo.

El hecho de que en las estaciones de trabajo intervengan personas, hace que los tiempos reales de ejecución de las operaciones puedan dilatarse o contraerse, respecto a los tiempos tipo predeterminados, establecidos a una actividad normal de trabajo. El ritmo de trabajo (medible a través del factor de actividad) con el que un operario realiza su tarea, es lo que permite esta variación en los tiempos reales de proceso, ya que cuando un operario trabaja con un factor de actividad superior al establecido como normal, reduce el tiempo de ejecución, y lo aumenta, en caso contrario.

En base a este concepto, se propondrán nuevos modelos matemáticos, mediante la incorporación de restricciones y variables, que minimicen la sobrecarga de trabajo a través de la variación de los factores de actividad, manteniendo, en todo momento, estos factores dentro de los niveles admisibles.

D. ***Limitación de la saturación media y máxima de los operarios***:

Siguiendo el hilo de la variante anterior, que incorpora factores propios de los recursos humanos, en esta última se incorporará a los modelos, anteriormente establecidos, el concepto de saturación de las estaciones de trabajo.

El hecho de que la línea de montaje de productos mixtos esté configurada en base a unos tiempos de proceso promedios, provoca que, en función de la composición del plan de demanda, los trabajadores puedan estar más o menos tiempo ocupados. Este tiempo ocupado, por parte de los trabajadores, debido a la carga de trabajo asignada, respecto al tiempo disponible para trabajar, es lo que definirá la saturación de las estaciones de trabajo. Además, este problema puede verse agravado si se tiene en cuenta que la limitación de la saturación de los operarios puede provocar que éstos no completen el trabajo requerido y, por tanto, la sobrecarga puede aumentar. Así, con el fin de satisfacer las condiciones laborales marcadas por las compañías, en esta variante se limitará la saturación de trabajo media y máxima a la que puedan estar sometidos los trabajadores y se incorporará también, con el objetivo de completar mayor cantidad de trabajo, la variación del factor de actividad de los trabajadores.

Obviamente, estos nuevos modelos proporcionarán valores de sobrecarga iguales o peores a los obtenidos con los modelos anteriores. No obstante, las condiciones laborales de los trabajadores mejorarán considerablemente.

Los modelos propuestos en cada una de la variantes que se estudiarán, serán evaluados a través del caso de estudio NISSAN-9ENG y, siempre que sea posible, a través de una experiencia computacional con instancias de la literatura (Bautista y Cano, 2011). Tanto las instancias de la literatura como las del caso de estudio, se corresponderán con planes de idéntica demanda total pero diferente mix[22] de producción. De este modo, además de evaluar los resultados de los modelos matemáticos propuestos en cada caso, en cuanto a la minimización de la sobrecarga total generada o el trabajo total realizado, también se podrá evaluar el comportamiento de los modelos respecto a las cantidades, de cada tipo de producto, que compongan el plan de demanda.

Los modelos se resolverán mediante un procedimiento exacto como es la programación lineal entera mixta, utilizando herramientas informáticas de resolución de programación matemática, como son el solver CPLEX y/o Solver Gurobi. Los resultados obtenidos serán analizados, cualitativa y cuantitativamente, haciendo referencia a aspectos económicos y jurídico-sociales.

El resultado de este trabajo de investigación, serán nuevos modelos matemáticos para el *MMSP-W*, que incluyan variantes no contempladas en los modelos presentes en la literatura, probados y evaluados mediante una experiencia computacional y un caso de estudio.

1.3.2. Hipótesis de Partida

Las hipótesis de trabajo de la presente investigación son las siguientes:

H1. Las líneas de montaje en entornos con ideologías *JIT* o *Douki Seisan*, deben ser capaces de tratar diferentes tipos de productos. Esto hace que la flexibilidad sea una característica deseable en este tipo de líneas.

H2. La flexibilidad de las líneas hace necesaria la secuenciación de las unidades de producto, con el fin de maximizar su eficiencia, y por tanto, evitar sobrecargas de trabajo o tiempos muertos.

H3. Una secuencia regular de productos, favorece la no concentración de sobrecarga en un momento determinado o una estación de trabajo concreta. Además, favorece también la regularidad del consumo de componentes, idea básica dentro de la ideología *JIT*.

[22] Mezcla de productos.

H4. El hecho de definir una secuencia que minimice la sobrecarga total generada o, lo que es equivalente, maximice el trabajo total completado, se traduce en beneficios económicos y sociales para la empresa.

H5. Es posible reducir la sobrecarga de trabajo variando, en momentos determinados, el ritmo de actividad con el que los operarios realizan su trabajo.

H6. El factor de actividad debe estar dentro de unos límites, actividad máxima y mínima, con el fin de que los operarios no trabajen a un ritmo, ni superior, ni inferior, al establecido.

H7. Las diferencias entre los tiempos de proceso de las operaciones y la composición de los planes de demanda, en cuanto a tipos de productos, puede suponer una carga de trabajo, para los procesadores, superior a la establecida como máxima por la compañía.

H8. La configuración de la línea mediante tiempos promedio de las operaciones puede suponer sobrecargas inevitables en función de la composición del plan de demanda y de las limitaciones de la línea en cuanto a saturación.

H9. La limitación de la saturación de trabajo, es decir, de la relación entre el tiempo de trabajo de los operarios respecto al tiempo que disponen para trabajar, puede reducir el trabajo total completado.

H10. Es posible aumentar la productividad aumentando el bienestar de los trabajadores.

1.4. Motivación y Principales Contribuciones

Cada vez son más los sistemas productivos que utilizan líneas de producción para la fabricación y/o montaje de sus productos. Además, la exigencia, por parte de los mercados actuales, de una gran oferta de productos con diferentes opciones, hace que estas líneas requieran cierta flexibilidad. Esta deseable flexibilidad, debida a la gran variedad de tipos de productos, común en el sector del automóvil, provoca que las líneas de producción sean capaces de tratar toda la gama de tipos de productos con una continua reducción de costes, ya sean los costes de mano de obra y/o los costes de manipulación y almacenamiento.

Así, determinar el orden o secuencia de los productos que deben llevarse a cabo en una línea de producción se convierte en un problema importante y aplicable a situaciones reales en las que las dimensiones de las líneas o de los planes de producción aumentan la complejidad del problema, lo cual hace que cada vez seas más necesario, el uso de herramientas sofisticadas, capaces de encontrar las mejores soluciones, llegando incluso a la optimización de la producción.

Además del interés que puede suscitar el problema de secuenciación de modelos mixtos por sí solo al tratarse de un problema NP-difícil[23], las nuevas variantes, que se proponen en esta tesis, lo acercan más a situaciones reales que se dan en la industria.

En concreto, la integración de modelos dará lugar a modelos matemáticos capaces de minimizar la sobrecarga total generada o maximizar el trabajo total completado. Se considerarán líneas compuestas por un conjunto de estaciones dispuestas en serie y se concederá, a cada una de ellas, el mismo tiempo para trabajar sobre una unidad de producto, aspectos no considerados en los modelos de referencia.

Por otro lado, se introducirá en el problema *MMSP-W* las condiciones propias del *PRV*, mediante restricciones del mix de producción que regularicen el trabajo completado o la sobrecarga de trabajo. De esta manera, se considerarán en el problema las características de las ideologías de gestión *JIT* y *DS* y se equilibrará la carga de las estaciones de trabajo.

Posteriormente, introduciendo el concepto de actividad en el problema original, se considerará el nivel de activación o estrés de los operarios de forma que puedan realizar, más o menos rápido, las operaciones y así reducir la sobrecarga o aumentar el trabajo total completado. Evidentemente, esta última variante respetará los niveles máximos de actividad permitidos en entornos industriales.

Finalmente, considerando la variación en el nivel de actividad de los operarios, se controlará la saturación media y máxima de las estaciones de trabajo, de forma que se controle la carga de trabajo de los operarios. Con esta variante, además de seguir manteniendo el objetivo, puramente económico, de reducir el trabajo no completado, se evitarán las cargas excesivas de trabajo y se mejorará la calidad laboral de los operarios.

Así, la motivación principal de esta tesis es adaptar los modelos de la literatura para el *MMSP-W*, incorporando aspectos de otros problemas y aspectos propios de situaciones reales de la industria. Esto permitirá estudiar un caso concreto de la planta de Nissan en Barcelona con el objetivo de completar el máximo trabajo posible, reduciendo costes y sin perjudicar a los recursos humanos.

De esta manera, se pretende aportar a la comunidad científica, problemas que se adapten más a los tiempos que corren, en los que la mejora de la productividad y la mejora de las condiciones laborales de los recursos humanos están a la orden del día. De hecho, hasta la fecha, la realización del trabajo de esta tesis, ha dado lugar a diferentes publicaciones científicas, tanto artículos, como capítulos de libro y comunicaciones a congresos. Dichas comunicaciones son las siguientes:

[23]Problemas para los que no existe un algoritmo polinómico que permita verificar una solución.

Artículos

1. Bautista, J., Cano, A. y Alfaro, R. (2012). Models for MMSP-W considering workstation dependencies: A case study of Nissan's Barcelona plant, *European Journal of Operational Research*. 223(3): 669-679. Bautista *et al.* (2012g).

2. Bautista, J., Cano, A. y Alfaro, R. (2012). Modeling and solving a variant of the mixed-model sequencing problem with work overload minimisation and regularity constraints. An application in Nissan's Barcelona Plant, *Expert Systems with Applications*. 39(12): 11001–11010. Bautista, Cano y Alfaro (2012f).

Capítulos de libro

1. Bautista, J., Alfaro, R., Batalla, C. y Cano, A. (2014). Incorporating the work pace concept into the MMSP-W, *Managing Complexity: Challenges for Industrial Engineering and Operations Management. Series: Lecture Notes in Management and Industrial Engineering, Vol. 2.* ISBN: 978-3-319-04704-1, Springer, 247-254. Bautista, Alfaro, Batalla y Cano (2014c).

2. Bautista, J., Cano, A. y Alfaro, R. (2014). Modeling and Solving a Variant of MMSP-W Problem with Production Mix Restrictions, *Annals of Industrial Engineering 2012. Industrial Engineering: overcoming the crisis. Part IV*. ISBN: 978-1-4471-5348-1, Springer, Holanda, 235-243. Bautista, Cano y Alfaro (2014f).

3. Bautista, J., Alfaro, R. y Cano, A., (2013). Incorporating Regularity of Required Workload to the MMSP-W with Serial Workstations and Free Interruption of the Operations, *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services IFIP Advances in Information and Communication Technology*. 397, ISBN: 978-3-642-40351-4 (Print) 978-3-642-40352-1 (Online), Springer, Holanda, 405-412. Bautista, Alfaro y Cano (2013b).

Principales comunicaciones a congresos

1. Bautista, J., Alfaro, R., Batalla, C. (2014). Incorporando condiciones laborales a problemas de Secuencias en Líneas de Productos Mixtos. DOI: 10.13140/2.1.4868.5448. *XXIV Congreso Nacional de ACEDE, Castellón.* Bautista, Alfaro y Batalla (2014a)

2. Bautista, J., Alfaro, R., Batalla, C., Llovera, S.M., (2014). Mixed-Model Sequencing Problem Improving Labour Conditions. *The global reach of industrial engineering. Enhancing synergies in a collaborative environment. Book of Abstracts.* ISBN: 978-84-617-0923-6, 86. *8th International Conference on industrial Engineering and Industrial Management, XX International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, International IIE Conference 2014, Málaga.* Bautista, Alfaro, Batalla y Llovera (2014e)

3. Bautista, J., Alfaro, R., Batalla, C., Cano, A., (2014). Impact due to the saturation concept in assembly lines on the work overload, *Archivos de Prevencion de riesgos laborales.* ISSN: 1138-9672, vol. 17, Especial Congreso 1, 27. *XII Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales (ORP 2014), Zaragoza.* Bautista, Alfaro, Batalla y Cano (2014b)

4. Bautista, J., Alfaro, R., Batalla, C. y Cano, A. (2013). Incorporating the Work Pace Concept into the MMSP-W, *Industrial Engineering and Complexity Management. Book of Proceedings.* ISBN: 978-84-616-5410-9, 427-435. *VII International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XVII Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid.* Bautista, Alfaro, Batalla y Cano (2013a).

5. Bautista, J., Cano, A., Alfaro, R. (2012). Modeling and Solving a Variant of MMSP-W Problem with Production Mix Restrictions. *Industrial Engineering: Overcoming the Crisis. Book of Full Papers.* ISBN: 978-84-938642-5-5, 1546-1553, *VI International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XVI Congreso de Ingeniería de Organización, Vigo.* Bautista, Cano y Alfaro (2012e).

6. Bautista, J., Alfaro, R. y Cano, A., (2012). Incorporating Regularity of Required Workload to the MMSP-W with Serial Workstations and Free Interruption of the Operations, *Proceedings (CD). International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2012), Rodas (Grecia).* Bautista, Alfaro y Cano (2012a)

7. Bautista, J., Cano, A. y Alfaro, R. (2012). Incorporando regularidad del trabajo requerido al MMSP con mínima sobrecarga, *Industrial Engineering: Overcoming the Crisis. Book of Full Papers.* ISBN: 978-84-938642-5-5, 1562-1569, *VI International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XVI Congreso de Ingeniería de Organización, Vigo.* Bautista, Cano y Alfaro (2012d).

8. Bautista, J., Alfaro, R. y Cano, A. (2012), Modelos para el MMSP-W con estaciones en serie, procesadores paralelos, libre interrupción de operaciones y homogeneidad del trabajo requerido, *Actas.* 41, *XXXIII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa, SEIO, Madrid.* Bautista, Alfaro y Cano (2012b)

1.5. Estructura del Documento

A continuación se resume la estructura del resto de la tesis, describiendo brevemente el contenido de cada uno de los capítulos y remarcando las aportaciones más relevantes.

Tras enmarcar el tema central de la tesis y definir los objetivos de la misma en la primera parte, la segunda parte de este documento incluye el cuerpo principal de la investigación. Formada por cinco capítulos, en esta segunda parte se presenta el problema *MMSP-W*, los modelos de la literatura, empleados como referencia y las variantes del problema original estudiadas.

En concreto, en el capítulo 2, se formula el *MMSP-W*, describiendo en qué consiste y realizando una revisión bibliográfica del mismo. Se presentan los modelos que servirán como punto de partida para el resto de capítulos, describiendo los parámetros y variables de cada uno de ellos. Además, se detallan las consideraciones que se tienen en cuenta para cada uno de los modelos y se indican las diferencias entre ellos y entre éstos y los modelos originales de la literatura.

En el capítulo 3 se presenta la primera variante propuesta para el *MMSP-W*, la integración de modelos. Aquí, se formulan dos modelos matemáticos equivalentes, basados en los modelos de la literatura pero considerando vínculos entre estaciones consecutivas, la posibilidad de tener más de un procesador homogéneo por estación y la relación entre la sobrecarga total generada y el trabajo total completado. Ambos modelos son evaluados mediante una experiencia computacional.

En el capítulo 4 se extienden los modelos resultantes de la primera variante mediante el concepto de regularidad. Este concepto se incorpora desde diferentes enfoques, dando como resultado un conjunto de modelos matemáticos multi-objetivo y otro conjunto de modelos mono-objetivo con restricciones adicionales. Con el fin de evaluar las ganancias, en cuanto a regularidad, a expensas de las pérdidas de trabajo total completado, se lleva a cabo una experiencia computacional basada en ejemplares de la literatura y ejemplares de un caso de estudio (NISSAN-9ENG).

De forma similar, el capítulo 5 está dedicado a la incorporación de tiempos de proceso variables en función del factor de actividad. En esta parte de la tesis, se mezclan factores meramente productivos, como es la minimización de la sobrecarga de trabajo, con factores humanos como es la activación de los operarios a lo largo de la jornada laboral, con el fin de maximizar la productividad. Obviamente, esta maximización de la productividad irá acompañada de un análisis de los beneficios que pueden obtenerse y que, en parte, deben destinarse a la recompensa de los trabajadores. Al igual que en el resto de capítulos en los que se presenta una variante, en este caso, también se realiza una experiencia computacional.

El capítulo 6, presenta la última de las variantes estudiadas, la incorporación de la saturación de las estaciones de trabajo. En esta parte del documento, tras definir algunos conceptos sobre saturación, se presentan nuevos modelos matemáticos para el problema *MMSP-W* que, además de intentar maximizar el trabajo total completado, mejoran las condiciones laborales de los trabajadores. La experiencia computacional con los ejemplares del caso Nissan, servirá para poder evaluar el efecto individual de las nuevas condiciones laborales, más favorables para los trabajadores, y el efecto de las mismas junto con la activación de los trabajadores, sobre la cantidad de trabajo no completado.

Una vez descrito todo el trabajo realizado, el presente documento finalizará con las conclusiones alcanzadas con la ejecución de la tesis y con las propuestas de trabajos futuros.

— Parte II —

El *MMSP-W* y sus Variantes

Capítulo 2

EL *MMSP-W*

2.1. Introducción

Las líneas, presentes hoy en día, en la industria de automoción, entre otras, se caracterizan por la flexibilidad que deben poseer, para ser capaces de fabricar y/o montar productos que, aunque similares, puedan tener opciones diferentes. Este tipo de líneas de productos mixtos, *MMAL*, presentan dos problemas básicos: el equilibrado de la linea y la determinación de la secuencia de los productos en la línea.

Ya se ha visto, en el capítulo anterior (Subsección 1.2.1, página 10) que uno de los principales inconvenientes, en cuanto a la diversidad de productos, son los tiempos de proceso de las tareas u operaciones necesarias para su fabricación y/o montaje. Esta variabilidad de los tiempos de proceso, permite clasificar los problemas de secuenciación en tres tipos básicos de problemas: *FSP*[1], *ELSP* y *MMSP*.

El *MMSP*, caracterizado por unos tiempos de proceso, de los diferentes tipos de productos, ligeramente diferentes, puede clasificarse, a su vez, respecto a los elementos del sistema bajo los cuales se establecen los criterios de optimización. Así, tal como se ha visto en el capítulo anterior (página 12), los problemas de secuenciación de modelos mixtos pueden dividirse en los siguientes tipos: los *LSP*[2], que incluyen el *ORVP* y el *PRVP*, los *CSP* y los *MMSP-W*.

El foco de estudio de esta tesis es el *MMSP-W*. Por este motivo en el presente capítulo se presenta el problema, describiéndolo y determinando los modelos de referencia de la literatura que servirán como base para este trabajo.

[1] Flow-Shop Problems.
[2] Level Scheduling Problems.

2.2. Formulación del Problema

A grandes rasgos, el *MMSP-W*, consiste en secuenciar un plan de producción de T unidades de producto, de las cuales d_i son del tipo i ($i = 1, ..., |I|$), que deben procesarse en un línea de montaje formada por $|K|$ estaciones de trabajo dispuestas en serie[3]. El objetivo de esta secuencia es minimizar el exceso de trabajo, provocado por la variabilidad de los tiempos de proceso de las operaciones de todos los tipos de producto que deben llevarse a cabo en una *MMAL*.

Teniendo en cuenta la diversidad de variantes del *MMSP-W* estudiadas y la variedad de tipos de *MMAL*, a continuación se definen las hipótesis de partida para el problema que se estudiará a lo largo de esta tesis:

- En la misma línea se fabrican diferentes tipos de producto con pequeñas diferencias en cuanto al consumo de componentes, uso de recursos y tiempos de proceso (ver figura 2.1).
- Todos los productos siguen la misma ruta dentro de la línea de producción. Es decir, todos los productos pasan por todas las estaciones de trabajo (ver figura 2.1).
- La línea debe ser capaz de soportar diferentes planes de demanda, en los que las demandas individuales de los tipos de producto pueden variar considerablemente.
- Para el equilibrado de la línea se consideran valores promedio, del consumo de componentes, uso de recursos y tiempos de proceso, respecto a los diferentes planes de demanda que puedan darse.
- Teniendo en cuenta el conjunto total de tareas necesarias para el montaje de los productos y las precedencias[4] entre ellas, se lleva a cabo el equilibrado de la línea. De esta manera se define la distribución fija de la línea, el número de estaciones, $|K|$, que la componen, el tiempo entre productos consecutivos, es decir, el tiempo de ciclo, c, y se reparte todo el trabajo necesario, para fabricar los productos, entre todas las estaciones (ver figura 2.1).
- Suponemos que los productos pasan de una estación a otra por medio de un transportador, cuya velocidad es constante. Del mismo modo se asume como constante la frecuencia de lanzamientos, con lo cual el tiempo de ciclo, c, es idéntico para todas las estaciones de trabajo ($k \in K$) (ver figura 2.1).
- Todas las estaciones de trabajo, que componen la línea, son cerradas, es decir, existe un espacio limitado para desarrollar el trabajo asignado. Es decir, todo el trabajo que debe realizarse en una estación debe llevarse a cabo dentro de los límites espaciales de la misma.

[3] Dispuestas una detrás de la otra, de forma consecutiva.
[4] Conjunto de reglas que determinan el orden en el cual deben realizarse las tareas.

- No existen buffers intermedios entre estaciones consecutivas. De esta forma si una estación ha finalizado su trabajo, la unidad de producto queda bloqueada en la estación hasta que la siguiente estación se libere.

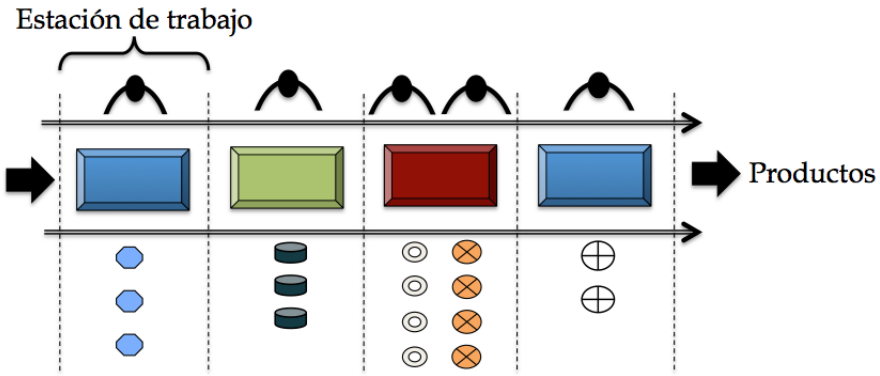


Figura 2.1: Esquema de una línea de montaje formada por 4 estaciones dispuestas en serie.

En la figura 2.1 se presenta el esquema de una línea de montaje de productos mixtos. En ella se puede apreciar la disposición en serie de cada una de las estaciones y cómo las unidades de producto pasan de una estación a otra secuencialmente. Del mismo modo, se observan, los procesadores de cada estación y los materiales necesarios para llevar a cabo las operaciones en las estaciones, así como, la variedad de tipos de producto.

Cada unidad de tipo de producto, requiere a cada procesador homogéneo (operario, robot, etc.) de una estación determinada un tiempo de proceso determinado, $p_{i,k}$, a actividad normal. A su vez, a cada procesador de una estación de trabajo, se le concede un tiempo estándar de trabajo, el tiempo de ciclo (c), durante el cual puede trabajar sobre una unidad de producto.

En ocasiones, para completar parte del trabajo sobre una unidad de producto, la estación puede retener dicha unidad un tiempo llamado tiempo de ventana o ventana temporal (l_k), superior al tiempo de ciclo ($l_k - c > 0$), reduciendo así el tiempo disponible para procesar la siguiente unidad. Aún concediendo la ventana temporal a todas las estaciones de la línea, en ocasiones no es posible completar todo el trabajo requerido, es entonces cuando se genera sobrecarga (ver figura 2.2).

Así, considerando la variación de los tiempos de proceso de las operaciones de los distintos productos y que el tiempo de ciclo de los procesadores de las estaciones se calcula en base a valores promedio, el objetivo del problema es minimizar la sobrecarga o maximizar el trabajo completado.

Este objetivo puede alcanzarse mediante dos vías. La primera, reduciendo al mínimo el trabajo no completado[5] por los procesadores de las estaciones de trabajo, garantizando así la realización de la mayor parte de trabajo requerido. La segunda vía, minimizando el tiempo improductivo[6] de los procesadores de las estaciones de trabajo.

En la siguiente figura (Figura 2.2) se observa cómo, en función de la secuencia de piezas, el trabajo completado es uno u otro. En concreto, si se deben secuenciar seis unidades de producto, de los cuales tres son de tipo A y tres de tipo B, en una sola estación de trabajo, siendo los tiempos de proceso de las unidades A y B y la ventana temporal de 0.75, 1.25 y 1.5 veces el tiempo de ciclo, c, respectivamente, se pueden dar situaciones en las que haya sobrecarga (secuencia $AAABBB$), en las que haya tiempo muerto o tiempo improductivo (secuencia $AABBBA$) o situaciones en las que se complete todo el trabajo requerido (secuencia $ABABAB$). Esta última situación es la que se pretende alcanzar mediante la resolución del *MMSP-W*.

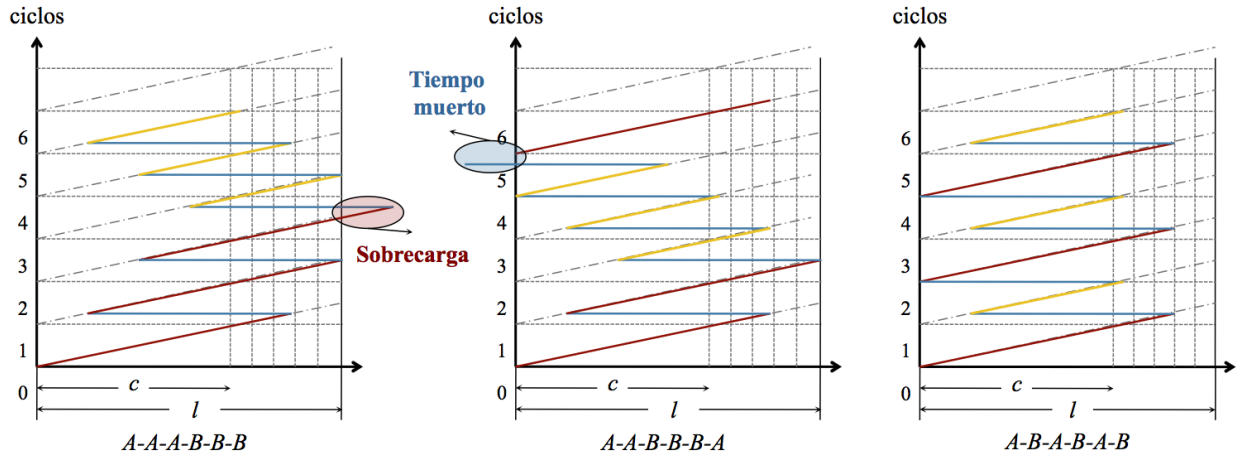


Figura 2.2: Sobrecarga, tiempo muerto y trabajo completado en función de la secuencia.

La sobrecarga, también llamada sobre-esfuerzo, se mide en unidades de tiempo y se corresponde con el trabajo que no puede ser completado en la línea a la actividad o ritmo de trabajo establecido. Existen diferentes medidas para evitar este trabajo no completado, entre ellas, encontramos en la literatura las siguientes:

1. Parar el avance de la línea con el fin de completar el trabajo pendiente dentro de la estación de trabajo. Esta acción está en consonancia con el objetivo de minimizar el tiempo de paro de la línea (Okamura y Yamashina, 1979; Xiaobo y Ohno, 1997, 2000).

[5]Sobrecarga o trabajo utilitario.
[6]Tiempos de paro de la línea o tiempo muerto.

2. Permitir que la unidad de producto pase a las siguientes estaciones, dejando pendiente el trabajo no completado para otro momento o, incluso, para completarse fuera de la línea y fuera de los turnos habituales en las denominadas líneas hospital[7]. En la literatura se encuentran diversas formas de designar a este trabajo no completado: (1) sobrecarga de trabajo (Bautista y Cano, 2011, 2008; Scholl *et al.*, 1998; Yano y Rachamadugu, 1991); (2) trabajo pendiente (Bolat, 1997); o (3) sobre-esfuerzo, cuando es necesaria la intervención de operadores adicionales (Tsai, 1995). Normalmente, esta medida se da en los problemas *MMSP-W* que tienen por objetivo minimizar la sobrecarga o el trabajo perdido.

3. Aumentar la capacidad de la línea, por encima de la estándar, mediante operarios refuerzo (Boysen, Kiel y Scholl, 2011; Hyun *et al.*, 1998; Tsai, 1995) o mediante la programación de los sistemas robotizados para acelerar las operaciones. Con esta medida, correspondiente a la minimización del trabajo utilitario, el trabajo que no puede ser completado por los procesadores de una estación de trabajo, es realizado por procesadores auxiliares de apoyo.

En este trabajo se contemplarán dos de los tres tipos de actuaciones para el tratamiento de las sobrecargas. En primer lugar se considerará que el trabajo no completado por los procesadores se realizará fuera de la línea. Y, en segundo lugar, se aumentará la capacidad de la línea, mediante el aumento de la velocidad de trabajo de los procesadores. Todo esto, se realizará partiendo de dos modelos de referencia. El primero, el modelo propuesto por (Scholl *et al.*, 1998) cuyo objetivo es el de minimizar la sobrecarga de trabajo y, el segundo, el propuesto por (Yano y Rachamadugu, 1991) que tiene como objetivo maximizar el trabajo completado.

2.2.1. Métodos de Resolución

El *MMSP-W*, en la versión que no considera vínculos entre estaciones, es un problema NP-difícil (Yano y Rachamadugu, 1991) y para su resolución se han propuesto diversas alternativas, tales como: algoritmos exactos basados en branch and bound (Bolat, 2003), programación dinámica (Bautista y Cano, 2011; Yano y Rachamadugu, 1991), procedimientos heurísticos de búsqueda local (Bautista y Cano, 2008; Yano y Bolat, 1989), algoritmos greedy basados en reglas de prioridad (Bautista y Cano, 2008; Bolat y Yano, 2009), meta e híper heurísticas (Cano, Ríos y Bautista, 2010; Scholl *et al.*, 1998) o beam search (Erel, Gocgun y Sabuncuoglu, 2007). También existen precedentes de problemas multi-criterio relacionados de una forma u otra con el *MMSP-W* (Aigbedo y Monden, 1997; Ding, Zhu y Sun, 2006; Kotani *et al.*, 2004; Rahimi-Vahed y Mirzaei, 2007; Rahimi-Vahed *et al.*, 2007), entre otros. De hecho, una revisión, más extensa, de los procedimientos de resolución empleados para resolver el problema, puede encontrarse en Cano (2006).

[7] Lineas auxiliares, donde se realiza el trabajo no completado.

En cuanto a algunas versiones del *MMSP-W* que sí consideran vínculos entre estaciones, se han empleado la programación dinámica (Bautista y Cano, 2011) y la programación matemática (Bautista, Cano y Alfaro, 2011; Bautista y Suárez, 2009).

En la presente investigación se utiliza, este último procedimiento, la programación matemática, para la resolución de las diferentes variantes propuestas para el *MMSP-W*, considerando vínculos entre estaciones consecutivas.

La programación matemática es un conjunto de teoremas, algoritmos, métodos y técnicas para resolver problemas de optimización. Todo problema de programación matemática consta de una función objetivo a maximizar o minimizar y de un conjunto de restricciones o ecuaciones de condición. Cuando la función objetivo y todas las restricciones son de tipo lineal estamos ante un problema de programación lineal, *LP* (Linear Programming), que es la forma de programación matemática más desarrollada. Este tipo de programación puede ser entera pura, entera mixta o binaria, en función de si todas las variables toman valores enteros, de si algunas variables toman valores enteros y otras valores reales, o de si todas las variables son binarias.

En nuestro caso, el procedimiento que se utilizará para resolver *MMSP-W* con sus diferentes variantes, debido a la condición de binariedad de algunas variables de decisión, será la programación lineal entera mixta, *MILP* (Mixed Integer Linear Programming). En este tipo de programación matemática, no todas las variables son reales, sino que algunas pueden ser enteras o binarias.

Para ello, se utilizarán dos solucionadores de alto rendimiento en problemas de programación lineal (*LP*), programación entera mixta (*MILP*) y programación cuadrática (*QP*), el IBM ILOG CPLEX Optimizer y el GUROBI Optimizer. Por su lado, para los modelos *MILP*, el principal algoritmo que usa CPLEX es el Branch & Cut, un algoritmo basado en el método Simplex, Branch & Bound y en planos cortantes, mientras que el Optimizador de Gurobi incorpora el método Dual Simplex, y un solucionador de barrera paralela, incluyendo los planos de corte y otras heurísticas.

2.3. Modelos de Referencia

Para abordar el problema de secuenciación de productos mixtos en una línea de montaje mediante la introducción de diferentes variantes, se utilizan dos modelos, presentes en la literatura, como referencia:

- $M1$: Modelo propuesto por (Yano y Rachamadugu, 1991) cuyo objetivo es maximizar el trabajo total completado en la línea de montaje.

- $M2$: Modelo propuesto por (Scholl *et al.*, 1998) cuyo objetivo es minimizar la sobrecarga o esfuerzo adicional.

Ambos modelos son un buen punto de partida, a pesar de no considerar vínculos entre estaciones consecutivas, para el trabajo desarrollado a lo largo de la tesis, cuyas experiencias computacionales se basan en un caso de estudio de Nissan, por las siguientes razones:

1. Las instancias[8] de datos que se utilizarán en la parte computacional de la tesis se corresponden a situaciones reales en las que se disponen de diferentes tipos de productos (motores, en nuestro caso) para ser secuenciados en una línea de producción.

2. Cada unidad de cada tipo de producto requiere un tiempo de procesamiento en cada estación de trabajo. Para completar dicho proceso en cada estación, un tiempo igual al ciclo de la línea, c (igual a $1/r$, donde r es la tasa de producción), se concede inicialmente a cada una de las estaciones.

3. La carga de trabajo generada, en las estaciones de trabajo que componen la línea, por determinados productos, es mayor que el tiempo de ciclo, ya que éste se establece por los promedios de carga de la mezcla de productos.

4. No existen barreras físicas entre las estaciones de trabajo a lo largo de la línea, lo que permite, dentro de límites razonables[9], la realización de una parte de una unidad de producto en la estación sucesora. Esto nos permite establecer, en cada estación de trabajo k, una ventana temporal de trabajo, l_k, mayor que el tiempo de ciclo ($l_k > c$).

5. El objetivo del modelo $M1$, propuesto por Yano y Rachamadugu (1991), es maximizar el trabajo total realizado. Este objetivo está en consonancia con el objetivo del caso de estudio desarrollado en esta tesis.

   El objetivo del modelo $M2$ de Scholl *et al.* (1998) es reducir al mínimo la sobrecarga total de trabajo.

   Ambos objetivos son equivalentes cuando existe un único procesador ($b_k = 1$) en cada una de las estaciones de trabajo (véase Bautista y Cano, 2011).

[8] Ejemplares de planes de demanda. Incluyen los datos relativos a la demanda parcial de los tipos de productos que deben realizarse en la línea y que conforman la demanda total de la misma.

[9] Las estaciones de trabajo son cerradas, teniendo un espacio limitado suficiente para permitir que se trabaje sobre una unidad de producto un tiempo igual a la ventana temporal, l_k.

6. En ambos modelos, $M1$ y $M2$, el procesamiento de cualquier unidad de producto puede ser interrumpido en cualquier estación de trabajo, en cualquier momento comprendido entre el tiempo de ciclo y la finalización del proceso. En esta característica de los modelos está implícito el siguiente supuesto: los trabajadores conocen el instante exacto en el que se debe interrumpir o reforzar una operación sin estar obligado a esperar a que el instante límite, establecido por la ventana temporal, se alcance. En este trabajo, se considerará esta hipótesis teniendo en cuenta la existencia de un sistema de control de producción que permita a los trabajadores conocer los detalles del trabajo en proceso, *WIP*[10], por adelantado.

Todos estos factores son los que nos permiten adoptar los modelos $M1$ y $M2$ como punto de partida razonable para el estudio de esta tesis. Las principales diferencias entre ambos son:

1. El modelo $M1$ se basa en el tiempo de procesamiento aplicado, mientras que $M2$ se centra en la sobrecarga de trabajo generada o trabajo perdido.

2. $M1$ utiliza una escala de tiempo absoluta para cada estación de trabajo, es decir, los instantes para cada unidad de producto en cada estación se corresponden con el instante de inicio de la primera unidad de producto en cada estación. Por el contrario, el modelo $M2$ utiliza una escala de tiempo relativa a cada unidad de producto procesada en cada estación de trabajo.

3. En el modelo $M1$ se concede a la última unidad de producto secuenciada, en todas las estaciones de trabajo, un tiempo máximo de procesamiento igual a la ventana temporal, l_k. En cambio, en el modelo $M2$, a la última unidad de producto sólo se le permite un tiempo de procesamiento igual al tiempo de ciclo, c.

Ambos modelos de la literatura, tanto el $M1$ como el $M2$, no son válidos en líneas de montaje con estaciones de trabajo en serie y con vínculos entre estaciones consecutivas. En ellos, el instante de inicio de una operación en una estación sólo depende del tiempo de ciclo y del instante final (o interrupción) de la operación anterior en dicha estación, es decir, sólo depende del momento en el que la estación queda liberada.

Sin embargo, si se consideran estaciones en serie, los instantes de inicio de las operaciones pueden estar condicionados por los vínculos o enlaces entre estaciones consecutivas en las siguientes situaciones:

- Cuando el proceso, que se puede aplicar a una unidad de producto en una estación determinada, requiere la terminación del proceso en la estación anterior, a excepción de la primera estación.

[10] Work in Progress.

- Cuando una unidad de producto bloquea una estación de trabajo debido a que la siguiente estación está ocupada y no existen buffers intermedios entre ellas.

Así, considerando los vínculos entre estaciones consecutivas y los modelos de la literatura $M1$ y $M2$, a lo largo de este trabajo se tomaran como referencia los modelos extendidos $M3$ (correspondiente al modelo $M1$ extendido) y $M4$ (correspondiente al modelo $M2$ extendido) propuestos por Bautista y Suárez (2009) y Bautista y Cano (2011). A continuación se detalla brevemente cada uno de estos modelos.

2.3.1. Modelo $M3$

El modelo $M3$, propuesto por Bautista y Suárez (2009), cuyo objetivo es maximizar la cantidad de trabajo completado, puede considerarse una extensión del modelo propuesto por Yano y Rachamadugu (1991).

A continuación se describen los parámetros y variables de este modelo:

Parámetros	
K	Conjunto de estaciones de trabajo $(k = 1, ..., \|K\|)$.
b_k	Número de procesadores homogéneos en cada estación de trabajo k $(k = 1, ..., \|K\|)$.
I	Conjunto de tipos de producto $(i = 1, ..., \|I\|)$.
d_i	Demanda programada del tipo de producto i $(i = 1, ..., \|I\|)$.
$p_{i,k}$	Tiempo de proceso (a actividad normal) requerido a cada procesador homogéneo, por una unidad de producto de tipo i $(i = 1, ..., \|I\|)$ en la estación k $(k = 1, ..., \|K\|)$.
T	Demanda total. Obviamente: $\sum_{i=1}^{\|I\|} d_i = T$.
t	Indice de posición en la secuencia $(t = 1, ..., T)$.
c	Tiempo de ciclo. Tiempo estándar asignado a cada procesador homogéneo de las estaciones de trabajo $(k = 1, ..., \|K\|)$ para tratar cualquier unidad de producto.
l_k	Ventana temporal. Tiempo máximo que se le permite, a cada procesador homogéneo de la estación k $(k = 1, ..., \|K\|)$, trabajar en cualquier unidad de producto; siendo $l_k - c > 0$ el tiempo máximo que se puede retener una unidad de producto en la estación k, una vez concluido el ciclo.

Variables

$x_{i,t}$ Variable binaria que adopta el valor 1 si una unidad del producto i $(i = 1, ..., |I|)$ se asigna a la posición t $(t = 1, ..., T)$ de la secuencia, y valor 0 en caso contrario.

$s_{k,t}$ Instante de inicio del trabajo aplicado a la *t-ésima* unidad de la secuencia de productos en la estación k $(k = 1, ..., |K|)$.

$v_{k,t}$ Tiempo de proceso aplicado a la *t-ésima* unidad de producto secuenciada en la estación k $(k = 1, ..., |K|)$ por cada procesador homogéneo (a actividad normal).

Nótese que para referirse indistintamente a trabajadores, robots o sistemas trabajador-máquina, el coeficiente b_k representa el número de procesadores en la estación k $(k = 1, ..., |K|)$ y no el número de trabajadores, como ocurre en Yano y Rachamadugu (1991). En esta investigación, la presencia de más de un procesador en una estación de trabajo no implica la existencia de varias subestaciones en paralelo en dicha estación. En efecto:

(1) Si una estación de trabajo tiene asignados p procesadores homogéneos, la carga total de la estación se distribuye por igual entre cada uno de los procesadores, los cuales realizan su trabajo, en colaboración, sobre una unidad concreta en curso de fabricación.

(2) Si en algún punto de la línea, coinciden p estaciones en paralelo, significa que, en régimen permanente, cada estación contendrá p unidades de producto y cada una de estas unidades dispondrá de un tiempo p veces el tiempo de ciclo ($p \times c$) para que sobre ellas se lleven a cabo las tareas asignadas.

Por otra parte, los tiempos de proceso, $p_{i,k}$, son exclusivos para la estación de trabajo k. De hecho, se corresponden con los tiempos (en actividad normal) requeridos por las tareas que, en el problema previo de equilibrado de líneas, *ALBP*, han sido asignadas a la estación de trabajo k.

Así, bajo las consideraciones anteriores, el Modelo $M3$ es el siguiente:

Modelo $M3$:

$$\text{máx}\, V = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} v_{k,t} \right) \tag{2.1}$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^{T} x_{i,t} = d_i \qquad i = 1, \ldots, |I| \tag{2.2}$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \qquad t = 1, \ldots, T \tag{2.3}$$

$$v_{k,t} \leqslant \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot x_{i,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{2.4}$$

$$s_{k,t} \geqslant \big(t + k - 2\big)c \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{2.5}$$

$$s_{k,t} \geqslant s_{k,t-1} + v_{k,t-1} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 2, \ldots, T \tag{2.6}$$

$$s_{k,t} \geqslant s_{k-1,t} + v_{k-1,t} \qquad k = 2, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{2.7}$$

$$s_{k,t} + v_{k,t} \leqslant \big(t + k - 2\big)c + l_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{2.8}$$

$$v_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{2.9}$$

$$x_{i,t} \in \{0, 1\} \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{2.10}$$

En el modelo, V representa el trabajo total completado. El conjunto de restricciones (2.2) obliga a que la demanda programada para cada tipo de producto sea satisfecha. Las restricciones (2.3) indican que sólo una unidad de producto puede ser asignada en cada posición de la secuencia. El conjunto de restricciones (2.4) limita el tiempo de proceso, aplicado a cada unidad de producto en cada estación de trabajo, al tiempo de proceso requerido. Con los conjuntos de restricciones (2.5) - (2.7) se establece el tiempo de inicio de la *t-ésima* unidad de producto de la secuencia en la estación k. Este tiempo es el máximo entre los tres casos posibles: (1) el instante de llegada esperado de la unidad de producto al inicio de la estación de trabajo $(s_{k,t}^{min})$; (2) el instante en el que la estación de trabajo k queda liberada de la unidad de producto anterior $(t-1)$; o (3) el instante en el que la estación anterior $(k-1)$ libera la *t-ésima* unidad de producto. Las restricciones (2.8) limitan el tiempo máximo de trabajo que puede ser aplicado a la *t-ésima* unidad de producto en la estación k. Finalmente, las restricciones (2.9) fuerzan la no-negatividad de los tiempos de proceso aplicados, y las restricciones (2.10) establecen las variables binarias de asignación.

Nótese que, si $s_{1,1} = 0$ se toma como referencia temporal de los instantes de inicio de las operaciones, entonces se puede considerar que el momento más temprano para que las operaciones puedan empezar, en el modelo $M3$, es: $s_{k,t}^{min} = (t + k - 2)c \quad (\forall k, \forall t)$.

Esta hipótesis es válida cuando las unidades de producto (por ejemplo, motores y coches) se mueven a lo largo de la línea de montaje a una velocidad constante y una estación de trabajo tiene que esperar a que el producto le llegue, antes de trabajar en él.

2.3.2. Modelo $M4$

El modelo $M4$, propuesto por Bautista y Cano (2011), cuyo objetivo es minimizar la sobrecarga total de trabajo (W), es una extensión del modelo propuesto por Scholl *et al.* (1998).

Los parámetros de este modelo coinciden con los del modelo $M3$, descritos en la sección anterior (Sección 2.3.1). En cambio, este modelo requiere un conjunto de variables adicionales. Éstas son:

Variables adicionales	
$\hat{s}_{k,t}$	Diferencia positiva entre el instante de inicio real y el mínimo instante de inicio de la *t-ésima* operación en la estación de trabajo k. Se cumple $\hat{s}_{k,t} = [s_{k,t} - (t + k - 2)c]^+$ (con $[x]^+ = max\{0, x\}$).
$w_{k,t}$	Sobrecarga generada en cada procesador homogéneo (a actividad normal), medida en tiempo, por la *t-ésima* unidad de producto secuenciada en la estación de trabajo k $(k = 1, ..., \|K\|)$.
$\rho_{k,t}$	Tiempo de proceso requerido a cada procesador (a actividad normal) por la *t-ésima* unidad de la secuencia de productos en la estación de trabajo k $(k = 1, ..., \|K\|)$.

Por consiguiente, el modelo matemático $M4$, utilizado como referencia en este trabajo es el siguiente:

Modelo $M4$:

$$\text{mín}\, W = \sum_{k=1}^{|K|} \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \tag{2.11}$$

Sujeto a :

$$\sum_{t=1}^{T} x_{i,t} = d_i \qquad i = 1, \ldots, |I| \tag{2.12}$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \qquad t = 1, \ldots, T \tag{2.13}$$

$$\rho_{k,t} = \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot x_{i,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{2.14}$$

$$\rho_{k,t} - w_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{2.15}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant \hat{s}_{k,t-1} + \rho_{k,t-1} - w_{k,t-1} - c \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 2, \ldots, T \tag{2.16}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant \hat{s}_{k-1,t} + \rho_{k-1,t} - w_{k-1,t} - c \qquad k = 2, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{2.17}$$

$$\hat{s}_{k,t} + \rho_{k,t} - w_{k,t} \leqslant l_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{2.18}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{2.19}$$

$$w_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{2.20}$$

$$x_{i,t} \in \{0, 1\} \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{2.21}$$

$$\hat{s}_{1,1} = 0 \tag{2.22}$$

La función objetivo (2.11) de este modelo representa la minimización de la sobrecarga total generada. El conjunto de igualdades (2.12) - (2.13), coincide con las restricciones (2.2) - (2.3) del modelo $M3$ y representan la satisfacción de la demanda y la asignación de productos a las posiciones de la secuencia, respectivamente. Las restricciones (2.14) - (2.15) establecen los vínculos entre los tiempos de proceso, requeridos por los productos en las estaciones, con los correspondientes a las unidades ordenadas en secuencia. Dicha ordenación, limita los valores de las sobrecargas. Los conjuntos de restricciones (2.16) - (2.18) sirven para determinar los instantes de inicio relativos de las operaciones. La no-negatividad de las variables se establece mediante las inecuaciones (2.19) - (2.20) y la cualidad binaria de las variables de asignación se formula en las restricciones (2.21). Finalmente, en la ecuación (2.22) se fija el instante de inicio de las operaciones.

Obviamente, este modelo puede ampliarse si se considera la existencia de varios procesadores homogéneos en una misma estación de trabajo, tal como aparece en Bautista *et al.* (2011). En este trabajo, presentamos el modelo $M4'$, cuyo objetivo es minimizar la sobrecarga, usando una escala relativa de tiempos y permitiendo más de un procesador en cada estación.

Debido a que este modelo servirá también como modelo de referencia a lo largo de este trabajo, éste se presenta a continuación:

Modelo $M4'$:

$$\text{mín}\, W = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right) \tag{2.23}$$

Sujeto a : Restricciones (2.12) - (2.22) del modelo $M4$ (ver página 40).

Como puede apreciarse y tal como se ha dicho anteriormente, el modelo $M4'$ es una extensión del modelo $M4$, con la única variación de que éste tiene en cuenta el número de procesadores homogéneos por estación, a la hora de minimizar la sobrecarga.

Así, toda la investigación desarrollada se sustentará en los modelos matemáticos aquí descritos.

Capítulo 3

INTREGRACIÓN DE MODELOS PARA EL *MMSP-W*

3.1. Introducción

En el presente capítulo se proponen dos nuevos modelos matemáticos, para el *MMSP-W* en líneas de montaje con estaciones en serie. Estos modelos se formularán a partir de los modelos de referencia $M3$ y $M4$, propuestos por Bautista y Suárez (2009) y Bautista y Cano (2011) e integrarán las funciones objetivo de cada uno de ellos, demostrando la equivalencia entre ambos.

Una vez definidos los nuevos modelos que consideran vínculos entre estaciones y la existencia de más de un procesador homogéneo en cada estación de trabajo, se presenta un ejemplo que ilustra las diferencias entre los modelos de la literatura, propuestos por Yano y Rachamadugu (1991) y Scholl *et al.* (1998), y los propuestos en este capítulo.

Posteriormente, con el fin de evaluar el comportamiento de los modelos, se realiza una previa experiencia computacional a partir de un conjunto de datos presente en la literatura (Bautista y Cano, 2008). Tras este experimento, y sin perder de vista la principal motivación de este estudio, se lleva a cabo una aplicación de los modelos propuestos sobre la línea de motores de la planta de Nissan, en Barcelona. Para ello, se considera un conjunto, de ejemplares de datos, representativo de los escenarios que pueden darse en la línea respecto al mix de producción de motores.

Finalmente, en el marco del caso de Nissan, se realiza un análisis de la distribución de la sobrecarga total, entre las estaciones y los productos, en situaciones críticas para la línea de motores. De esta manera, podremos detectar dónde se deben localizar y concentrar los esfuerzos para mejorar el proceso y el diseño del producto.

Cabe destacar que el trabajo desarrollado en esta parte de la tesis ha dado lugar a la publicación de un artículo, Bautista, Cano y Alfaro (2012g).

3.2. Modelos Integradores para el *MMSP-W*

A partir de los modelos $M3$ y $M4$, expuestos en el capítulo anterior (Capítulo 2, Secciones 2.3.1 y 2.3.2), es posible establecer una relación entre las funciones objetivo, de ambos modelos, de la siguiente forma:

Teorema 1. *Si $b_k = 1$ $(k = 1, \ldots, |K|)$, entonces las funciones objetivo de $M3$ y $M4$ son equivalentes. (Bautista y Cano, 2011).*

Demostración. Si se tiene:

$$\text{máx} \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} v_{k,t} \right) \Longleftrightarrow \text{máx} \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} \left(\sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot x_{i,t} - w_{k,t} \right) \right)$$

$$\Leftrightarrow \text{máx} \sum_{k=1}^{|K|} b_k \left(\sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot x_{i,t} - \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right) \Leftrightarrow \text{máx} \left(V_0 - \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right) \right) \Leftrightarrow \text{mín} \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right)$$

donde: $V_0 = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{i=1}^{|I|} d_i \cdot p_{i,k} \right)$ es el trabajo total requerido. Finalmente,

$$\text{máx}\, V = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} v_{k,t} \right) \Longleftrightarrow \text{mín}\, W = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right)$$

□

Considerando esta equivalencia entre las funciones objetivo de $M3$ y $M4$, cuando todas las estaciones tienen un único procesador, y de $M3$ y $M4'$ (extensión de $M4$) (ver Teorema 1, Bautista y Cano, 2011), los modelos pueden combinarse de dos formas, en función de si se considera una escala de tiempos absoluta[1] (usada en $M3$) o una relativa[2] (usada en $M4$ y en $M4'$).

[1]Escala de tiempos, mediante la cual, los instantes de inicio para cada unidad de producto, en cada estación de trabajo, se corresponden con el instante de inicio de la primera unidad de producto en cada estación.

[2]Escala de tiempos, mediante la cual, los instantes de inicio para cada unidad de producto, en cada estación de trabajo, dependen de las unidades procesadas en la estación.

3.2.1. Modelo $M3 \cup 4$

Teniendo en cuenta una escala absoluta para los instantes de inicio de las operaciones correspondientes a las unidades de la secuencia en cada estación de trabajo, se propone el modelo $M3 \cup 4$, cuyos parámetros y variables pueden consultarse en el capítulo anterior (Capítulo 2, Secciones 2.3.1 y 2.3.2) y cuyo modelo matemático es el siguiente:

Modelo $M3 \cup 4$:

$$\text{máx}\, V = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} v_{k,t} \right) \Longleftrightarrow \text{mín}\, W = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right) \tag{3.1}$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^{T} x_{i,t} = d_i \qquad i = 1, \ldots, |I| \tag{3.2}$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \qquad t = 1, \ldots, T \tag{3.3}$$

$$v_{k,t} + w_{k,t} = \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot x_{i,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.4}$$

$$s_{k,t} \geqslant \big(t + k - 2\big)c \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.5}$$

$$s_{k,t} \geqslant s_{k,t-1} + v_{k,t-1} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 2, \ldots, T \tag{3.6}$$

$$s_{k,t} \geqslant s_{k-1,t} + v_{k-1,t} \qquad k = 2, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.7}$$

$$s_{k,t} + v_{k,t} \leqslant \big(t + k - 2\big)c + l_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.8}$$

$$v_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.9}$$

$$w_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.10}$$

$$x_{i,t} \in \{0, 1\} \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{3.11}$$

En el modelo, las funciones objetivo equivalentes (3.1) están representadas por el trabajo total completado (V) y la sobrecarga total generada (W). Los conjuntos de restricciones (3.2), (3.3), (3.5) - (3.8), representan la satisfacción de la demanda programada, la asignación única de una unidad de producto a cada posición de la secuencia y los posibles instantes de inicio de las unidades de producto de la secuencia en las estaciones de trabajo, respectivamente, al igual que en el modelo de referencia $M3$ (restricciones (2.2), (2.3), (2.5) - (2.8) de la página 38). Las restricciones (3.9) y (3.10) establecen la no-negatividad de las variables del trabajo completado y la sobrecarga; y la (3.11) impone a las variables de asignación la cualidad de binarias. Finalmente, las restricciones (3.4) fijan la relación entre el tiempo de proceso requerido, $p_{i,k}$, el tiempo de proceso aplicado, $v_{k,t}$, y la sobrecarga generada por las unidades de producto en las estaciones de trabajo, $w_{k,t}$.

3.2.2. Modelo $M4 \cup 3$

Del mismo modo, considerando una escala de instantes de inicio, de las unidades de la secuencia en cada estación de trabajo, relativa, se formula el siguiente modelo matemático, cuyas variables y parámetros están descritos en el capítulo anterior (Capítulo 2, Secciones 2.3.1 y 2.3.2).

Modelo $M4 \cup 3$:

$$\text{mín}\, W = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right) \Longleftrightarrow \text{máx}\, V = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} v_{k,t} \right) \tag{3.12}$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^{T} x_{i,t} = d_i \qquad i = 1, \ldots, |I| \tag{3.13}$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \qquad t = 1, \ldots, T \tag{3.14}$$

$$v_{k,t} + w_{k,t} = \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot x_{i,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.15}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant \hat{s}_{k,t-1} + v_{k,t-1} - c \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 2, \ldots, T \tag{3.16}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant \hat{s}_{k-1,t} + v_{k-1,t} - c \qquad k = 2, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.17}$$

$$\hat{s}_{k,t} + v_{k,t} \leqslant l_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.18}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.19}$$

$$v_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.20}$$

$$w_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{3.21}$$

$$x_{i,t} \in \{0, 1\} \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{3.22}$$

$$\hat{s}_{1,1} = 0 \tag{3.23}$$

En el modelo, las restricciones (3.16) - (3.19) constituyen el conjunto de soluciones posibles para los instantes de inicio relativos, de los trabajos, en cada estación. En cuanto al resto de restricciones y a la función objetivo, éstas coinciden con las del modelo $M3 \cup 4$.

Obviamente, los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ pueden unificarse para que cualquiera de ellos contenga toda la información de los modelos originales de Yano y Rachamadugu (1991) y Scholl *et al.* (1998), relativos al *MMSP-W*. Para ello, debe añadirse el conjunto de restricciones siguiente, que vincula los instantes de inicio de las operaciones absolutos con los relativos:

$$s_{k,t} - \hat{s}_{k,t} = \big(t + k - 2\big)c \qquad k = 1, \cdots, |K|; t = 1, \cdots, T \tag{3.24}$$

3.2.3. Comparativa entre Modelos

Resumidamente, en la tabla 3.1, se establecen las diferencias entre los modelos de la literatura ($M1$ y $M2$), los de referencia ($M3$, $M4$ y $M4'$) y los propuestos en este capítulo ($M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$). Para su distinción se emplean las siguientes características: (1) función objetivo; (2) variables asociadas a los instantes de inicio de las operaciones (escalas absoluta, $s_{k,t}$, y relativa, $\hat{s}_{k,t}$); (3) variables asociadas a los tiempos de proceso completados; (4) tamaño de la ventana temporal para la última operación en cualquier estación ($t = T, \forall k \in K$); (5) rango del número de procesadores homogéneos en una estación de trabajo; y (6) consideración de vínculos entre estaciones en serie.

	$M1$	$M2$	$M3$	$M4$	$M4'$	$M3 \cup 4$	$M4 \cup 3$
Función Objetivo	máx V	mín W	máx V	mín W	mín W	máx V / mín W	mín W / máx V
Instantes de incio	$s_{k,t}$	$\hat{s}_{k,t}$	$s_{k,t}$	$\hat{s}_{k,t}$	$\hat{s}_{k,t}$	$s_{k,t}$	$\hat{s}_{k,t}$
Variables proceso	$v_{k,t}$	$w_{k,t}$	$v_{k,t}$	$w_{k,t}$	$w_{k,t}$	$v_{k,t}$, $w_{k,t}$	$v_{k,t}$, $w_{k,t}$
Ventana temporal[3]	$l_k \forall k$	$c\ \forall k$	$l_k \forall k$	$l_k \forall k$	$l_k \forall k$	$l_k \forall k$	$l_k \forall k$
Rango para b_k	$b_k \geqslant 1$	$b_k = 1$	$b_k \geqslant 1$	$b_k = 1$	$b_k \geqslant 1$	$b_k \geqslant 1$	$b_k \geqslant 1$
Vínculos estaciones	No	No	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 3.1: Comparativa de los modelos de la literatura ($M1$, $M2$), los modelos de referencia ($M3$, $M4$, $M4'$) y los propuestos en este capítulo ($M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$).

Como puede apreciarse en la tabla 3.1, las principales diferencias entre los modelos son:

- Los Modelos $M1$, $M3$ y $M3 \cup 4$ utilizan una escala de tiempos de inicio absoluta, mientras que los modelos $M2$, $M4$, $M4'$ y $M4 \cup 3$ utilizan una escala relativa.
- En los modelos $M1$ y $M3$ se utilizan como variables de decisión los tiempos de proceso (a actividad normal), $v_{k,t}$, aplicados por cada procesador homogéneo de las estaciones ($\forall k \in K$), a las unidades de producto ($\forall t \in T$), secuenciadas en la línea. En cambio, los modelos $M2$, $M4$ y $M4'$, utilizan como variables de decisión las sobrecargas, $w_{k,t}$, generadas en cada procesador homogéneo, por las unidades de producto ($\forall t \in T$) secuenciadas en las estaciones de trabajo ($\forall k \in K$). Los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, tienen ambas variables de decisión.
- Todos los modelos, exceptuando el modelo $M2$, permiten que todas las unidades de producto permanezcan, como máximo, el tiempo de la ventana temporal (l_k) en todas las estaciones. Sin embargo, en el modelo $M2$, dicho tiempo no se concede a la última unidad de producto.
- Todos los modelos, excepto el $M2$ y $M4$, permiten la existencia de más de un procesador homogéneo en cada estación de trabajo.
- Los modelos de la literatura $M1$ y $M2$ no consideran vínculos entre estaciones.

[3]Sólo para la última unidad de la secuencia ($t = T$), para el resto de unidades todas las estaciones disponen de un tiempo máximo igual a la ventana temporal ($l_k, \forall k$).

3.3. Un Ejemplo Ilustrativo

Para ilustrar las diferencias entre los modelos de la literatura ($M1$ y $M2$) y los propuestos en este capítulo (Sección 3.2), se presenta el siguiente ejemplo.

> Se dispone de seis unidades de producto ($T = 6$), de las cuales tres son de tipo A, una es de tipo B y dos de tipo C. Dichas unidades deben ser procesadas, secuencialmente, en tres estaciones de trabajo consecutivas ($|K| = 3$) con diferente número de procesadores homogéneos (b_k). Los tiempos de proceso, por procesador homogéneo (considerando una actividad normal), para cada tipo de unidad de producto (A, B y C), en cada estación de trabajo (m_1, m_2 y m_3), son los que aparecen en la tabla 3.2.
>
> Además, el tiempo de ciclo y de ventana temporal, concedido a los procesadores de las estaciones para que puedan trabajar sobre una unidad de producto, es de 4 ($c = 4\ s$) y 6 segundos ($l_k = 6\ s$), respectivamente, para todas las estaciones.

	$A(d_A = 3)$	$B(d_B = 1)$	$C(d_C = 2)$	b_k
m_1	5	4	3	1
m_2	5	4	4	2
m_3	4	3	5	1
Total	19 ($V_0(A) = 57$)	15 ($V_0(B) = 15$)	16 ($V_0(C) = 32$)	$V_0 = 104$

Tabla 3.2: Ejemplo. Número de procesadores por estación (b_k) y tiempos de proceso (en segundos), a actividad normal, requeridos por unidad de producto y procesador en cada estación ($p_{i,k}$).

En la figura 3.1 se representan, por medio de un diagrama de Gantt, las soluciones óptimas obtenidas, para el ejemplo, a partir de los modelos $M1$ (diagrama superior) y $M3 \cup 4$ (diagrama inferior). A la vista de dichos diagramas se puede concluir lo siguiente:

1. Ambos modelos ofrecen, para el ejemplo, la misma secuencia óptima de productos: C_1-A_1-C_2-A_2-B_1-A_3.
2. El Modelo $M1$ ofrece un trabajo total completado de $V = 102$ unidades de tiempo y una sobrecarga total generada de $W = 2$ unidades de tiempo. Esta sobrecarga se concentra en la estación m_2, donde se interrumpe el proceso de la unidad A_1, por parte de los dos procesadores asignados a dicha estación. En caso de no desear dicha interrupción, sería necesario incrementar la actividad de los procesadores en un $20\,\%$ cada uno, o bien, incorporar eventualmente un procesador adicional para esta operación.

3. La solución ofrecida por $M1$ viola la condición de los vínculos entre estaciones consecutivas. En concreto, la transferencia de las unidades A_1, A_2 y A_3, desde m_1 a m_2, y de la unidad A_3, desde m_2 a m_3, no cumple la hipótesis de que una unidad no puede pasar a la siguiente estación hasta que ésta quede liberada o se haya finalizado el trabajo, de dicha unidad de producto, en la estación anterior.

4. El modelo $M3 \cup 4$ ofrece una solución coherente en cuanto a los vínculos entre estaciones en serie. Dicha solución, representa un trabajo total completado de $V = 101$ unidades de tiempo y una sobrecarga generada de $W = 3$ unidades de tiempo. Esta sobrecarga, se concentra en las estaciones m_1 (1 unidad) y m_2 (dos unidades), debido a los productos A_1 y A_3, respectivamente. En este caso, los procesadores de las estaciones afectadas deberían interrumpir las operaciones mencionadas, incrementar, eventualmente, su actividad un $25\,\%$ o requerir la asistencia de procesadores adicionales.

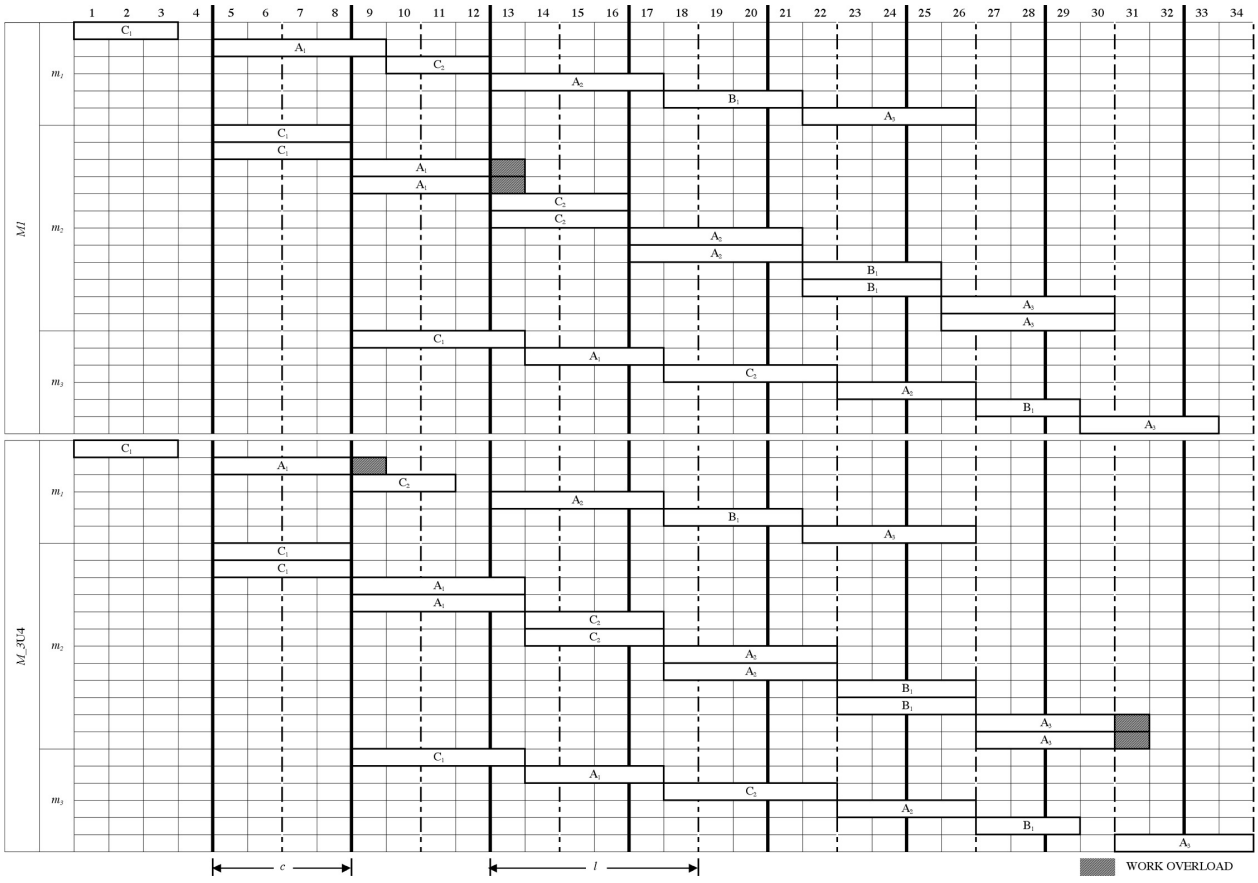


Figura 3.1: Diagrama de Gantt de las soluciones óptimas obtenidas con los modelos $M1$ (diagrama superior) y $M3 \cup 4$ (diagrama inferior).

Por otra parte, en la figura 3.2, se presentan, mediante un diagrama de Gantt, las soluciones ofrecidas por los modelos $M2$ (diagrama superior) y $M4 \cup 3$ (diagrama inferior).

A partir de las soluciones obtenidas, se puede concluir:

1. La secuencia óptima ofrecida por ambos modelos es diferente: A_1-A_2-C_1-B_1-C_2-A_3 para $M2$; C_1-B_1-A_1-C_2-A_2-A_3 para $M4 \cup 3$.

2. El Modelo $M2$ viola las restricciones relativas a los vínculos entre estaciones, en la transferencia de las unidades A_1, A_2, C_1 y B_1, de la estación m_1 hasta la estación m_2. Además, el trabajo completado es de $V = 96$ unidades de tiempo y la sobrecarga total, repartida entre las tres estaciones, es de $W = 8$ unidades de tiempo.

3. El modelo $M4 \cup 3$ ofrece una solución que respeta todos los vínculos entre estaciones. El trabajo completado es de $V = 101$ unidades de tiempo y, por tanto, la sobrecarga es $W = 3$. Esta sobrecarga se concentra en las estaciones m_1 y m_2, en las unidades A_2 y A_3, respectivamente.

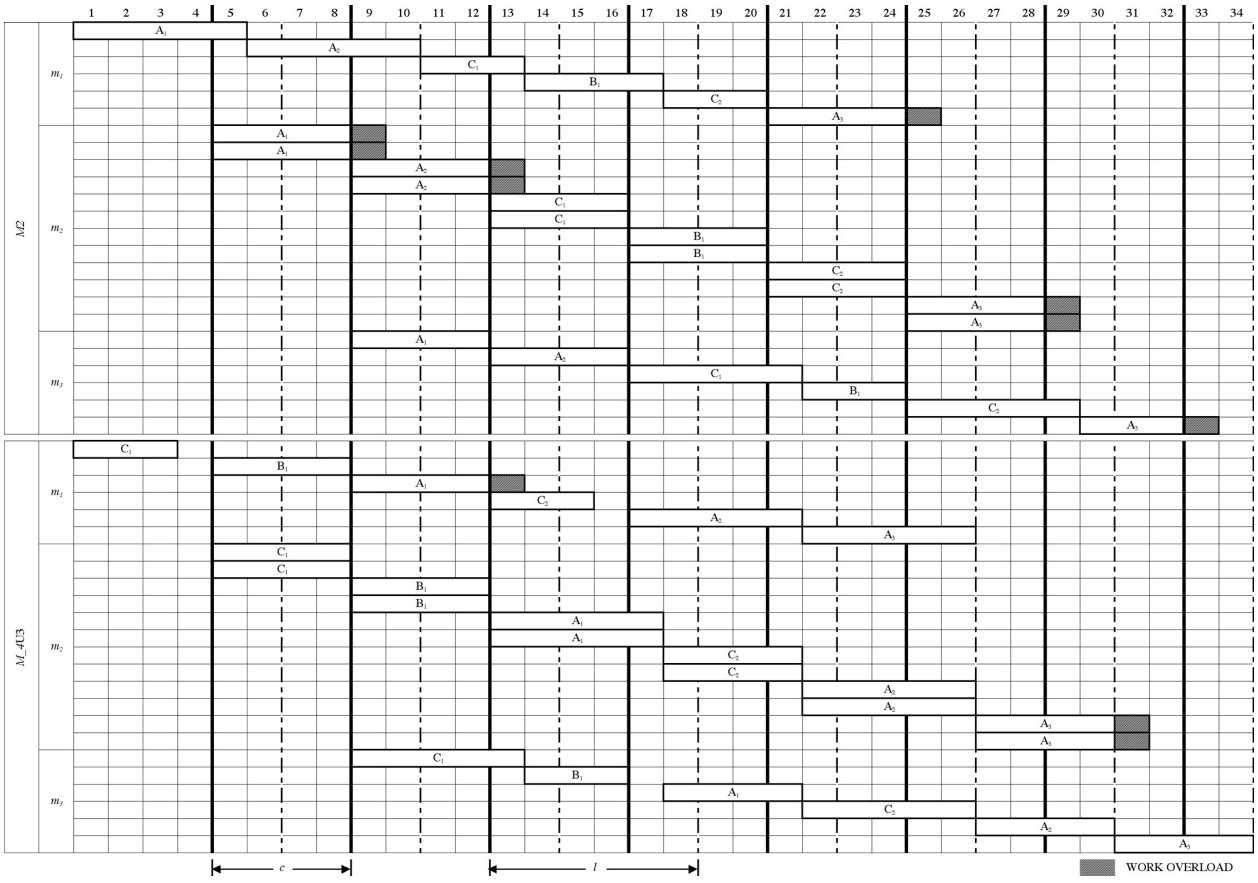


Figura 3.2: Diagrama de Gantt de las soluciones óptimas obtenidas con los modelos $M2$ (diagrama superior considerando varios procesadores) y $M4 \cup 3$ (diagrama inferior).

Nótese que las soluciones ofrecidas por los modelos propuestos, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, aunque con secuencias distintas, son equivalentes.

Finalmente, a modo de resumen, se presentan en la siguiente tabla (ver tabla 3.3) los resultados obtenidos por los cuatro modelos.

	V	W	$w(m_1)$	$w(m_2)$	$w(m_3)$	$s_{\|K\|,T} + v_{\|K\|,T}$[4]
$M1$	102	2	0	2	0	33
$M3 \cup 4$	101	3	1	2	0	34
$M2$	96	8	1	6	1	32
$M4 \cup 3$	101	3	1	2	0	34

Tabla 3.3: Soluciones óptimas ofrecidas por los modelos $M1$, $M2$[5], $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, para el ejemplo.

3.4. Experiencia Computacional

Con el fin de evaluar el comportamiento de los modelos propuestos en este capítulo ($M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$), se presenta la experiencia computacional realizada. Esta experiencia se compone de dos experimentos, en los que se utilizan ejemplares de datos distintos.

El primer experimento consiste en una explotación de prueba de los modelos, en la que se utilizan ejemplares de datos de la literatura. Por otro lado, el segundo, consiste en un caso de estudio en el que se utiliza un conjunto de datos de la planta de motores de Nissan en Barcelona. Este conjunto de datos, llamado NISSAN-9ENG, se utilizará a lo largo de todo el desarrollo de la tesis, pues a partir de estos ejemplares se evaluarán cada una de la variantes estudiadas.

Además, a partir de los resultados obtenidos en el segundo experimento, se realiza un análisis de la distribución de la sobrecarga y se estudian diferentes situaciones para evaluar posibles inversiones en proyectos de mejora del proceso y del diseño del producto. Estos proyectos, sea cual sea su objetivo, deben ir orientados a reducir dicha sobrecarga a corto, medio y largo plazo.

A continuación se presentan los datos utilizados en cada experimento, así como los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

[4] Instante de finalización de la última unidad de producto en la última estación. Es equivalente a la medida de eficiencia C_{max} de los problemas Flow-Shop.

[5] Las soluciones de $M1$ y $M2$ violan los vínculos entre estaciones consecutivas.

3.4.1. Experiencia Computacional con Instancias de la Literatura

Para la explotación de prueba de $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ se han empleado 225 ejemplares de la literatura (similares a los presentes en Bautista y Cano, 2008), cuyas características principales son:

(a) Cada uno de estos 225 ejemplares de datos, presenta 4 tipos de productos ($d_1, ..., d_4$) y 4 estaciones de trabajo consecutivas ($m_1, ..., m_4$).

(b) Se consideran 45 planes o programas de producción[6] (ver tabla 3.4).

(c) Se consideran 5 estructuras de tiempos de proceso de las unidades de producto en las estaciones de trabajo (ver tabla 3.5).

(d) Cada ejemplar se construye mediante la combinación de un programa de producción (b) y una estructura de tiempos (c).

(e) Se considera un tiempo de ciclo, común a todas las estaciones y todos los ejemplares de datos, de $c = 100$ unidades de tiempo.

(f) La ventana temporal depende del ejemplar de datos seleccionado en cada caso (ver tabla 3.5).

(g) Todos los ejemplares de datos, presentan un único procesador homogéneo, en todas las estaciones de trabajo.

i	*Bloque 1*				*Bloque 2*						*Bloque 3*							*Bloque 4*			
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	P_{16}	P_{17}	P_{18}	P_{19}	P_{20}	P_{21}
d_1	13	1	1	1	7	7	7	1	1	1	5	5	5	3	3	3	4	5	5	5	1
d_2	1	13	1	1	7	1	1	7	7	1	5	3	3	5	3	3	4	5	5	1	5
d_3	1	1	13	1	1	7	1	7	1	7	3	5	3	5	5	4	4	5	1	5	5
d_4	1	1	1	13	1	1	7	1	7	7	3	3	5	3	5	4	4	1	5	5	5

i	*Bloque 5*																								
	P_{22}	P_{23}	P_{24}	P_{25}	P_{26}	P_{27}	P_{28}	P_{29}	P_{30}	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}	P_{35}	P_{36}	P_{37}	P_{38}	P_{39}	P_{40}	P_{41}	P_{42}	P_{43}	P_{44}	P_{45}
d_1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	7	7	7	7	7	7
d_2	3	3	5	5	7	7	1	1	5	5	7	7	1	1	3	3	7	7	1	1	3	3	5	5
d_3	5	7	3	7	3	5	5	7	1	7	1	5	3	7	1	7	1	3	3	5	1	5	1	3
d_4	7	5	7	3	5	3	7	5	7	1	5	1	7	3	7	1	3	1	5	3	5	1	3	1

Tabla 3.4: Planes de producción ($P_1, \ldots, P_{45}$) agrupados en cinco bloques ($B1, \ldots, B2$).

[6]Composiciones distintas de la mezcla o mix de producción, es decir, diferentes combinaciones de cantidades de tipos de producto.

En la tabla 3.4 se presentan los 45 programas de producción, utilizados en esta experiencia computacional, agrupados en 5 bloques. El $B1$ se caracteriza por tener un producto con presencia mayoritaria en el mix[7]. En el $B2$, la mitad de los productos tienen una presencia mayoritaria y, la otra mitad, una presencia minoritaria en el mix. Por su parte, el $B3$ presenta 7 planes de producción con una presencia similar de todos los tipos de productos. En cambio, al contrario de lo que ocurre en el primer bloque, el $B4$ está formado por planes de producción en los que un producto destaca por tener una presencia minoritaria. Finalmente, el $B5$ recoge 24 planes de producción en los que la cantidad de cada uno de los tipos de producto es escalonada.

i	*Estructura 1*				*Estructura 2*				*Estructura 3*				*Estructura 4*				*Estructura 5*			
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_1	m_2	m_3	m_4	m_1	m_2	m_3	m_4	m_1	m_2	m_3	m_4	m_1	m_2	m_3	m_4
p_1	92	103	101	95	91	120	90	100	111	120	85	82	113	119	115	116	115	99	104	96
p_2	97	98	105	104	80	105	113	107	114	113	100	94	114	113	112	118	104	119	100	102
p_3	103	104	99	96	107	88	117	86	83	85	115	119	82	85	84	87	89	98	114	87
p_4	108	95	95	105	114	87	100	114	98	87	110	115	95	87	94	81	95	87	85	118
l_k	108	105	106	106	115	120	120	115	115	120	115	120	115	120	115	120	115	120	115	118
b_k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 3.5: Estructuras de tiempos de proceso ($E1, \ldots, E5$) por tipo de producto ($p_1, \ldots, p_4$) y estación ($m_1, \ldots, m_4$).

Por otra parte, en la tabla 3.5 se muestran las 5 estructuras de tiempos de proceso consideradas. En concreto, la $E1$ presenta tiempos de proceso muy similares, entre todos los tipos de producto, y cercanos al tiempo de ciclo. Por el contrario, la $E2$ presenta productos con tiempos de proceso lejanos al tiempo de ciclo. Por otro lado, la $E3$ presenta una situación de desequilibrio entre estaciones y productos, pues la mitad de los productos presentan una alta carga de trabajo[8], en las primeras estaciones de trabajo y, la otra mitad, en las últimas estaciones. La $E4$ contiene dos productos que pueden ocasionar sobrecarga en todas las estaciones de trabajo ya que, dichos productos, presentan una alta carga de trabajo en todas las estaciones y, por el contrario, la otra mitad presenta una carga inferior al ciclo. Finalmente, la $E5$ presenta una situación en la que cada tipo de producto tiene un tiempo de proceso, cercano a la ventana temporal, en una estación diferente.

Para obtener las soluciones óptimas de los 225 ejemplares de datos, a partir de los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, se ha utilizado el solucionador de programación matemática CPLEX V11.0 (con licencia de un sólo procesador) en un ordenador MacPro con CPU Intel Xeon 3 GHz y 2 Gb de RAM en sistema operativo Windows XP, sin ningún límite de tiempo de CPU. Los tiempos de CPU, mínimo, máximo y medio (ver resultados completos en tabla B.1 de anexo B), así como los valores de las soluciones óptimas, obtenidas mediante los dos modelos, se recogen en las tablas 3.6 y 3.7.

[7]Mezcla de tipos de producto.

[8]Tiempos de proceso superiores al tiempo de ciclo.

	$M3 \cup 4$			$M4 \cup 3$				$M3 \cup 4$			$M4 \cup 3$		
	$CPU_{\text{mín}}$	$CPU_{\text{máx}}$	$\overline{CPU}$	$CPU_{\text{mín}}$	$CPU_{\text{máx}}$	$\overline{CPU}$		$CPU_{\text{mín}}$	$CPU_{\text{máx}}$	$\overline{CPU}$	$CPU_{\text{mín}}$	$CPU_{\text{máx}}$	$\overline{CPU}$
$B1$	0.0	1.2	0.3	0.0	1.5	0.4	$E1$	0.0	159.7	28.7	0.0	301.3	46.9
$B2$	0.0	92.1	15.7	0.0	173.9	23.3	$E2$	0.1	92.0	14.0	0.1	129.7	16.5
$B3$	3.9	1336.7	111.1	5.1	2533.2	335.7	$E3$	0.1	91.3	15.7	0.1	180.3	32.2
$B4$	3.5	55.4	18.9	6.6	111.5	35.2	$E4$	0.0	1336.7	88.4	0.0	2533.2	288.5
$B5$	0.1	258.3	22.2	0.1	697.7	43.5	$E5$	0.2	108.5	17.7	0.2	126.4	24.4

Tabla 3.6: Tiempos de CPU máximo, mínimo y medio (en segundos), por bloques ($B1, \ldots, B5$) y estructuras de tiempos de proceso ($E1, \ldots, E5$), utilizados por CPLEX para resolver los 225 ejemplares con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$.

En base a los resultados obtenidos, se puede destacar que:

(1) Se alcanzan las soluciones óptimas para los 225 ejemplares de datos.

(2) En promedio, el solucionador CPLEX, utiliza menos tiempo de CPU cuando se lanza el modelo $M3 \cup 4$, tanto en el conjunto de bloques como en el de estructuras:

- $M3 \cup 4$: $\overline{CPU}_{Bloques} = 33.6\ s$; $\overline{CPU}_{Estructuras} = 32.9\ s$.
- $M4 \cup 3$: $\overline{CPU}_{Bloques} = 87.6\ s$; $\overline{CPU}_{Estructuras} = 81.7\ s$.

(3) Respecto a los tiempos de CPU por bloques, el $B1$ es el que presenta el menor tiempo medio, con unos valores de $0.3\ s$ y $0.4\ s$, para $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, respectivamente. Por el contrario, $B3$ es el bloque que presenta mayores tiempos de CPU, con unos valores medios de $111.1\ s$ y $335.7\ s$, para cada uno de los modelos. Esto, permite inferir que son más fáciles de resolver aquellos ejemplares asociados a programas de producción con presencia mayoritaria de uno de sus productos. Mientras que, por el lado opuesto, son más difíciles de resolver los ejemplares con presencia similar de todos los productos en el mix.

(4) Por estructuras, la $E4$ es la que presenta el mayor tiempo medio para ambos modelos, $88.4\ s$ y $288.5\ s$, respectivamente, mientras que el resto de estructuras requieren, en promedio, tiempos similares, pero muy inferiores a $E4$. Esto indica que son más difíciles de resolver aquellos ejemplares cuyo mix de productos resulta de la combinación equilibrada de dos familias de productos, una de ellas con alta carga de trabajo en todas las estaciones y la otra con baja carga de trabajo en todas las estaciones.

Ejemplar	V_0	W	*Ejemplar*	V_0	W	*Ejemplar*	V_0	W	*Ejemplar*	V_0	W	*Ejemplar*	V_0	W
1/1	6292	40	10/1	6430	68	19/1	6392	33	28/1	6408	46	37/1	6384	48
1/2	6431	230	10/2	6497	225	19/2	6503	150	28/2	6503	175	37/2	6421	116
1/3	6407	369	10/3	6503	367	19/3	6547	217	28/3	6495	265	37/3	6477	235
1/4	7171	710	10/4	5785	80	19/4	6723	415	28/4	6035	166	37/4	6409	326
1/5	6580	211	10/5	6250	42	19/5	6508	151	28/5	6302	64	37/5	6446	132
2/1	6448	100	11/1	6390	37	20/1	6384	31	29/1	6406	48	38/1	6394	43
2/2	6479	282	11/2	6469	132	20/2	6475	114	29/2	6469	158	38/2	6483	179
2/3	6683	339	11/3	6531	215	20/3	6471	221	29/3	6479	283	38/3	6569	263
2/4	7099	638	11/4	6685	415	20/4	6247	252	29/4	5997	166	38/4	6923	510
2/5	6712	276	11/5	6514	121	20/5	6360	68	29/5	6308	56	38/5	6588	185
3/1	6424	81	12/1	6386	37	21/1	6436	56	30/1	6416	55	39/1	6392	47
3/2	6395	270	12/2	6455	112	21/2	6491	193	30/2	6531	178	39/2	6449	168
3/3	6455	421	12/3	6493	221	21/3	6563	277	30/3	6571	214	39/3	6553	257
3/4	5671	80	12/4	6447	326	21/4	6223	228	30/4	6511	314	39/4	6885	509
3/5	6268	166	12/5	6440	95	21/5	6404	106	30/5	6450	155	39/5	6594	194
4/1	6436	143	13/1	6388	29	22/1	6434	63	31/1	6410	52	40/1	6362	22
4/2	6599	324	13/2	6489	122	22/2	6511	213	31/2	6429	153	40/2	6481	104
4/3	6551	313	13/3	6509	207	22/3	6541	311	31/3	6523	245	40/3	6463	199
4/4	5899	80	13/4	6485	326	22/4	6023	154	31/4	6397	314	40/4	6497	338
4/5	6232	212	13/5	6434	95	22/5	6324	82	31/5	6468	148	40/5	6412	103
5/1	6370	46	14/1	6412	45	23/1	6432	55	32/1	6418	53	41/1	6360	34
5/2	6455	200	14/2	6463	153	23/2	6477	197	32/2	6511	187	41/2	6447	92
5/3	6545	345	14/3	6539	231	23/3	6525	329	32/3	6593	235	41/3	6447	213
5/4	7135	674	14/4	6435	314	23/4	5985	154	32/4	6711	403	41/4	6459	338
5/5	6646	222	14/5	6462	103	23/5	6330	67	32/5	6530	176	41/5	6418	107
6/1	6358	46	15/1	6410	40	24/1	6438	67	33/1	6414	53	42/1	6366	22
6/2	6413	100	15/2	6483	147	24/2	6525	205	33/2	6443	174	42/2	6495	137
6/3	6431	227	15/3	6517	239	24/3	6579	259	33/3	6561	243	42/3	6501	211
6/4	6421	338	15/4	6235	240	24/4	6261	228	33/4	6635	403	42/4	6735	427
6/5	6424	136	15/5	6382	70	24/5	6398	128	33/5	6542	171	42/5	6486	142
7/1	6364	14	16/1	5605	32	25/1	6434	56	34/1	6386	25	43/1	6362	44
7/2	6515	151	16/2	5670	117	25/2	6457	190	34/2	6509	141	43/2	6427	116
7/3	6479	185	16/3	5705	196	25/3	6547	295	34/3	6487	208	43/3	6469	232
7/4	6535	338	16/4	5540	240	25/4	6185	228	34/4	6285	252	43/4	6659	427
7/5	6406	143	16/5	5609	65	25/5	6410	103	34/5	6354	91	43/5	6498	151
8/1	6436	61	17/1	6400	37	26/1	6440	63	35/1	6382	41	44/1	6368	34
8/2	6437	199	17/2	6476	133	26/2	6505	206	35/2	6441	117	44/2	6475	163
8/3	6569	279	17/3	6524	219	26/3	6601	243	35/3	6455	235	44/3	6523	271
8/4	6385	302	17/4	6460	320	26/4	6461	302	35/4	6209	252	44/4	6935	522
8/5	6490	177	17/5	6448	84	26/5	6478	152	35/5	6366	86	44/5	6566	169
9/1	6442	81	18/1	6388	45	27/1	6438	58	36/1	6390	29	45/1	6366	43
9/2	6539	218	18/2	6435	136	27/2	6471	200	36/2	6523	152	45/2	6441	149
9/3	6617	232	18/3	6515	229	27/3	6585	261	36/3	6525	196	45/3	6507	265
9/4	6499	302	18/4	6647	415	27/4	6423	302	36/4	6523	326	45/4	6897	521
9/5	6472	175	18/5	6520	158	27/5	6484	137	36/5	6428	146	45/5	6572	182

Tabla 3.7: Soluciones óptimas obtenidas con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ para los 225 ejemplares de la literatura. Cada ejemplar está representado por los números de su programa de producción y su estructura de tiempos, separados por '/'. Los valores de V_0 y W representan el trabajo total requerido y la sobrecarga total generada, respectivamente. Obviamente, el trabajo total completado puede calcularse como $V = V_0 - W$.

3.4.2. Caso de Estudio de la Planta de Motores de Nissan en Barcelona

Siguiendo el propósito de esta tesis, de analizar la validez de los modelos propuestos con ejemplares de dimensiones industriales, se ha seleccionado un proceso de fabricación en línea, perteneciente a la planta de Motores que Nissan Spanish Industrial Operations (*NSIO*) tiene localizada en Barcelona (España).

Los datos seleccionados pertenecen a una línea compuesta por 21 módulos o estaciones de trabajo, distribuidas en serie, en la que se montan 9 tipos de motores ($p_1, ..., p_9$) con diferentes características. Los tres primeros (p_1, p_2, p_3) se incorporan a vehículos 4×4, los modelos p_4 y p_5 van destinados a furgones y los últimos cuatro tipos de motores ($p_6, ..., p_9$) se incorporan sobre vehículos comerciales (camiones) de medio tonelaje.

El número de tareas elementales para el montaje de cualquiera de los motores es, aproximadamente, de 380 tareas. Dichas tareas se agruparon en 140 operaciones, a partir de las cuales se realizó el equilibrado de la línea, considerando los tiempos de proceso promedios para el mix de producción con idéntica presencia de los 9 tipos de motores. El equilibrado realizado, teniendo en cuenta las restricciones temporales y espaciales, dio como resultado las 21 estaciones, $|K| = 21$, mencionadas anteriormente y recogidas en PROTHIUS - Cátedra Organización Industrial, www.prothius.com/TSALBP (2007) (ver detalles en anexo A).

Una vez determinada la asignación de las operaciones a las estaciones de trabajo, se procedió al cálculo de los tiempos de proceso de cada tipo de motor en cada uno de los módulos o estaciones, $p_{i,k}$ ($k = 1, \ldots, 21$, $i = 1, \ldots, 9$). Estos datos se recogen en la tabla 3.8.

i	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}	m_{14}	m_{15}	m_{16}	m_{17}	m_{18}	m_{19}	m_{20}	m_{21}
p_1	104	103	165	166	111	126	97	100	179	178	161	96	99	147	163	163	173	176	162	164	177
p_2	100	103	156	175	114	121	96	97	174	172	152	106	101	155	152	185	179	167	150	161	161
p_3	97	105	164	172	114	122	96	95	173	172	168	105	102	142	156	183	178	181	152	157	154
p_4	92	107	161	167	115	124	93	106	178	177	167	97	101	154	152	178	169	180	152	159	168
p_5	100	101	148	168	117	127	96	94	178	178	167	101	99	146	153	169	173	172	160	162	172
p_6	94	108	156	167	117	130	89	102	171	177	166	100	101	143	152	173	178	173	151	160	170
p_7	103	106	154	168	115	120	94	103	177	175	172	96	96	154	154	172	174	173	155	162	167
p_8	109	102	164	156	111	121	101	102	171	173	157	104	102	153	156	182	175	168	148	158	149
p_9	101	110	155	173	111	134	92	100	174	175	177	96	99	155	156	171	175	184	167	157	169
l_k	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195
b_k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 3.8: Tiempos de proceso, $p_{i,k}$, de las operaciones de los nueve tipos de motores ($p_1, \ldots, p_9$) en las 21 estaciones de trabajo ($k = 1, \ldots, 21$).

Para el experimento, se considera un número idéntico de procesadores homogéneos en todas las estaciones de trabajo, $b_k = 1$. Este procesador homogéneo, es equivalente a un equipo de dos trabajadores con idénticas habilidades y herramientas y mismo requerimiento de equipos auxiliares.

Otros datos considerados y necesarios para el experimento son el tiempo de ciclo efectivo, que es $c = 175\ s$, y una ventana temporal, considerada idéntica para todas las estaciones de trabajo, igual a $l_k = 195\ s$. Esto último, permite una holgura, algo superior al 10 % sobre el tiempo de ciclo, para trabajar sobre una unidad de producto de la secuencia, en cualquier estación de trabajo.

Los tiempos considerados, $c = 175\ s$ y $l_k = 195\ s$, están asociados a una demanda total (T) de 270 motores, correspondiente a un único día de trabajo, dividido en dos turnos, con un tiempo efectivo de $13.125\ h$, una vez descontados los tiempos de descanso y de paradas reglamentarias. O bien, a una demanda total de 540 motores ($T = 540$) correspondiente a un programa de producción con un horizonte de dos días de trabajo.

Finalmente, para estudiar más exhaustivamente el comportamiento de los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, se emplean diferentes planes de producción (ver tabla 3.9). Así, una vez obtenidos los resultados, se podrá realizar un análisis de las repercusiones que las variaciones en el mix de producción tienen sobre la sobrecarga de trabajo de la línea de motores.

i	$Bloque-I$																					
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
p_1	30	30	10	40	40	50	20	20	70	10	10	24	37	37	24	30	30	60	10	20	60	20	10
p_2	30	30	10	40	40	50	20	20	70	10	10	23	37	37	23	30	30	60	10	20	60	20	10
p_3	30	30	10	40	40	50	20	20	70	10	10	23	36	36	23	30	30	60	10	20	60	20	10
p_4	30	45	60	15	60	30	75	30	15	105	15	45	35	45	55	35	55	30	90	15	15	90	30
p_5	30	45	60	15	60	30	75	30	15	105	15	45	35	45	55	35	55	30	90	15	15	90	30
p_6	30	23	30	30	8	15	15	38	8	8	53	28	23	18	23	28	18	8	15	45	15	8	45
p_7	30	23	30	30	8	15	15	38	8	8	53	28	23	18	23	28	18	8	15	45	15	8	45
p_8	30	22	30	30	7	15	15	37	7	7	52	27	22	17	22	27	17	7	15	45	15	7	45
p_9	30	22	30	30	7	15	15	37	7	7	52	27	22	17	22	27	17	7	15	45	15	7	45

i	$Bloque-II$																					
	#24	#25	#26	#27	#28	#29	#30	#31	#32	#33	#34	#35	#36	#37	#38	#39	#40	#41	#42	#43	#44	#45	#46
p_1	60	60	20	80	80	100	40	40	140	20	20	47	74	74	47	60	60	120	20	40	120	40	20
p_2	60	60	20	80	80	100	40	40	140	20	20	47	73	73	47	60	60	120	20	40	120	40	20
p_3	60	60	20	80	80	100	40	40	140	20	20	46	73	73	46	60	60	120	20	40	120	40	20
p_4	60	90	120	30	120	60	150	60	30	210	30	90	70	90	110	70	110	60	180	30	30	180	60
p_5	60	90	120	30	120	60	150	60	30	210	30	90	70	90	110	70	110	60	180	30	30	180	60
p_6	60	45	60	60	15	30	30	75	15	15	105	55	45	35	45	55	35	15	30	90	30	15	90
p_7	60	45	60	60	15	30	30	75	15	15	105	55	45	35	45	55	35	15	30	90	30	15	90
p_8	60	45	60	60	15	30	30	75	15	15	105	55	45	35	45	55	35	15	30	90	30	15	90
p_9	60	45	60	60	15	30	30	75	15	15	105	55	45	35	45	55	35	15	30	90	30	15	90

Tabla 3.9: Planes de producción (NISSAN-9ENG) correspondientes a un día de trabajo ($Bloque-I$) o a dos ($Bloque-II$).

Tal y como se aprecia en la tabla anterior, los ejemplares utilizados corresponden a planes de producción, con igual demanda total pero distinta mezcla de tipos de motores. En concreto:

(1) Se considera un conjunto E, de 46 planes de producción (ver tabla 3.9). Los ejemplares $\#1 - \#23$, agrupados en el $Bloque - I$, corresponden a una producción de $T = 270$ motores en un día efectivo de trabajo. Por otro lado, los ejemplares $\#24 - \#46$, agrupados en el $Bloque - II$, se corresponden a planes con un horizonte de dos días de fabricación ($T = 540$ motores).

(2) Los ejemplares $\#1$ y $\#24$ tienen una demanda idéntica para cada tipo de motor (30 y 60 motores de cada tipo, respectivamente).

(3) Los ejemplares comprendidos entre el $\#2$ y el $\#11$ (del $Bloque - I$) y del $\#25$ al $\#34$ (del $Bloque - II$) representan situaciones en las que la demanda, para dos de las tres familias de motores (4×4, furgones y camiones), es idéntica y, la demanda, de la familia restante, es minoritaria o mayoritaria.

(4) Los ejemplares $\#12 - \#17$ ($Bloque - I$) y $\#35 - \#40$ ($Bloque - II$) presentan demandas de las tres familias de productos similares, siguiendo una progresión aritmética.

(5) Los ejemplares $\#18 - \#23$ ($Bloque - I$) y $\#41 - \#46$ ($Bloque - II$) representan situaciones en las que la demanda de una de las familias de los productos es muy significativa y, además, la demanda de otra de las familias es poco significativa.

Al igual que el experimento anterior (Subsección 3.4.1), para el caso de estudio que nos ocupa, se utiliza el solucionador CPLEX V11.0 (con licencia de un sólo procesador) en un ordenador MacPro con CPU Intel Xeon 3 GHz y 2 Gb de RAM en sistema operativo Windows XP. Sin embargo, teniendo en cuenta las dimensiones de los ejemplares, en este caso, ambos modelos se explotan dos veces, limitando el tiempo de CPU a $3600\ s$ y a $7200\ s$, respectivamente.

En la tabla 3.10 se recogen los resultados obtenidos al ejecutar los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, con las limitaciones de tiempos de CPU anteriores. De ellos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

(1) Para un día de trabajo ($Bloque - I$), la situación en la que las demandas de las tres familias están más descompensadas (ejemplares $\#18$ a $\#23$) es la que ocasiona el peor valor medio de sobrecarga total generada ($\overline{W} = 597\ s$), independientemente del modelo utilizado (ver tablas B.2 y B.3 del anexo B). Por el contrario, las situaciones más favorables se producen cuando la demanda de los motores para la familia de camiones es claramente dominante sobre la demanda del resto de familias (furgones y 4×4) (ejemplar $\#11$ con una sobrecarga de $139\ s$ y ejemplar $\#23$ con una sobrecarga de $133\ s$).

(2) Para dos días de trabajo ($Bloque - II$), la situación es similar a la anterior. La peor situación promedio ($\overline{W} = 1{,}242\ s$) se da en los ejemplares $\#41$ a $\#46$, mientras que, las situaciones más favorables vuelven a corresponder a los ejemplares con demanda predominante de motores para camiones (ejemplar $\#34$ con $W = 258\ s$ y ejemplar $\#46$ con $W = 338\ s$).

$Bloque - I$							$Bloque - II$						
ϵ	V_0	$M3 \cup 4$		$M4 \cup 3$		$\overline{W}_{4\cup3}$	ϵ	V_0	$M3 \cup 4$		$M4 \cup 3$		$\overline{W}_{4\cup3}$
		$W_{3600\ s}$	$W_{7200\ s}$	$W_{3600\ s}$	$W_{7200\ s}$				$W_{3600\ s}$	$W_{7200\ s}$	$W_{3600\ s}$	$W_{7200\ s}$	
$\#1$	807420	266	255	228	228	228	$\#24$	1614840	775	762	690	628	628
$\#2$	807370	411	409	384	384		$\#25$	1614765	1081	965	921	921	
$\#3$	807260	464	449	446	425		$\#26$	1614520	1052	1015	969	969	
$\#4$	807500	379	379	381	381		$\#27$	1615000	1024	960	833	717	
$\#5$	807375	714	702	667	654		$\#28$	1614775	1591	1586	1473	1473	
$\#6$	807505	547	541	490	477	538	$\#29$	1615010	1308	1266	1605	1134	1158
$\#7$	807265	759	743	743	728		$\#30$	1614530	1642	1634	1587	1587	
$\#8$	807365	199	175	197	197		$\#31$	1614755	622	547	556	424	
$\#9$	807615	805	805	794	782		$\#32$	1615255	1760	1752	1624	1624	
$\#10$	807135	1208*	1208*	1208*	1208*		$\#33$	1614295	2475*	2475*	2475*	2475*	
$\#11$	807360	155	140	139	139		$\#34$	1614745	543	429	309	258	
$\#12$	807360	362	314	326	326		$\#35$	1614712	903	860	902	720	
$\#13$	807427	353	353	384	384		$\#36$	1614890	993	904	923	817	
$\#14$	807402	460	452	442	442	399	$\#37$	1614840	1228	1113	1036	989	890
$\#15$	807335	517	497	459	452		$\#38$	1614662	1130	1119	1055	977	
$\#16$	807395	319	270	279	279		$\#39$	1614815	844	814	798	741	
$\#17$	807345	557	548	511	511		$\#40$	1614715	1295	1198	1182	1096	
$\#18$	807535	700	700	678	678		$\#41$	1615095	1622	1554	1466	1437	
$\#19$	807185	945*	945*	945*	945*		$\#42$	1614370	1968	1959	1950*	1950*	
$\#20$	807415	209	167	194	182	597	$\#43$	1614830	623	623	552	403	1242
$\#21$	807585	635	635	660	660		$\#44$	1615170	1582	1454	1390	1272	
$\#22$	807215	991	984	985	985		$\#45$	1614455	2087	2067	2057	2049	
$\#23$	807335	154	140	153	133		$\#46$	1614670	434	367	338	338	

Tabla 3.10: Sobrecarga (W) de los 46 ejemplares NISSAN-9ENG ($\epsilon = 1, \ldots, |\mathrm{E}|$) obtenida mediante CPLEX con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, con tiempos de ejecución de 3600 s y 7200 s; se representa, también, la sobrecarga promedio ($\overline{W}$) para las distintas situaciones del mix de producción propuestas y las soluciones óptimas (*).

(3) En cuanto a la calidad de las soluciones ofrecidas por ambos modelos, en base a la tabla 3.10, se aprecia cómo el modelo $M4 \cup 3$ mejora o empata, en 20 ejemplares del $Bloque - I$ y en 22 del $Bloque - II$, las soluciones de sobrecarga obtenidas por el modelo $M3 \cup 4$, con un tiempo límite de CPU de 1 h. Si este tiempo límite de CPU es de $2h$, la mejora de las soluciones por parte de $M4 \cup 3$ respecto a $M3 \cup 4$ se produce en 15 ejemplares del $Bloque - I$ y en todos los del $Bloque - II$.

(4) La peor situación en la que puede encontrarse la línea de motores, corresponde a una demanda predominante de motores para furgones, tanto para un día de trabajo (ejemplar $\#10$ con sobrecarga $1{,}028\ s$), como para dos días de trabajo (ejemplar $\#33$ con sobrecarga $2{,}475\ s$).

(5) La mejora media, en sobrecarga, de las soluciones de $M4\cup3$, respecto a las soluciones de $M3\cup4$, es del $4.38\,\%$ para el $Bloque-I$ y del $8.82\,\%$ para el $Bloque-II$, cuando $CPU_{Limit}=3600\ s$. Del mismo modo, cuando $CPU_{Limit}=7200\ s$, la mejora media de $M4\cup3$ frente a $M3\cup4$, en cuanto a sobrecarga, es del $1.32\,\%$ y del $11.91\,\%$ para ambos bloques, respectivamente (ver cálculos en tablas B.2 y B.3 del anexo B).

(6) Con la explotación del modelo $M4\cup3$, durante $1\ h$, se alcanzan las soluciones óptimas en cuatro ejemplares (el $\#10$ y $\#19$ del $Bloque-I$ y el $\#33$ y $\#42$ del $Bloque-II$). En el caso del modelo $M3\cup4$ no se alcanza el óptimo para el ejemplar $\#42$.

(7) La explotación de CPLEX se ha limitado a 1 y $2\ h$ por motivos prácticos. En efecto, ante una incidencia en la línea, en la que haya que re-programar la producción (por falta de algún componente o aparición de algún lote defectuoso o exceso de absentismo que obligue a re-asignar los puestos de trabajo) se desea obtener una solución en un tiempo aceptable, con el fin de poder reanudar las operaciones. Esto, tiene sentido, sobretodo, si se tiene en cuenta que una hora de parada, en la línea de montaje de nuestro caso de estudio, supone unas pérdidas de venta del producto final equivalentes a $82{,}286$ € ($4{,}000$ €/*motor* · (270 *motores/día* ÷ 13.125 *horas/día*) = $82{,}286$ €/ *hora*).

3.4.3. Análisis de la distribución de la Sobrecarga

Con el propósito de llevar a la práctica el concepto *KAIZEN*[9] de mejora continua, enfocado a la reducción de la sobrecarga mediante la mejora del proceso (mejora en las estaciones de trabajo) o del producto (mejora a través del diseño del producto), se establecen los mapas de distribución de sobrecarga, por estaciones y productos, ante diversas situaciones del mix de producción.

Para ello, a partir de una solución, S°, de $M3\cup4$ o $M4\cup3$, representada por los valores $x^{\circ}_{i,t}$ ($i=1,\ldots,|I|$, $t=1,\ldots,T$) de las variables de asignación y los valores $w^{\circ}_{k,t}$ ($k=1,\ldots,|K|$, $t=1,\ldots,T$) de las variables elementales de sobrecarga, se puede determinar:

$$w^{\circ}_{i,k}=\sum_{t=1}^{T} w^{\circ}_{k,t}\cdot x^{\circ}_{i,t} \qquad i=1,\ldots,|I|;k=1,\ldots,|K| \tag{3.25}$$

[9]Metodología de mejora del sistema empresarial, de origen japonés, que consiste en tener una mejor calidad y reducción de costes de producción con simples modificaciones diarias.

Donde $w^{\circ}_{i,k}$ representa la sobrecarga, asociada a cada tipo de producto en cada estación de trabajo, acumulada a lo largo de todo el tiempo de proceso de las unidades. Obviamente, estos valores pueden ser agregados para obtener las sobrecargas generadas, por cada tipo de producto (ecuación 3.26), y por cada estación de trabajo (ecuación 3.27):

$$W^{\circ}_{p}(i) = \sum_{k=1}^{|K|} w^{\circ}_{i,k} \qquad i = 1, \ldots, |I| \tag{3.26}$$

$$W^{\circ}_{m}(k) = \sum_{i=1}^{|I|} w^{\circ}_{i,k} \qquad k = 1, \ldots, |K| \tag{3.27}$$

Con el fin de realizar un breve análisis de la distribución de la sobrecarga en la línea de motores, se seleccionan tres ejemplares, del conjunto NISSAN-9ENG, correspondientes a una jornada de trabajo. Estos son: (1) el ejemplar #23, que corresponde al caso más favorable (mínima sobrecarga); (2) el ejemplar #1, que corresponde a la situación del mix completamente equilibrado; y (3) el ejemplar #10, que corresponde al caso más desfavorable (máxima sobrecarga). Así, a partir de la secuencia obtenida para cada uno de estos ejemplares de datos y en base a las ecuaciones anteriores (3.25)-(3.27), se obtienen los mapas de sobrecarga recogidos en la tabla 3.11.

Ejemplar #23	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	W°_{m}
m_{10}	5	-	1	27	-	33	3	18	13	100
m_{16}	-	4	3	-	1	2	-	3	4	17
m_{17}	-	-	3	-	-	-	-	-	1	4
m_{18}	3	-	-	-	-	1	-	-	8	12
W°_{p}	8	4	7	27	1	36	3	21	26	133

Ejemplar #1	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	W°_{m}
m_{9}	3	-	-	-	3	-	-	-	-	6
m_{10}	13	3	2	10	10	4	1	-	2	45
m_{16}	1	21	38	4	2	1	4	20	-	91
m_{17}	3	12	12	-	4	-	-	3	-	34
m_{18}	2	1	15	4	3	-	-	-	27	52
W°_{p}	22	37	67	18	22	5	5	23	29	228

Ejemplar #10	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	W°_{m}
m_{9}	38	10	11	233	264	-	13	-	-	569
m_{10}	21	2	26	220	174	15	1	10	8	477
m_{18}	-	1	13	94	26	10	-	-	18	162
W°_{p}	59	13	50	547	464	25	14	10	26	1208

Tabla 3.11: Mapas de sobrecarga, $w^{\circ}_{i,k}$, para el caso favorable, intermedio y desfavorable del conjunto NISSAN-9ENG.

A la vista de dichos mapas de sobrecarga, se observa que la sobrecarga se concentra en 5 de las 21 estaciones de trabajo (m_9, m_{10}, m_{16}, m_{17} y m_{18}) y, de forma muy significativa, en 2 de los 9 tipos de motores (p_4 y p_5). Por tanto, las acciones de mejora que se pueden llevar a la práctica son, al menos, las siguientes:

(1) A corto plazo, reforzar con recursos humanos las estaciones mencionadas para reducir las sobrecargas. Los operarios adicionales podrían estar asignados de manera fija a las estaciones que requieran refuerzo, o podrían actuar como operarios volantes (sin sitio fijo) entre dichas estaciones.

(2) A medio plazo, poner en marcha proyectos destinados a la mejora de procesos para reducir las sobrecargas en las estaciones donde aquellas se concentran.

(3) A largo plazo, poner en marcha proyectos destinados al rediseño de algunas partes de los motores p_4 y p_5, preservando o mejorando los niveles de fiabilidad exigidos, con el propósito de reducir los tiempos en las operaciones de montaje.

Obviamente, para llevar a la práctica las acciones de mejora anteriores, es preciso una justificación económica.

En el caso NISSAN-9ENG el Consolidated Operating Profit[10] es del $10\,\%$ de la ganancia que proporciona la venta de un motor. Por tanto, teniendo en cuenta que dicha ganancia es de $4{,}000$ €/*unidad*, la pérdida de un motor en la línea supone un coste de 400 €/*unidad*.

De esta manera, sabiendo que la ganancia obtenida al reducir la sobrecarga de la línea en $175\ s$ (tiempo de ciclo de la línea) equivale a esos 400 €, que el calendario laboral contiene 225 días laborales, que el tipo de interés considerado en proyectos de producción es del $4\,\%$ anual y que el plazo fijado para recuperar la inversión es de 2 años, podemos determinar las pérdidas monetarias que supone la sobrecarga de trabajo en la línea.

Así, ante las tres situaciones analizadas, la más favorable ($\#23$), la intermedia ($\#1$) y la más desfavorable ($\#10$) y considerando la sobrecarga generada, anualmente se obtiene una cantidad de trabajo no completado igual a $29{,}925\ s$ (133×225), $51{,}380\ s$ (228×225) y $271{,}800\ s$ (1208×225), respectivamente. Dichas sobrecargas, pueden traducirse en un número de motores perdidos al año de 171 unidades ($29{,}925 \div 175$), 293 y $1{,}553$ unidades, respectivamente. Por tanto, en términos monetarios, las pérdidas que supone la sobrecarga son de 68.4, 117.2 y 621.2 miles de € al año, para cada una de las situaciones analizadas, respectivamente.

[10] Valor que añade la línea al proceso de fabricación de un motor.

Para evitar estas pérdidas, se podrían llevar a cabo las siguientes tres acciones concretas para el plan de mejora:

(1) A corto plazo, se podrían contratar recursos humanos por un valor de, al menos, $68{,}400$ € (mínima pérdida), teniendo en cuenta que un equipo de dos trabajadores puede completar un trabajo total de $23{,}625$ s (135×175) en un único turno de trabajo.

(2) A medio plazo, se podrían mejorar las operaciones asignadas a las estaciones m_9, m_{10}, m_{16}, m_{17} y m_{18}. Para mejorar los tiempos de proceso de dichas operaciones, se pueden desarrollar proyectos de mejora de métodos y tiempos, financiados a un año, por valor de 65.8 ($68.4 \div 1.04$), 112.7 ($117.2 \div 1.04$) y 597.3 ($621.2 \div 1.04$) miles de €, dependiendo de la situación.

(3) A largo plazo, se podría mejorar el diseño de los motores (empezando por los motores p_4 y p_5). Para ello, se pueden desarrollar proyectos de mejora del producto (mejorando las operaciones de montaje), financiados a dos años, por un valor de 0.129 $((68.4 \div 1.04) + (68.4 \div 1.04^2))$, 0.221 y 1.172 millones de €, para el caso favorable, intermedio y desfavorable, respectivamente.

3.5. Conclusiones

A lo largo de este capítulo, se han presentado y unificado dos modelos para la secuenciación de productos, el $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, con el fin de minimizar la sobrecarga de trabajo o maximizar el trabajo completado en líneas de montaje con vínculos entre estaciones consecutivas. Dichos modelos son una combinación de los modelos $M3$ y $M4$ propuestos por Bautista y Suárez (2009) y Bautista y Cano (2011) y consideran, además, que puedan concurrir diversos procesadores en cada estación de la línea.

Los modelos presentados permiten obtener soluciones para el caso en que el procesamiento de las unidades, en las estaciones, se pueda interrumpir en cualquier instante comprendido entre el tiempo de ciclo y el tiempo marcado por la ventana temporal. Esta condición requiere de un sistema de control de las unidades en la línea, que permita dar a conocer el instante preciso en que una operación se debe reforzar o interrumpir.

A partir de los modelos propuestos, se ha realizado una experiencia computacional con 225 ejemplares de la literatura, comprobando que $M3 \cup 4$ ofrece mejores prestaciones, en tiempos de CPU, que $M4 \cup 3$, a la hora de alcanzar las soluciones óptimas mediante CPLEX.

De forma similar, se ha llevado a cabo un caso de estudio relativo a la planta de motores de Nissan en Barcelona, mediante 23 ejemplares representativos de un día de trabajo (a dos turnos) y otros 23 ejemplares correspondientes a dos días de trabajo. Este experimento ha permitido observar que el modelo $M4 \cup 3$ ofrece mejores resultados que el modelo $M3 \cup 4$, en cuanto a sobrecarga global, dando el mismo tiempo límite de CPU en las ejecuciones de ambos modelos.

A partir de los resultados obtenidos en el caso NISSAN-9ENG, se han analizado tres situaciones que se pueden dar en la línea de motores, relativas al mix de producción. Este análisis de la distribución de la sobrecarga ha evidenciado la concentración del trabajo no completado en determinados tipos de producto y determinadas estaciones de trabajo. Así, se ha podido realizar una evaluación de la rentabilidad de proyectos de inversión, para mejorar los procesos, con el propósito de reducir la sobrecarga.

En definitiva, gracias a los modelos propuestos se ha podido estudiar un caso de estudio perteneciente a un entorno industrial real, y se ha podido observar cómo la reducción de la sobrecarga mediante proyectos de mejora es factible tanto a corto, como medio y largo plazo. Además, estos modelos servirán como modelos de referencia para el resto del trabajo desarrollado a lo largo de esta tesis.

Capítulo 4

INCORPORACIÓN DEL CONCEPTO REGULARIDAD EN EL *MMSP-W*

4.1. Introducción

En vista de los resultados obtenidos con el análisis de los mapas de sobrecargas realizado anteriormente (Capítulo 3, Sección 3.4, Subsección 3.4.3), a lo largo de este capítulo, se adaptan los modelos anteriores ($M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$) por medio de la incorporación de conceptos propios de la ideología de gestión *JIT*.

En el capítulo anterior hemos visto cómo la sobrecarga de trabajo se concentraba en cinco estaciones de trabajo y, básicamente, debido a dos tipos de productos (ver tabla 3.11, página 61). Esta situación debe tenerse en cuenta a la hora de secuenciar pues, además de existir un desequilibrio de cargas de trabajo entre las estaciones, es posible, si se secuencian varios tipos de productos conflictivos consecutivamente, que los procesadores estén muy sobrecargados en determinados momentos. Por ello, a lo largo de este capítulo se enriquecerán los modelos propuestos en el capítulo anterior, con el propósito de conseguir un mayor acercamiento entre los modelos y la realidad de la planta de motores y evitar la concentración de sobre-esfuerzos o sobrecargas en momentos y productos determinados.

En concreto, los nuevos modelos favorecerán la regularidad en las secuencias de producción, además de considerar aspectos ya tenidos en cuenta, como son: (1) los vínculos entre estaciones en serie (Bautista y Cano, 2011; Bautista y Suárez, 2009); (2) la existencia de más de un procesador homogéneo en cada estación; y (3) la equivalencia entre la maximización del trabajo completado y la minimización de la sobrecarga.

En este caso, las secuencias de productos deben fijarse de forma que el trabajo requerido a todas las estaciones se distribuya homogéneamente a lo largo del tiempo, con el propósito de evitar sobre-esfuerzos no deseables para los recursos humanos y favorecer los principios de las ideologías de gestión *JIT* y *DS*. De esta manera, se intenta evitar que la mayor parte de la sobrecarga se dé en una única estación de trabajo, tal como ocurría con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ (ver subsección 3.4.3, página 60) y se combinan objetivos propios de dos problemas, la minimización de la sobrecarga (correspondiente al *MMSP-W*) y la regularidad de la producción (correspondiente al *PRVP*[1]).

Así, teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, en este capítulo se incluyen los siguientes puntos:

- Una discusión sobre la conveniencia de homogeneizar, a lo largo de la jornada laboral, el trabajo requerido y completado y la sobrecarga en las estaciones. Para ello, se estudia el nuevo problema resultante bajo diversos enfoques.
- Una propuesta de diversos modelos mono y multi-objetivo para el nuevo problema que considera la regularidad de la carga de trabajo.
- Una selección de modelos, que incorporan el concepto de regularidad de la carga de trabajo, para determinar la sobrecarga óptima de 225 instancias o ejemplares.
- Una aplicación, de los modelos propuestos, en la línea de motores de la planta de Nissan en Barcelona, objeto de este trabajo, considerando un conjunto de instancias que representan diversos escenarios para el mix de producción de motores.

Además, en este capítulo, al igual que en el anterior, para la resolución del problema se utiliza la programación matemática. No obstante, se emplea un solucionador distinto al solver CPLEX, utilizado en la anterior experiencia computacional. De este modo, podremos evaluar los resultados entre ambos solucionadores matemáticos (el Solver CPLEX V11.0 versus el LP Solver of Gurobi Optimizer v4.5.0).

Cabe destacar también, que al igual que en el capítulo anterior, el trabajo desarrollado en esta parte de la tesis ha dado lugar a la publicación de un artículo (Bautista, Cano y Alfaro, 2012f), dos capítulos de libro (Bautista, Alfaro y Cano, 2013b; Bautista, Cano y Alfaro, 2014f) y diferentes comunicaciones a congresos (Bautista, Alfaro y Cano, 2012a,b; Bautista, Cano y Alfaro, 2012d,e; Bautista, Cano, Alfaro y Batalla, 2013d).

[1]Product Rate Production Problem.

4.2. Regularidad del Trabajo en una Línea de Producción

La concentración de la sobrecarga en determinados instantes a lo largo de la jornada laboral es una característica, no deseable, que puede darse en algunas secuencias de productos.

Una forma de evitar el hecho anterior, consiste en programar secuencias de productos que cumplan la propiedad vinculada a la regularidad de la carga de trabajo a lo largo del tiempo. La consideración de dicha propiedad da lugar a un nuevo problema, cuyo objetivo consiste en minimizar la variación de las tasas de carga de trabajo, en todas las estaciones, durante la fabricación de los productos.

Hecha esta consideración general, se puede optar por diversos enfoques para conseguir evitar concentraciones excesivas de sobrecarga, tanto en las estaciones de trabajo, como en momentos concretos de la jornada laboral. Sirvan de ejemplo, los siguientes enfoques:

1. ***Trabajo requerido***. Este enfoque se basa en la obtención de secuencias de productos que cumplan la propiedad de ser regulares, en cuanto al tiempo acumulado del trabajo requerido en las estaciones de trabajo, en todas las posiciones de la secuencia de productos.

2. ***Trabajo completado***. Este enfoque se basa en la obtención de secuencias de productos en las que esté nivelado el tiempo acumulado del trabajo completado en las estaciones, en todas las posiciones de la secuencia de productos.

3. ***Sobrecarga de trabajo***. Este enfoque ofrece diferentes alternativas:

   (a) Nivelado del tiempo acumulado correspondiente a la sobrecarga de trabajo en las estaciones, en todas las posiciones de la secuencia de productos.

   (b) Minimización de la sobrecarga correspondiente al procesador más sobrecargado, cuando se han fabricado todas las unidades.

   (c) Minimización de la sobrecarga correspondiente a la posición de la secuencia que presenta mayor sobrecarga, cuando se han fabricado todas las unidades.

A continuación se detalla cada uno de los enfoques aquí mencionados.

4.2.1. Trabajo Requerido

Conocidas las cantidades de tipos de producto, d_i, y los tiempos de proceso de los diferentes tipos de producto en las diferentes estaciones de trabajo, $p_{i,k}$, se puede definir la tasa ideal del trabajo requerido para la estación k, $\dot{p}_k$ ($k = 1, \ldots, |K|$). Dicho tiempo medio del trabajo requerido en la estación de trabajo k por una unidad de producto, equivale al tiempo de proceso de una unidad ideal en la estación k y se determina como sigue:

$$\dot{p}_k = \frac{b_k}{T} \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot d_i \qquad k = 1, \ldots, |K| \tag{4.1}$$

En consecuencia, el trabajo total ideal requerido que debería completarse en la estación k cuando han pasado por ella t unidades de producto es:

$$P^{\star}_{k,t} = t \cdot \dot{p}_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.2}$$

Por otra parte, cuando han pasado por la *k-ésima* estación de trabajo un total de t unidades de producto, de las cuales $X_{i,t} = \sum_{\tau=1}^{t} x_{i,\tau}$ son de tipo i ($i = 1, ..., |I|$), el trabajo real que ha sido requerido, en total, en dicha estación es:

$$P_{k,t} = b_k \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot X_{i,t} = b_k \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \left(\sum_{\tau=1}^{t} x_{i,\tau} \right) \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.3}$$

Obviamente, la discrepancia o distancia entre el trabajo requerido real y el ideal en la estación k, cuando han pasado por ella t unidades de producto, es:

$$\delta_{k,t}(P) = P_{k,t} - P^{\star}_{k,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.4}$$

En tales condiciones, una forma posible de medir la no-regularidad del trabajo requerido, en el conjunto de estaciones de trabajo y en la jornada laboral, consiste en tener en cuenta el conjunto de discrepancias o distancias definidas en (4.4). Esto es:

$$\Delta_R(P) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{k=1}^{|K|} |\delta_{k,t}(P)| \;\; ; \qquad \Delta_E(P) = \sum_{t=1}^{T} \sqrt{\sum_{k=1}^{|K|} \delta^2_{k,t}(P)} \;\; ; \qquad \Delta_Q(P) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{k=1}^{|K|} \delta^2_{k,t}(P) \tag{4.5}$$

Donde $\Delta_R(P)$, $\Delta_E(P)$ y $\Delta_Q(P)$ se definen como las discrepancias globales del trabajo requerido, medidas según la distancia rectangular, euclídea y cuadrática, respectivamente.

4.2.2. Trabajo Completado

Otra posibilidad para conseguir una distribución, homogénea en el tiempo, del trabajo asignado en una jornada laboral, consiste en atender al punto de vista de los operarios de la línea. Es decir, atender al trabajo que se puede completar en cada estación, a medida que avanza la producción de unidades.

En efecto, considerando $V_{k,t}$ como el tiempo de carga de trabajo completado en la estación k, cuando ha pasado por ella una secuencia de t unidades de producto (ecuación 4.6).

$$V_{k,t} = b_k \sum_{\tau=1}^{t} v_{k,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.6}$$

Y, teniendo en cuenta, además, que el trabajo que debería completarse en la estación k, cuando se han fabricado t unidades de producto, vuelve a ser $P^{\star}_{k,t} = t \cdot \dot{p}_k$ (ecuación 4.2), se puede definir la discrepancia entre el trabajo real e ideal completado en la estación k, cuando ha pasado por ella una secuencia de t unidades de producto, de la siguiente manera:

$$\delta_{k,t}(V) = V_{k,t} - P^{\star}_{k,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.7}$$

Así, de forma análoga al enfoque anterior, dada una secuencia de productos, se puede medir la no-regularidad global del trabajo completado mediante las siguientes funciones:

$$\Delta_R(V) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{k=1}^{|K|} |\delta_{k,t}(V)| \;\; ; \qquad \Delta_E(V) = \sum_{t=1}^{T} \sqrt{\sum_{k=1}^{|K|} \delta^2_{k,t}(V)} \;\; ; \qquad \Delta_Q(V) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{k=1}^{|K|} \delta^2_{k,t}(V) \tag{4.8}$$

4.2.3. Sobrecarga de Trabajo

Teniendo en cuenta, de forma directa, el concepto de sobrecarga de trabajo, se proponen diversas alternativas para evitar puntas de trabajo excesivas durante el proceso de fabricación.

La primera alternativa consiste en minimizar la suma de discrepancias entre las sobrecargas reales, generadas por cada secuencia parcial de unidades en cada estación, y las sobrecargas ideales correspondientes, las cuales deberían ser nulas.

Así, definiendo $W_{k,t}$ como la sobrecarga acumulada en la estación k, cuando han pasado por ella las t primeras unidades de la secuencia de productos:

$$W_{k,t} = b_k \sum_{\tau=1}^{t} w_{k,\tau} = b_k \sum_{\tau=1}^{t} \left(p_{k,\tau} - v_{k,\tau} \right) = P_{k,t} - V_{k,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.9}$$

Pueden definirse las siguientes funciones de discrepancia:

$$\Delta_R(W) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{k=1}^{|K|} W_{k,t} \ ; \qquad \Delta_E(W) = \sum_{t=1}^{T} \sqrt{\sum_{k=1}^{|K|} W_{k,t}^2} \ ; \qquad \Delta_Q(W) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{k=1}^{|K|} W_{k,t}^2 \tag{4.10}$$

Donde $\Delta_R(W)$, $\Delta_E(W)$ y $\Delta_Q(W)$ se definen, respectivamente, como las funciones de discrepancias globales, rectangular, euclídea y cuadrática, de la sobrecarga de trabajo.

La segunda forma de restringir la concentración de la sobrecarga de trabajo, en una estación, consiste en minimizar la sobrecarga que se genera en el procesador más sobrecargado que, se supondrá, estará localizado en la estación m_{max}. Dicho indicador se calcula de la siguiente manera:

$$W_{m_{max}} = \max_{1 \leqslant k \leqslant |K|} \left\{ \frac{W_{k,T}}{b_k} \right\} = \max_{1 \leqslant k \leqslant |K|} \left\{ \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right\} \tag{4.11}$$

Finalmente, la última propuesta consiste en la conveniencia de evitar las puntas de sobrecarga, generadas en las estaciones de trabajo por una unidad de producto que ocupa una determinada posición en el flujo productivo. Dichas puntas de sobrecarga, propician el riesgo de parada en las estaciones y, por tanto, en la línea. Así, el objetivo es minimizar la sobrecarga correspondiente a la posición t_{max} de la secuencia que presente más sobrecarga en el conjunto de estaciones. Es decir:

$$W_{t_{max}} = \max_{1 \leqslant t \leqslant T} \left\{ \sum_{k=1}^{|K|} b_k \cdot w_{k,t} \right\} \tag{4.12}$$

4.2.4. Relaciones entre los Enfoques de la Regularidad de la Carga de Trabajo

Para estudiar la relación entre los enfoques, presentados anteriormente, se consideran las propiedades que se derivan de la preservación del mix de producción cuando se fabrican las unidades de producto a lo largo del tiempo.

Sea $X^{\star}_{i,t}$ el número de unidades de tipo de producto i, sobre un total de t unidades, que idealmente deberían fabricarse cuando se mantiene el mix de producción:

$$X^{\star}_{i,t} = \frac{d_i}{T} \cdot t \qquad\qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{4.13}$$

La primera propiedad que presenta dicho punto ideal $\vec{X}^{\star} = \left(X^{\star}_{1,1}, \ldots, X^{\star}_{|I|,T}\right)$ es la de nivelar el trabajo requerido. En efecto:

Teorema 2. *Para el punto $\vec{X}^{\star}$, se cumple: $\delta_{k,t}(P) = P_{k,t} - P^{\star}_{k,t} = 0 \;\; (k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T)$.*

Demostración. En este caso, si se tiene:

$$P_{k,t} = b_k \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot X^{\star}_{i,t} \Longleftrightarrow P_{k,t} = b_k \sum_{i=1}^{|I|} \frac{p_{i,k} \cdot d_i \cdot t}{T} = t \cdot \left(\frac{b_k}{T} \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot d_i \right) = t \cdot \dot{p}_k = P^{\star}_{k,t}$$

Entonces: $\quad P_{k,t} - P^{\star}_{k,t} = \delta_{k,t}(P) = 0 \qquad\qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T$

□

Colorario 1. *Para el punto $\vec{X}^{\star}$, $\Delta_R(P) = \Delta_E(P) = \Delta_Q(P) = 0$. Por consiguiente, las funciones de discrepancias globales, rectangular, euclídea y cuadrática, del trabajo requerido son óptimas.*

La segunda propiedad que presenta el punto $\vec{X}^{\star}$, sirve para relacionar las funciones de discrepancias globales del trabajo completado (V) con las correspondientes a la sobrecarga de trabajo (W). En efecto:

Teorema 3. *Para el punto $\vec{X}^{\star}$, se cumplen las igualdades: $\Delta_R(V) = \Delta_R(W)$, $\Delta_E(V) = \Delta_E(W)$ y $\Delta_Q(V) = \Delta_Q(W)$.*

Demostración. Considerando el Teorema 2, se tiene: $P_{k,t} = P^{\star}_{k,t}$ $(k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T)$. En tales condiciones, se puede escribir:

$$|\delta_{k,t}(V)| = |P^{\star}_{k,t} - V_{k,t}| = |P_{k,t} - V_{k,t}| = W_{k,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T$$

Por tanto: $\Delta_R(V) = \Delta_R(W)$.

De la misma forma, se puede escribir:

$$\delta^2_{k,t}(V) = (P^{\star}_{k,t} - V_{k,t})^2 = (P_{k,t} - V_{k,t})^2 = W^2_{k,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T$$

Por tanto: $\Delta_E(V) = \Delta_E(W)$ y $\Delta_Q(V) = \Delta_Q(W)$.

□

Colorario 2. *Para el punto $\vec{X}^{\star}$, los enfoques nivelado del trabajo completado y nivelado de sobrecarga de trabajo son equivalentes.*

La tercera propiedad que presenta el punto $\vec{X}^{\star}$ sirve para relacionar las tres alternativas del enfoque relativo a la sobrecarga de trabajo. En efecto:

Teorema 4. *Si $\dot{p}_k \leqslant b_k \cdot c$ $(k = 1, \ldots, |K|)$, las funciones objetivo $\Delta_R(W)$, $\Delta_E(W)$, $\Delta_Q(W)$, $W_{m_{max}}$ y $W_{t_{max}}$ son óptimas e iguales a 0 para el punto $\vec{X}^{\star}$.*

Demostración. Por una parte, el tiempo requerido a uno de los procesadores, localizado en la estación k, para completar una unidad ideal de producto, es: $\dot{p}_k/b_k$ $(k = 1, \ldots, |K|)$. Por otra parte, el tiempo mínimo disponible por procesador para completar una unidad de producto en cualquier estación de trabajo es el tiempo de ciclo, c.

Como, por hipótesis, $\dot{p}_k \leqslant b_k \cdot c$ $(k = 1, \ldots, |K|)$, entonces se cumple: $c \geqslant \dot{p}_k/b_k$ $(k = 1, \ldots, |K|)$. Esto significa que todo procesador dispone, en todo momento y en toda estación, de un tiempo para fabricar una unidad ideal de producto mayor o igual que el tiempo que le requiere dicha unidad para ser completada.

En tales condiciones, se puede escribir: $w_{k,t} = 0$ y $W_{k,t} = 0$ $(k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T)$.

En consecuencia: $\Delta_R(W) = \Delta_E(W) = \Delta_Q(W) = W_{m_{max}} = W_{t_{max}} = 0$

□

Colorario 3. *Si* $\dot{p}_k \leqslant b_k \cdot c$ $(k = 1, \ldots, |K|)$*, para el punto* $\vec{X}^\star$*, se cumple:* $V_{k,t} = P_{k,t} = P^\star_{k,t}$ $(k = 1, \ldots, |K|;\ t = 1, \ldots, T)$*. Es decir, para el punto* $\vec{X}^\star$*, el trabajo completado* $(V_{k,t})$ *coincide con el trabajo requerido* $(P_{k,t})$ *y con el trabajo ideal requerido* $(P^\star_{k,t} = t \cdot \dot{p}_k)$ *en cada estación de trabajo y para cada posición de la secuencia.*

4.3. Modelos para el *MMSP-W* con Regularidad de la Carga de Trabajo en la Línea

Los enfoques explicados anteriormente (Sección 4.2) permiten establecer nuevos modelos, a partir de los modelos propuestos en el capítulo anterior (modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ del capítulo 3, sección 3.2, páginas 45 y 46) y el modelo de referencia $M4'$ (ver capítulo 2, sección 2.3.2, página 41).

La extensión de dichos modelos de referencia da lugar a nuevos modelos que favorecen la obtención de secuencias con regularidad de la carga de trabajo y de la sobrecarga. Para ello, se pueden emplear, al menos, las siguientes vías:

(1) Añadir a los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ una o más funciones objetivo representativas de los distintos enfoques y disponer, entonces, de un conjunto de problemas multi-objetivo para seleccionar en cada caso el más adecuado.

(2) Añadir a los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ un conjunto de restricciones que propicien la distribución, homogénea en el tiempo, de la carga de trabajo y de la sobrecarga que generan las unidades de producto en todas las estaciones.

(3) Modificar la función objetivo del modelo $M4'$ y añadir un conjunto de restricciones con el fin de evitar la concentración de sobrecarga de trabajo en ciclos consecutivos de la jornada laboral, mediante secuencias de productos que presenten la propiedad de regularidad del trabajo requerido en las estaciones a lo largo del tiempo.

A continuación se presentan los modelos propuestos a través de cada una de las vías mencionadas.

4.3.1. Modelos Multi-objetivo

A partir de los tres enfoques estudiados en la sección anterior, de los teoremas definidos y las conclusiones que se derivan de ellos, se proponen diferentes modelos multi-objetivo, considerando:

1. Las funciones de discrepancia definidas para cada uno de los enfoques, cuyo fin es regularizar la variación de la carga de trabajo.

2. Las propiedades derivadas del punto ideal $\vec{X}^{\star}$ de producciones acumuladas.

Modelos Bi-objetivo MMSP-W / Work-Load Rate Variation

Sea $\Im_W$ el conjunto de funciones objetivo, correspondientes a los diversos enfoques para regularizar la carga de trabajo en la línea de producción:

$$\Im_W = \left\{ \begin{array}{c} \Delta_R(P), \Delta_E(P), \Delta_Q(P), \\ \Delta_R(V), \Delta_E(V), \Delta_Q(V), \\ \Delta_R(W), \Delta_E(W), \Delta_Q(W), \\ W_{m_{max}}, W_{t_{max}} \end{array} \right\} \tag{4.14}$$

Si se considera el modelo $M3 \cup 4$ como modelo de referencia, se obtiene el siguiente conjunto de modelos bi-objetivo $M3 \cup 4_WLRV$:

Modelos $M3 \cup 4_WLRV$:

$$\Big(\text{máx}\, V \Longleftrightarrow \text{mín}\, W \Big) \wedge \Big(\text{mín}\, f \; (f \in \Im_W) \Big) \tag{4.15}$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^{T} x_{i,t} = d_i \qquad i = 1, \ldots, |I| \tag{4.16}$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \qquad t = 1, \ldots, T \tag{4.17}$$

$$v_{k,t} + w_{k,t} = \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot x_{i,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.18}$$

$$s_{k,t} \geqslant \big(t + k - 2\big)c \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.19}$$

$$s_{k,t} \geqslant s_{k,t-1} + v_{k,t-1} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 2, \ldots, T \tag{4.20}$$

$$s_{k,t} \geqslant s_{k-1,t} + v_{k-1,t} \qquad k = 2, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.21}$$

$$s_{k,t} + v_{k,t} \leqslant \big(t + k - 2\big)c + l_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.22}$$

$$v_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.23}$$

$$w_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.24}$$

$$x_{i,t} \in \{0, 1\} \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{4.25}$$

En el modelo, la función bi-objetivo (4.15) viene representada por las funciones equivalentes, del trabajo total completado y la sobrecarga total generada, y una de las funciones que forman el conjunto $\Im_W$. Por su parte, las restricciones (4.16) - (4.25) coinciden con las restricciones del modelo tomado como referencia, $M3 \cup 4$ (restricciones (3.2) - (3.11) de la página 45).

Del mismo modo, tomando como referencia el modelo $M4 \cup 3$, que considera una escala relativa, de instantes de inicio de las unidades de la secuencia en cada estación de trabajo, se obtiene el siguiente conjunto de modelos bi-objetivos:

Modelos $M4 \cup 3_WLRV$:

$$\Big(\min W \Longleftrightarrow \max V\Big) \wedge \Big(\min f\ (f \in \Im_W)\Big) \tag{4.26}$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^{T} x_{i,t} = d_i \qquad i = 1, \ldots, |I| \tag{4.27}$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \qquad t = 1, \ldots, T \tag{4.28}$$

$$v_{k,t} + w_{k,t} = \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot x_{i,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.29}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant \hat{s}_{k,t-1} + v_{k,t-1} - c \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 2, \ldots, T \tag{4.30}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant \hat{s}_{k-1,t} + v_{k-1,t} - c \qquad k = 2, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.31}$$

$$\hat{s}_{k,t} + v_{k,t} \leqslant l_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.32}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.33}$$

$$v_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.34}$$

$$w_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.35}$$

$$x_{i,t} \in 0, 1 \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{4.36}$$

$$\hat{s}_{1,1} = 0 \tag{4.37}$$

Al igual que en el conjunto de modelos $M3 \cup 4_WLRV$, en el conjunto $M4 \cup 3_WLRV$ la función bi-objetivo incluye las funciones equivalentes de los modelos de referencia y una función perteneciente al conjunto $\Im_W$ (4.14). En este caso, las restricciones (4.27) - (4.37) coinciden con las restricciones (3.13) - (3.23) del modelo de referencia $M4 \cup 3$ (ver página 46).

Modelos Bi-objetivo MMSP-W / Product Rate Variation

Atendiendo a los teoremas 2, 3 y 4 y a las conclusiones que se derivan de ellos, se puede propiciar, de forma sencilla, tanto la regularidad de la carga de trabajo requerido como la de trabajo completado. Para ello, se deben obtener secuencias cuyas producciones acumuladas reales, $X_{i,t} = \sum_{\tau=1}^{t} x_{i,\tau}$ ($i = 1, \ldots, |I|$; $t = 1, \ldots, T$), se acerquen, lo máximo posible, a las producciones acumuladas ideales representadas por el punto $X^{\star}_{i,t} = \left(X^{\star}_{1,1}, \ldots, X^{\star}_{|I|,T}\right)$, definido en la ecuación (4.13).

Así, considerando la discrepancia entre la producción acumulada real e ideal para cada tipo de producto i ($i = 1, \ldots, |I|$), cuando han pasado por la línea t ($t = 1, \ldots, T$) unidades de producto:

$$\delta_{i,t}(X) = X_{i,t} - X^{\star}_{i,t} \qquad\qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{4.38}$$

Se puede medir la no-regularidad de la producción acumulada del conjunto de tipos de producto, durante la jornada laboral, de la siguiente forma:

$$\Delta_R(X) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{|I|} |\delta_{i,t}(X)| \;\; ; \quad \Delta_E(X) = \sum_{t=1}^{T} \sqrt{\sum_{i=1}^{|I|} \delta^2_{i,t}(X)} \;\; ; \quad \Delta_Q(X) = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{|I|} \delta^2_{i,t}(X) \tag{4.39}$$

De esta manera, definiendo el conjunto de funciones $\Im_X = \{\Delta_R(X), \Delta_E(X), \Delta_Q(X)\}$, se obtienen dos nuevas familias de modelos bi-objetivo, en función del modelo de referencia utilizado (en este caso, los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, respectivamente):

Modelos $M3 \cup 4_PRV$:

$$\left(\text{máx}\, V \Longleftrightarrow \text{mín}\, W\right) \wedge \left(\text{mín}\, f\, (f \in \Im_X)\right) \tag{4.40}$$

Sujeto a: Restricciones (4.16) - (4.25) del modelo $M3 \cup 4_WLRV$.

Modelos $M4 \cup 3_PRV$:

$$\left(\text{mín}\, W \Longleftrightarrow \text{máx}\, V\right) \wedge \left(\text{mín}\, f\, (f \in \Im_X)\right) \tag{4.41}$$

Sujeto a: Restricciones (4.27) - (4.37) del modelo $M4 \cup 3_WLRV$.

Nótese que las funciones objetivo del conjunto $\Im_X$ son útiles para mantener constante el mix de fabricación en la línea a lo largo del tiempo. Este es un claro objetivo en las filosofías *JIT* (Toyota) y *DS* (Nissan) y, de hecho, se pueden encontrar en la literatura problemas que hacen referencia a dicho objetivo. En concreto, se encuentran, por un lado, el problema *PRV* (Product Rate Variation), propuesto por Miltenburg (1989). Por otro lado, el problema *ORV* (Output Rate Variation), propuesto por Monden (1983), siendo este último el que describe la forma de secuenciar las unidades (vehículos) en la empresa Toyota, para mantener constante a lo largo del tiempo el consumo de componentes en las líneas de productos mixtos.

4.3.2. Modelos Mono-objetivo con Restricciones sobre el Mix de Producción

Los teoremas 2, 3 y 4 (ver subsección 4.2.4) permiten otra vía para propiciar, tanto la regularidad de la carga de trabajo requerido, como la de la sobrecarga, en las secuencias. Esta vía consiste en limitar los valores de las variables de producción acumulada, $X_{i,t}$ ($i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T$), que deben ser enteros, entre los valores enteros más próximos a los valores ideales, $X^{\star}_{i,t} = d_i \cdot t/T$, que, al ser racionales, no siempre tendrán una aplicación práctica. Esto es:

$$\left\lfloor \frac{d_i}{T} \cdot t \right\rfloor \leqslant X_{i,t} \leqslant \left\lceil \frac{d_i}{T} \cdot t \right\rceil \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{4.42}$$

Así, a partir de los modelos de referencia $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, proponemos dos nuevos modelos, el $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, que se detallan a continuación:

Modelo $M3 \cup 4_pmr$:

$$\left(\text{máx}\, V \Longleftrightarrow \text{mín}\, W \right) \tag{4.43}$$

Sujeto a: Restricciones (4.16) - (4.25) del modelo $M3 \cup 4_WLRV$ (ver página 74).

$$\sum_{\tau=1}^{t} x_{i,\tau} \geqslant \left\lfloor \frac{d_i}{T} \cdot t \right\rfloor \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{4.44}$$

$$\sum_{\tau=1}^{t} x_{i,\tau} \leqslant \left\lceil \frac{d_i}{T} \cdot t \right\rceil \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{4.45}$$

Modelo $M4 \cup 3_pmr$:

$$\left(\text{mín}\, W \Longleftrightarrow \text{máx}\, V \right) \tag{4.46}$$

Sujeto a: Restricciones (4.27) - (4.37) del modelo $M4 \cup 3_WLRV$ (ver página 75).

$$\sum_{\tau=1}^{t} x_{i,\tau} \geqslant \left\lfloor \frac{d_i}{T} \cdot t \right\rfloor \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{4.47}$$

$$\sum_{\tau=1}^{t} x_{i,\tau} \leqslant \left\lceil \frac{d_i}{T} \cdot t \right\rceil \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{4.48}$$

4.3.3. Modelos Mono-objetivo con Ponderación de Funciones

A partir de la tasa ideal del trabajo requerido ($\dot{p}_k = b_k/T \cdot \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot d_i$, ecuación 4.1) para la estación k ($k = 1, \ldots, |K|$), se puede definir, también, el tiempo medio del trabajo requerido en la estación k, cuando por ella pasan t unidades de producto siguiendo el orden establecido por la secuencia $\pi(t) = \{\pi_1, \pi_2, \ldots, \pi_t\}$. Dicho tiempo, $\overline{p}_{k,t}$, será la tasa real del trabajo requerido en la estación k asociada a una secuencia de t unidades de producto.

$$\overline{p}_{k,t} = \frac{b_k}{t} \sum_{\tau=1}^{t} \rho_{k,\tau} = \frac{b_k}{t} \sum_{\tau=1}^{t} p_{\pi_\tau,k} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.49}$$

Donde $\rho_{k,\tau}$ es el tiempo de proceso requerido a cada procesador de la estación k por la τ*-ésima* unidad de la secuencia $\pi(t)$ de productos.

Las definiciones anteriores, permiten formular las discrepancias entre las tasas reales e ideales del trabajo requerido, de la forma siguiente:

$$\delta_{k,t}(p) = \overline{p}_{k,t} - \dot{p}_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.50}$$

Dichas discrepancias, pueden adoptar tanto un valor positivo $\delta^+_{k,t}$ (exceso de trabajo requerido), como negativo $\delta^-_{k,t}$ (defecto de trabajo requerido) y se definen como sigue:

$$\delta^+_{k,t} = \text{máx}\left\{0, \overline{p}_{k,t} - \dot{p}_k\right\} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.51}$$

$$\delta^-_{k,t} = \text{máx}\left\{0, \dot{p}_k - \overline{p}_{k,t}\right\} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.52}$$

Cumpliéndose las siguientes igualdades:

$$\overline{p}_{k,t} - \dot{p}_k = \delta^+_{k,t} - \delta^-_{k,t} = 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.53}$$

Así, imponiendo, implícita o explícitamente, en el modelo de referencia $M4'$ (ver página 41), propuesto por Bautista, Cano y Alfaro (2011), las condiciones (4.54) y (4.55), se obtiene un nuevo modelo mono-objetivo con minimización de la sobrecarga de trabajo y minimización de la no-regularidad del trabajo requerido:

$$Si \quad \delta^+_{k,t} > 0 \quad \Rightarrow \quad \delta^-_{k,t} = 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.54}$$

$$Si \quad \delta^-_{k,t} > 0 \quad \Rightarrow \quad \delta^+_{k,t} = 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.55}$$

Modelo $M4'_RWR$:

$$\text{mín } \Phi(\beta) = \beta \cdot W + (1-\beta)\Delta_P = \beta \left[\sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right) \right] + (1-\beta) \left[\sum_{k=1}^{|K|} \sum_{t=1}^{T} \left(\delta^+_{k,t} + \delta^-_{k,t} \right) \right] \tag{4.56}$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^{T} x_{i,t} = d_i \qquad i = 1, \ldots, |I| \tag{4.57}$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \qquad t = 1, \ldots, T \tag{4.58}$$

$$\rho_{k,t} = \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot x_{i,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.59}$$

$$\rho_{k,t} - w_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.60}$$

$$\overline{p}_{k,t} = \frac{b_k}{t} \sum_{\tau=1}^{t} \rho_{k,\tau} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.61}$$

$$\delta^-_{k,t} - \delta^+_{k,t} + \overline{p}_{k,t} = \dot{p}_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.62}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant \hat{s}_{k,t-1} + \rho_{k,t-1} - w_{k,t-1} - c \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 2, \ldots, T \tag{4.63}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant \hat{s}_{k-1,t} + \rho_{k-1,t} - w_{k-1,t} - c \qquad k = 2, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.64}$$

$$\hat{s}_{k,t} + \rho_{k,t} - w_{k,t} \leqslant l_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.65}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.66}$$

$$w_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.67}$$

$$\delta^+_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.68}$$

$$\delta^-_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{4.69}$$

$$x_{i,t} \in \{0, 1\} \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{4.70}$$

$$\hat{s}_{1,1} = 0 \tag{4.71}$$

En el modelo $M4'_RWR$, la función objetivo (4.56) expresa la minimización de la función de esfuerzo, $\Phi(\beta)$, que pondera dos funciones mediante el coeficiente β ($0 \leqslant \beta \leqslant 1$). La primera función, W, corresponde a la sobrecarga total de trabajo y la segunda, Δ_P, representa la suma de excesos y defectos de trabajo requerido respecto a la tasa ideal requerida, es decir, la no-regularidad del trabajo requerido.

Las restricciones (4.57) - (4.58), (4.59) - (4.60) y (4.63) - (4.65), coinciden con las restricciones (2.12) - (2.13), (2.14) - (2.15) y (2.16) - (2.18) del modelo de referencia (ver modelos $M4$ y $M4'$ en capítulo 2, sección 2.3, páginas 40 y 41, respectivamente) y representan, respectivamente, la satisfacción de la demanda y la asignación de los productos a las posiciones de la secuencia; los vínculos entre los tiempos de proceso, requeridos por los productos en las estaciones, con los correspondientes a las unidades ordenadas en secuencia; y los instantes relativos de inicio de las operaciones. Por otro lado, las restricciones (4.61) definen las tasas reales de trabajo requerido, mientras que en (4.62) se relacionan dichas tasas con las ideales y con las discrepancias entre ellas.

Finalmente, la no-negatividad de las variables se establece mediante las restricciones (4.66) - (4.69); la cualidad binaria de las variables de asignación de las unidades a las posiciones de la secuencia se formula en (4.70) y el instante de inicio de las operaciones se fija con (4.71).

4.4. Un Ejemplo Ilustrativo

De forma similar al capítulo anterior, en esta parte del documento, se presenta un ejemplo para ilustrar el efecto de la incorporación de las restricciones de la producción acumulada (4.42) en el modelo $M4 \cup 3$. De esta manera, podemos visualizar la diferencia entre la secuencia dada por el modelo de referencia, $M4 \cup 3$, y el nuevo modelo $M4 \cup 3_pmr$. Para ello, se utilizan los datos correspondientes al ejemplo del capítulo 3 (página 48), que a modo de recordatorio, se presentan a continuación (Tabla 4.1):

	$A(d_A = 3)$	$B(d_B = 1)$	$C(d_C = 2)$	b_k
m_1	5	4	3	1
m_2	5	4	4	2
m_3	4	3	5	1
Total	19 ($V_0(A) = 57$)	15 ($V_0(B) = 15$)	16 ($V_0(C) = 32$)	$V_0 = 104$

Tabla 4.1: Ejemplo. Número de procesadores por estación (b_k) y tiempos de proceso requeridos (en segundos), a actividad normal, por unidad de producto y procesador en cada estación ($p_{i,k}$).

Las secuencias obtenidas con cada uno de los modelos se presentan, en forma de diagrama de Gantt, en la siguiente figura (ver figura 4.1). En ella podemos observar, a simple vista, cómo la secuencia ofrecida por el modelo $M4 \cup 3_pmr$ (C_1-A_1-B_1-A_2-C_2-A_3) distribuye las unidades de producto, manteniendo la regularidad del mix de producción, pues no secuencia dos unidades del mismo tipo de forma consecutiva y evita concentraciones del trabajo requerido.

En cambio, la secuencia ofrecida por el modelo $M4 \cup 3$ (C_1-B_1-A_1-C_2-A_2-A_3), a pesar de generar la misma sobrecarga que el modelo $M4 \cup 3_pmr$ ($W = 3$ unidades de tiempo) no mantiene la regularidad de la producción, pues secuencia, consecutivamente, dos unidades de tipo A (A_2 y A_3).

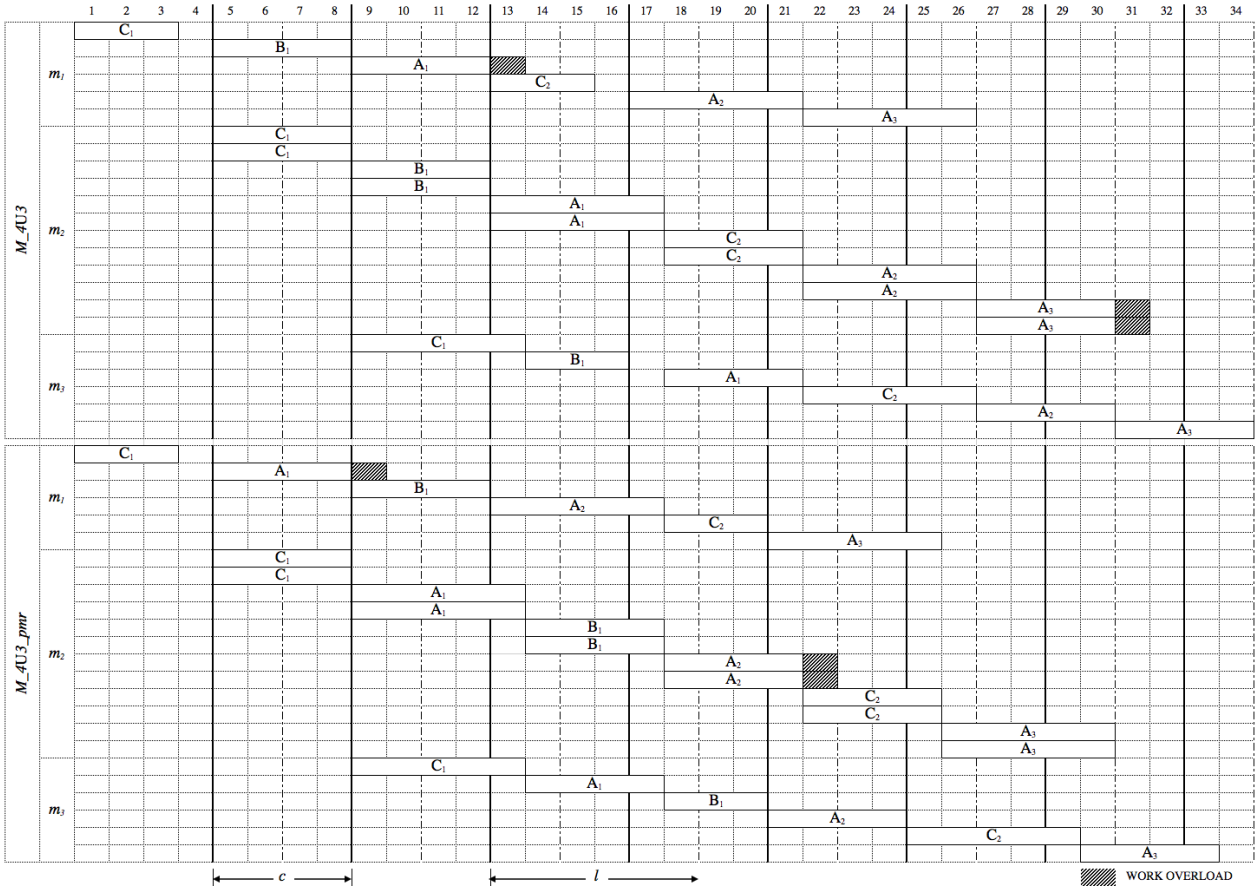


Figura 4.1: Diagrama de Gantt de las soluciones óptimas obtenidas con los modelos $M4 \cup 3$ (diagrama superior) y $M4 \cup 3_pmr$ (diagrama inferior).

En la tabla 4.2 se resumen los resultados obtenidos con ambos modelos. En ella, podemos observar cómo la no-regularidad del trabajo requerido, del trabajo completado y de la producción acumulada es menor con el modelo $M4 \cup 3_pmr$, lo cual indica que, efectivamente, el modelo nos permite obtener secuencias que, aun completando la misma cantidad de trabajo, son más regulares.

	V	W	$w(m_1)$	$w(m_2)$	$w(m_3)$	$s_{\|K\|,T} + v_{\|K\|,T}$[2]	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(V)$	$\Delta_Q(W)$
$M3 \cup 4$	101	3	1	2	0	34	4.72	19.06	25.06	5
$M3 \cup 4_pmr$	101	3	1	2	0	33	2.06	7.39	13.06	5

Tabla 4.2: Soluciones óptimas ofrecidas por los modelos $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$, para el ejemplo.

4.5. Experiencia Computacional

Una vez planteados los diversos enfoques para conseguir la regularidad del trabajo en el *MMSP-W* y, presentados los modelos extendidos, en este punto, se evalúa el comportamiento de alguno de dichos modelos. En concreto, se estudia el comportamiento de los modelos mono-objetivos propuestos.

Por un lado, se evalúa el comportamiento de los modelos con restricciones en el mix de producción, el $M3 \cup 4_pmr$ y el $M4 \cup 3_pmr$, propuestos en este capítulo, frente a sus modelos de referencia, el $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4$, propuestos en el capítulo anterior (Capítulo 3). Para ello, se utilizan dos conjuntos de ejemplares de datos: (1) 225 ejemplares de la literatura; y (2) 23 ejemplares correspondientes a diferentes planes de producción de la planta de motores de Nissan en Barcelona.

Por otro lado, también se estudia el comportamiento del modelo $M4'_RWR$, para diversos valores del parámetro de ponderación. En este experimento, se utilizarán los 225 ejemplares de la literatura.

4.5.1. Evaluación de Modelos con Restricciones en el Mix de Producción

Para estudiar el comportamiento de los modelos $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$ se realizan experiencias computacionales similares a las del capítulo anterior (Capítulo 3). De esta manera, se podrán comparar los resultados obtenidos con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, frente a los que se obtengan con sus extensiones, que incorporan el concepto de regularidad.

En efecto, en esta segunda variante del *MMSP-W* estudiada, evaluamos los modelos a través de los mismos conjuntos de datos utilizados para la primera extensión de los modelos de la literatura propuesta en esta tesis, la integración de modelos (ver capítulo 3, sección 3.4, página 51). Resumidamente, los experimentos y los datos utilizados en cada uno de ellos son:

[2]Instante de finalización de la última unidad de producto en la última estación. Es equivalente a la medida de eficiencia C_{max} los problemas Flow-Shop.

I. En primer lugar, se lleva a cabo un experimento con 225 instancias de referencia (Bautista y Cano, 2008) (ver subsección 3.4.1, tablas 3.4 y 3.5, página 52). Dichos ejemplares de datos, construidos a partir de 45 planes de producción y 5 estructuras de tiempos de proceso de las operaciones ($E1$ a $E5$), representan distintas situaciones que pueden darse en la línea, respecto a la carga de trabajo requerida a las estaciones. Cada uno de estos planes corresponde a una producción total de 16 unidades, dividida en 4 tipos de productos y cuyas operaciones han de realizarse en 4 estaciones dispuestas en serie. A su vez, estos planes de producción se han agrupado en 5 bloques ($B1$ a $B5$), cada uno de ellos con diferente mezcla de productos. Finalmente, el tiempo de ciclo considerado para todas las instancias es $c = 100\ s$.

II. En segundo lugar, se lleva a la práctica una aplicación industrial, tal como se realizó en el capítulo anterior (Subsección 3.4.2). Los datos utilizados corresponden a la línea de motores de la planta de Nissan en Barcelona, constituida por 21 estaciones en serie y en la que se fabrican nueve tipos de motores ($p_1, \ldots, p_9$). Los motores, agrupados en tres familias, 4×4 ($p_1, \ldots, p_3$), furgonetas (p_4 y p_5) y camiones ($p_6, \ldots, p_9$), poseen diferentes características y, por tanto, los tiempos de proceso de las operaciones en las estaciones son distintos, oscilando entre $89\ s$ y $185\ s$ (ver tabla 3.8, página 56). Al igual que en la experiencia anterior, en este caso, cada estación de trabajo dispone de un tiempo de ciclo igual a $c = 175\ s$, de una ventana temporal de $l_k = 195\ s$ y de un solo procesador ($b_k = 1$), compuesto por un equipo de dos operarios y todas las herramientas y sistemas auxiliares necesarios para llevar a cabo las operaciones asignadas. Sin embargo, en esta experiencia, únicamente se emplean los 23 ejemplares asociados a un único día de trabajo ($|\mathrm{E}| = 23$) con una demanda total (T) de 270 motores (ver ejemplares del $Bloque - I$ de la tabla 3.9, página 57).

En este caso, para ambas experiencias, se ha empleado el LP Solver of Gurobi Optimizer v4.5.0, en un ordenador Apple Macintosh iMac, con procesador Intel Core i7 2.93 GHz, con 8 GB de memoria RAM y con sistema operativo MAC OS X 10.6.7. En cuanto al tiempo máximo de CPU concedido, para los ejemplares de la literatura no se ha fijado ningún límite y para los ejemplares de NISSAN-9ENG se ha limitado a $7200\ s$.

Una vez ejecutados todos los modelos con todos los ejemplares de datos, dados: (1) dos modelos M y M' (que pueden ser: $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$; $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$; $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$; $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3$; $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3_pmr$; $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$); (2) el conjunto de funciones $\Im_0 = \{W, \Delta_Q(P), \Delta_Q(V), \Delta_Q(W), \Delta_Q(X)\}$, derivadas de los enfoques trabajo requerido, trabajo completado y sobrecarga de trabajo, respectivamente; y (3) el conjunto de ejemplares E, se seleccionarán las mejores soluciones, en cuanto a mínima sobrecarga de trabajo (W), ofrecidas por ambos modelos M y M' para cada ejemplar $\epsilon \in \mathrm{E}$. Siendo dichas soluciones $S^{\star}_{M}(\epsilon)$ y $S^{\star}_{M'}(\epsilon)$.

A partir de estas soluciones, se medirá la RPD (Desviación Porcentual Relativa) entre los valores que toma una función $f \in \Im_0$, para las soluciones $S^\star_M(\epsilon)$ y $S^\star_{M'}(\epsilon)$. Para ello, se definen los siguientes ratios:

$$RPD_1(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^\star_{3\cup4}(\epsilon)\right) - f\left(S^\star_{3\cup4_pmr}(\epsilon)\right)}{f\left(S^\star_{3\cup4}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E}) \tag{4.72}$$

$$RPD_2(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^\star_{4\cup3}(\epsilon)\right) - f\left(S^\star_{4\cup3_pmr}(\epsilon)\right)}{f\left(S^\star_{4\cup3}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E}) \tag{4.73}$$

$$RPD_3(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^\star_{3\cup4}(\epsilon)\right) - f\left(S^\star_{4\cup3}(\epsilon)\right)}{f\left(S^\star_{3\cup4}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E}) \tag{4.74}$$

$$RPD_4(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^\star_{3\cup4_pmr}(\epsilon)\right) - f\left(S^\star_{4\cup3}(\epsilon)\right)}{f\left(S^\star_{3\cup4_pmr}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E}) \tag{4.75}$$

$$RPD_5(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^\star_{3\cup4}(\epsilon)\right) - f\left(S^\star_{4\cup3_pmr}(\epsilon)\right)}{f\left(S^\star_{3\cup4}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E}) \tag{4.76}$$

$$RPD_6(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^\star_{3\cup4_pmr}(\epsilon)\right) - f\left(S^\star_{4\cup3_pmr}(\epsilon)\right)}{f\left(S^\star_{3\cup4_pmr}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E}) \tag{4.77}$$

A continuación se detallan los resultados obtenidos para ambos conjuntos de datos.

I. Experiencia Computacional con Instancias de la Literatura

La tabla 4.3 presenta los tiempos de CPU, mínimo, máximo y promedio, que han requerido los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, para obtener la solución óptima de cada ejemplar. En ella, se observa que la incorporación, a los modelos originales ($M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$), de las restricciones para la preservación del mix de producción, permiten alcanzar los óptimos reduciendo el tiempo medio de CPU a una quinta parte (ver resultados completos en tablas B.5 y B.6 del anexo B).

Por otro lado, también se detecta el mejor comportamiento de los modelos $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$, con instantes de inicio de las operaciones relativos ($\hat{s}_{k,t}$), frente a los dos correspondientes modelos con instantes de inicio absolutos ($s_{k,t}$). Los primeros, necesitan $2/3$ del tiempo medio empleado por los segundos, para obtener todas las soluciones óptimas.

En cuanto a la calidad de las soluciones óptimas, en la tabla 4.4 se recogen los valores de $RPD_1(f)$ y $RPD_2(f)$ ($\forall f \in \Im$), que miden el impacto producido al añadir las restricciones (4.42) a los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, respectivamente. También se recogen los valores $RPD_6(f)$ ($\forall f \in \Im_0$), que permiten comparar el comportamiento de los modelos propuestos en este capítulo del documento ($M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$) (ver cálculos completos en tablas B.7 - B.17 del anexo B).

	$M3 \cup 4$	$M4 \cup 3$	$M3 \cup 4_pmr$	$M4 \cup 3_pmr$
CPU_{min}	0.185	0.038	0.266	0.028
CPU_{max}	2004.24	2224.98	167.87	110.53
$\overline{CPU}$	93.66	59.95	17.19	11.78

Tabla 4.3: Tiempos de CPU mínimo, máximo y promedio (en segundos), que requieren los modelos $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$ para obtener las soluciones óptimas.

	W	$\Delta_Q(X)$			$\Delta_Q(P)$			$\Delta_Q(W)$			$\Delta_Q(V)$		
	RPD_1	RPD_1	RPD_2	RPD_6	RPD_1	RPD_2	RPD_6	RPD_1	RPD_2	RPD_6	RPD_1	RPD_2	RPD_6
$E1$	-3.74	48.67	46.89	1.87	21.55	31.27	1.45	4.72	8.39	2.02	-2.75	-3.85	-8.53
$E2$	-1.25	24.1	25.79	0.57	22.71	21.75	0.06	-3.79	-5.08	0.68	-0.72	-2.69	-3.16
$E3$	-0.69	38.48	34.24	-1.6	12.63	14.95	1.75	-0.75	-1.46	0.37	2.76	1.93	-2.86
$E4$	-0.01	44.53	36.16	-9.85	17.13	1.65	-23.73	-8.18	1.2	6.29	8.86	-13.03	-32.27
$E5$	-1	27.15	23.1	-3.19	20.32	19.28	-3.43	-7.44	-5.24	-1.68	3.55	1.84	-6.37
$B1$	-0.04	26.23	17.45	-1.33	10.4	11.7	-6.7	-1.03	1.73	2.08	1.66	1.36	-6.22
$B2$	-1.31	33.39	25.33	-2.56	15.13	20.77	-5.52	-3.9	-0.29	1.95	3.49	-3.17	-13.74
$B3$	-2.57	41.92	45.49	0.73	26.44	27.31	-0.48	1.09	-0.1	0.91	1.73	-0.92	-5.99
$B4$	-1.84	40.02	41.44	-3.04	15.56	20.52	-4.51	-0.74	-0.33	1.6	1.65	-2.63	-9.87
$B5$	-1.12	36.98	32.9	-3.42	19.55	14.81	-5.58	-4.84	-0.96	1.51	2.46	-4.66	-12.08
Promedio	-1.34	36.59	33.24	-2.44	18.87	17.78	-4.78	-3.09	-0.44	1.53	2.34	-3.16	-10.64

Tabla 4.4: Valores (%) de $RPD_1(f)$, $RPD_2(f)$ y $RPD_6(f)$ ($\forall f \in \Im_0$), por estructuras y bloques, y valores medios para las 225 instancias de referencia.

A partir de los resultados recogidos en la tabla 4.4, se puede concluir lo siguiente:

(1) La incorporación de las restricciones de preservación del mix de producción (ecuación 4.42), sobre los dos modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, empeora, como es lógico, los valores óptimos de la sobrecarga global (W) de la línea de motores (ver columna RPD_1 para W). En efecto, el empeoramiento medio de la sobrecarga de trabajo respecto a las soluciones obtenidas con los modelos de referencia es del $1.34\,\%$ en el conjunto de los 225 ejemplares, siendo la estructura de tiempos de proceso $E1$ ($3.74\,\%$) y el bloque de planes de demanda $B3$ ($2.57\,\%$) los que presentan peores resultados.

(2) Tal y como esperábamos, la incorporación de dichas restricciones a los modelos originales, mejora, en todas las estructuras y en todos los bloques, la regularidad de la producción (columnas RPD_1 y RPD_2 para $\Delta_Q(X)$), característica deseable en un contexto de fabricación *JIT*. Del mismo modo, la propiedad de regularidad del trabajo requerido (ver columnas RPD_1 y RPD_2 para $\Delta_Q(P)$) también se consigue mejorar en todos los planes de demanda analizados. De hecho, considerando los valores globales, las mejoras sobre la regularidad superan el $33\,\%$ en la preservación del mix de producción y están alrededor del $18\,\%$, para el trabajo requerido.

(3) Los modelos $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$ son equivalentes para la función objetivo sobrecarga global (W) mínima, obteniendo los valores óptimos en todos los ejemplares ($RPD_6(W) = 0$) (ver resultados completos en tabla B.4 del anexo B). No obstante, el tiempo medio de CPU, por ejemplar, empleado por $M3 \cup 4_pmr$, es un $50\,\%$ mayor que el empleado por $M4 \cup 3_pmr$ ($17.19\ s$ versus $11.78\ s$).

(4) En promedio, $M3 \cup 4_pmr$ mejora los resultados de $M4 \cup 3_pmr$, para las funciones de regularidad del trabajo requerido, un $4.78\,\%$ (columna RPD_6 para $\Delta_Q(P)$), del trabajo completado un $10.64\,\%$ (columna RPD_6 para $\Delta_Q(V)$) y de la producción un $2.44\,\%$ (columna RPD_6 para $\Delta_Q(X)$). Sin embargo, $M4 \cup 3_pmr$ supera a $M3 \cup 4_pmr$ en la función de regularidad de la sobrecarga de trabajo, en un $1.53\,\%$ (columna RPD_6 para $\Delta_Q(W)$), tanto en valor promedio global como en valor promedio por bloques.

(5) Si se atiende a los valores individuales, $M3 \cup 4_pmr$ obtuvo la ganancia más significativa, comparado con $M4 \cup 3_pmr$, en la estructura $E4$, tanto en regularidad del trabajo requerido (columna RPD_6 para $\Delta_Q(P)$), como en regularidad del trabajo completado (columna RPD_6 para $\Delta_Q(V)$) y regularidad de la producción (columna RPD_6 para $\Delta_Q(X)$). En contraposición y en esta misma estructura, $M4 \cup 3_pmr$ domina significativamente a $M3 \cup 4_pmr$ en cuanto a la regularidad de la sobrecarga columna RPD_6 para $\Delta_Q(W)$).

II. Caso de Estudio de la Planta de Motores de Nissan en Barcelona

Tras ejecutar los cuatro modelos, $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, en el solver Gurobi, con los 23 ejemplares del conjunto de planes de producción NISSAN-9ENG, con un tiempo límite de CPU de $7200\ s$, los resultados obtenidos, en cuanto al valor de la sobrecarga de trabajo generada, se recogen en la tabla 4.5.

Ejemplar	W				W					
	$M3 \cup 4$	$M3 \cup 4_pmr$	$M4 \cup 3$	$M4 \cup 3_pmr$	RPD_1	RPD_2	RPD_3	RPD_4	RPD_5	RPD_6
#1	251	229	187	186	8.76	0.53	25.5	18.34	25.90	18.78
#2	444	473	341	383	-6.53	-12.32	23.20	27.91	13.74	19.03
#3	477	451	427	423	5.45	0.94	10.48	5.32	11.32	6.21
#4	402	419	310	307	-4.23	0.97	22.89	26.01	23.63	26.73
#5	754	763	633	661	-1.19	-4.42	16.05	17.04	12.33	13.37
#6	525	544	413	478	-3.62	-15.74	21.33	24.08	8.95	12.13
#7	818	774	742	731	5.38	1.48	9.29	4.13	10.64	5.56
#8	228	338	139	160	-48.25	-15.11	39.04	58.88	29.82	52.66
#9	824	817	732	751	0.85	-2.6	11.17	10.4	8.86	8.08
#10	1208*	1208*	1208*	1208*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
#11	165	185	78	122	-12.12	-56.41	52.73	57.84	26.06	34.05
#12	406	402	284	287	0.99	-1.06	30.05	29.35	29.31	28.61
#13	383	475	286	336	-24.02	-17.48	25.33	39.79	12.27	29.26
#14	500	478	420	423	4.40	-0.71	16.00	12.13	15.40	11.51
#15	506	562	433	442	-11.07	-2.08	14.43	22.95	12.65	21.35
#16	321	296	227	251	7.79	-10.57	29.28	23.31	21.81	15.20
#17	550	618	478	488	-12.36	-2.09	13.09	22.65	11.27	21.04
#18	673	717	605	619	-6.54	-2.31	10.10	15.62	8.02	13.67
#19	949	945*	945*	945*	0.42	0.00	0.42	0.00	0.42	0.00
#20	233	259	139	150	-11.16	-7.91	40.34	46.33	35.62	42.08
#21	652	628	560	561	3.68	-0.18	14.11	10.83	13.96	10.67
#22	1006	1003	987	984	0.30	0.30	1.89	1.6	2.19	1.89
#23	188	193	140	121	-2.66	13.57	25.53	27.46	35.64	37.31
Promedio	-	-	-	-	-4.60	-5.79	19.66	21.83	16.08	18.66

Tabla 4.5: Valores de sobrecarga (W) y de los ratios ($RPD_1, \ldots, RPD_6$) ($\%$) obtenidos con $M3 \cup 4_pmr$, $M4 \cup 3_pmr$, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, para las instancias del $Bloque - I$ ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$) del conjunto NISSAN-9ENG.

Atendiendo a estos resultados (Tabla 4.5), podemos concluir:

(1) Concediendo un tiempo de ejecución de $7200\ s$, a cada modelo y cada instancia, sólo se puede garantizar la solución óptima en los ejemplares $\#10$ y $\#19$, empleando para ello unos tiempos de CPU de $143\ s$ y $827\ s$, respectivamente.

(2) El modelo $M3 \cup 4_pmr$, con restricciones de preservación del mix de producción, empeora, globalmente, un $4.60\,\%$ los resultados de sobrecarga obtenidos con su modelo de referencia, $M3 \cup 4$ (columna $RPD_1(W)$).

(3) Análogamente, el modelo de referencia $M4 \cup 3$ obtiene mejor promedio en sobrecarga que el modelo $M4 \cup 3_pmr$, sobre el conjunto de los 23 ejemplares, siendo el aumento medio de $M4 \cup 3_pmr$, sobre la sobrecarga media obtenida con $M4 \cup 3$, del $5.79\,\%$ (columna $RPD_2(W)$).

(4) El modelo $M4 \cup 3$ domina o empata, en las 23 instancias, los resultados de mínima sobrecarga de los modelos $M3 \cup 4$ (ver columna $RPD_3(W)$) y $M3 \cup 4_pmr$ (ver columna $RPD_4(W)$). El valor promedio de las mejoras de las soluciones que ofrece el primer modelo, respecto a los otros dos, son del $19.66\,\%$ y $21.83\,\%$, respectivamente.

(5) De forma similar, el modelo $M4 \cup 3_pmr$ domina o empata a los modelos $M3 \cup 4$ (columna $RPD_5(W)$) y $M3 \cup 4_pmr$ (columna $RPD_6(W)$) en todos los ejemplares. En este caso, los valores promedio de las mejoras son del $16.08\,\%$ y del $18.66\,\%$, respectivamente.

Por otra parte, en la tabla 4.6 se recogen los principales resultados relativos a la la regularidad del mix de producción, la regularidad del trabajo requerido, de la sobrecarga y del trabajo completado (resultados completos en tablas B.18 y B.19 del anexo B).

ϵ	$\Delta_Q(X)$			$\Delta_Q(P)$			$\Delta_Q(W)$			$\Delta_Q(V)$		
	RPD_1	RPD_2	RPD_6	RPD_1	RPD_2	RPD_6	RPD_1	RPD_2	RPD_6	RPD_1	RPD_2	RPD_6
#1	95.45	97.73	0	92.66	96.4	0.02	-4.07	7.91	41.12	54.41	81.57	42.06
#2	94.34	92.19	1.87	91.73	89.7	3.26	-31.28	-24.02	36.56	18.68	18.53	25.96
#3	93.22	91.48	0.76	91.62	89.24	5.66	3.09	11.95	14.66	19.21	14.91	3.67
#4	96.6	94.59	-3.55	94.85	92.35	-8.59	-15.86	4.97	48.57	31.2	42.85	42.79
#5	91.22	98.77	8.63	87.83	97.67	12.96	-2.57	-6.74	23.66	1.69	32.93	12.34
#6	93.11	95.78	-6.88	91.37	94.26	-1.33	-10.34	-26.97	23.03	5.13	22.54	19.77
#7	97.68	94.57	4.64	96.47	91.12	20.17	13.63	2.92	9.32	19.19	7.38	0.83
#8	92.7	94.25	26.82	91.02	94.25	-1.07	-96.65	-34.65	74.53	-15.14	73.86	70.56
#9	87.63	96.46	3.26	84.4	94.61	9.32	3.88	-2.33	12.27	10.16	7.85	5.6
#10	88.78	89.59	1.87	81.11	87.04	17.68	5.7	1.61	-3.17	2.78	1.66	-3.24
#11	94.65	96.06	-1.5	93.07	95.25	7.52	-17.92	-266.7	45.48	71.35	84.98	38.91
#12	97.17	97.28	2.42	93.5	96.26	19.28	-9.13	2.75	48.62	30.06	55.05	24.24
#13	94.62	96.95	2.94	91.62	95.59	14.2	-50.85	-23.6	49.03	-7.23	55.88	52.29
#14	95.22	96.03	6.08	93.84	94.35	7.81	-4.93	-2.77	16.98	36.1	33.98	10.15
#15	94.58	96.47	0.25	91.65	94.58	4.25	-30.1	6.21	33.73	19.34	27.38	10.66
#16	92.32	92.56	5.67	89.2	90.42	7.83	0.71	-17.65	31.37	49	43.14	25.57
#17	89.9	92.34	-0.29	83.92	88.91	1.65	-26.24	-2.72	36	-1.83	13.27	15.21
#18	93.97	94.56	-2.51	92.66	92.08	0.37	-15.5	-3.47	23.11	9.99	8.43	17.28
#19	91.4	95.06	-4.79	88.69	94.96	-7.9	3.37	0.38	-4.29	5.34	7.96	-4.15
#20	92.12	96.44	8.71	91.11	96.31	13.23	-26.99	-41.39	67.72	28.27	79.92	57.79
#21	93.29	88.88	1.3	92.15	86.39	-3.21	7.95	-3.47	16.78	21.02	4.66	6.88
#22	96.55	94.27	2.37	91.93	90.16	20.29	1.46	-3.96	5.25	6.57	4.39	-0.49
#23	38.06	92.44	89	89.98	86.55	8.16	-12.67	18.67	56.4	57.47	48.07	7.34
Promedio	91.07	94.55	6.39	90.71	92.54	6.59	-13.71	-17.53	30.73	20.56	33.53	20.96

Tabla 4.6: Valores de los ratios RPD_1, RPD_2 y RPD_6 (%), para las funciones $\Delta_Q(X)$, $\Delta_Q(P)$, $\Delta_Q(W)$ y $\Delta_Q(V)$, obtenidos a partir de los resultados de $M3 \cup 4_pmr$, $M4 \cup 3_pmr$, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, para las instancias del $Bloque - I$ ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$) del conjunto NISSAN-9ENG.

En este caso, los resultados más significativos son:

(1) La incorporación de las restricciones de preservación del mix de producción (ecuación 4.42) sobre los dos modelos de referencia $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ produce, en los 23 ejemplares, una mejora notable en las siguientes funciones:

- La regularidad de la producción (columnas RPD_1 y RPD_2 para $\Delta_Q(X)$), con mejoras del $91.07\,\%$ y del $94.55\,\%$ respecto a $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, respectivamente.
- La regularidad del trabajo requerido (columnas RPD_1 y RPD_2 para $\Delta_Q(P)$), con ganancias medias del $90.71\,\%$ y del $92.54\,\%$ respecto a las soluciones obtenidas con los modelos que no incorporan dichas restricciones ($M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$).

(2) Respecto a los valores promedios de regularidad de la sobrecarga de trabajo, lógicamente, los modelos que no incorporan la regularidad ($M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$) ofrecen mejores resultados que las extensiones de los mismos, que sí la incorporan. Los nuevos modelos ($M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$) empeoran, en media, un $13.71\,\%$ y un $17.53\,\%$ la regularidad de la sobrecarga global generada por sus respectivos modelos de referencia (columnas RPD_1 y RPD_2 para $\Delta_Q(W)$).

Cabe destacar, que los ejemplares que sufren un mayor aumento de sobrecarga, al incorporar la regularidad, son los que presentan la mayor pérdida de regularidad en la sobrecarga. Además, las peores situaciones en cuanto a aumento de sobrecarga (con un aumento de la sobrecarga del $48.25\,\%$, correspondiente al ejemplar $\#8$ con $M3 \cup 4_pmr$, y del $56.42\,\%$, correspondiente al ejemplar $\#11$ con $M4 \cup 3_pmr$) y, por tanto, en cuanto a pérdida de regularidad (con una pérdida de regularidad de la sobrecarga del $96.65\,\%$, en el ejemplar $\#8$, por parte de $M3 \cup 4_pmr$; y una pérdida de $266.7\,\%$ de la regularidad de la sobrecarga generada por la secuencia del ejemplar $\#11$ por el modelo $M4 \cup 3_pmr$), se dan en ejemplares en los que la familia con mayor presencia es la de los motores de camiones.

(3) En cuanto a la regularidad del trabajo completado ($\Delta_Q(V)$), los resultados obtenidos por $M4 \cup 3_pmr$ dominan a los ofrecidos por $M4 \cup 3$ en todos los ejemplares (columna RPD_2 para $\Delta_Q(V)$), con una ganancia media del $33.53\,\%$. Por su lado, el modelo $M3 \cup 4_pmr$ mejora, en promedio, un $20.56\,\%$ los resultados de su modelo de referencia, el $M3 \cup 4$, pero no lo hace individualmente en todos los ejemplares (columna RPD_1 para $\Delta_Q(V)$).

(4) Finalmente, cabe destacar, que el modelo $M4 \cup 3_pmr$ se muestra más competitivo que el modelo $M3 \cup 4_pmr$, en cuanto a los valores obtenidos para la regularidad del trabajo completado y requerido, la regularidad de la sobrecarga y la regularidad de la producción (columnas RPD_6 para $\Delta_Q(P)$, $\Delta_Q(V)$, $\Delta_Q(W)$ y $\Delta_Q(X)$), con unas mejoras medias, de $M4 \cup 3_pmr$ respecto $M3 \cup 4_pmr$, del $6.59\,\%$, $20.96\,\%$, $30.73\,\%$ y $6.39\,\%$, respectivamente.

4.5.2. Evaluación del Modelo Mono-objetivo con Ponderación de Funciones

Ahora, para evaluar el funcionamiento del modelo $M4'_RWR$, se realiza una experiencia computacional consistente en los 225 ejemplares de la literatura (Bautista y Cano, 2008), utilizados tanto en el capítulo anterior, para la evaluación de los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ (Capítulo 3, Sección 3.4, Subsección 3.4.1) como para la evaluación de los modelos $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, propuestos en este mismo capítulo.

Con el fin de poder observar la influencia del peso que se dé a cada una de las dos funciones (W y Δ_P) que componen la función objetivo del modelo ($\Phi(\beta)$), se realiza un barrido del parámetro de ponderación β, con valores comprendidos entre 0 y 1. En concreto, cada ejemplar será resuelto siete veces, una vez por cada valor de $\beta : 0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8$ y 1. De esta manera, se podrá evaluar el modelo, teniendo en cuenta únicamente la minimización de la sobrecarga ($\beta = 1$), la minimización de la no-regularidad del trabajo requerido ($\beta = 0$) y diferentes situaciones intermedias.

Al igual que todas las experiencias computacionales realizadas hasta el momento, para ésta se utiliza un solver de programación matemática. En concreto, como en la experiencia 4.5.1 ("Evaluación de Modelos con Restricciones en el Mix de Producción"), se utiliza el LP Solver of Gurobi Optimizer v4.5.0, en un ordenador Apple Macintosh iMac con un procesador Intel Core i7 2.93 GHz , 8 GB de memoria RAM y el sistema operativo MAC OS X 10.6.7.

Los resultados del experimento se recogen, de forma resumida, en las tablas 4.7 y 4.8 (ver resultados completos en tablas B.21 - B.24 del anexo B).

	$\beta = 1.0$	$\beta = 0.8$	$\beta = 0.6$	$\beta = 0.5$	$\beta = 0.4$	$\beta = 0.2$	$\beta = 0.0$
CPU_{min}	0.02	1.1	1.16	1.03	1.18	1.02	0.55
CPU_{max}	1750.64	3737.33	2578.4	1962.75	1095.92	630.03	30.61
$\overline{CPU}$	57.68	180.58	127.25	104.47	76.08	44.5	10.76

Tabla 4.7: Tiempos de CPU mínimo, máximo y promedio (en segundos) para obtener los óptimos de las 225 instancias con el modelo $M4'_RWR$ en función del coeficiente de ponderación β.

En la tabla 4.7, se observa una reducción progresiva de los tiempos de CPU promedios a medida que decrece el coeficiente de ponderación β, en el rango de valores comprendidos entre 0.8 y 0.0. Dicha reducción promedio corresponde, aproximadamente, a una dieciochoava parte ($180.58\ s$ versus $10.76\ s$).

No obstante, como también puede apreciarse en la figura 4.2, esta tendencia se altera para $\beta = 1.0$, pues se observa que el tiempo de CPU promedio es menor que el que corresponde a $\beta = 0.8$ ($57.68\ s.$ versus $180.58\ s$). Este hecho se puede deber a que, en el caso $\beta = 1.0$, se eliminan implícitamente las variables de discrepancia positiva y negativa en el proceso de optimización, al quedar todas multiplicadas por 0 en la función objetivo.

Por otra parte, atendiendo a los tiempos máximos de CPU, se observa que éstos presentan una tendencia semejante a la que muestran los tiempos promedio, para los distintos valores de β.

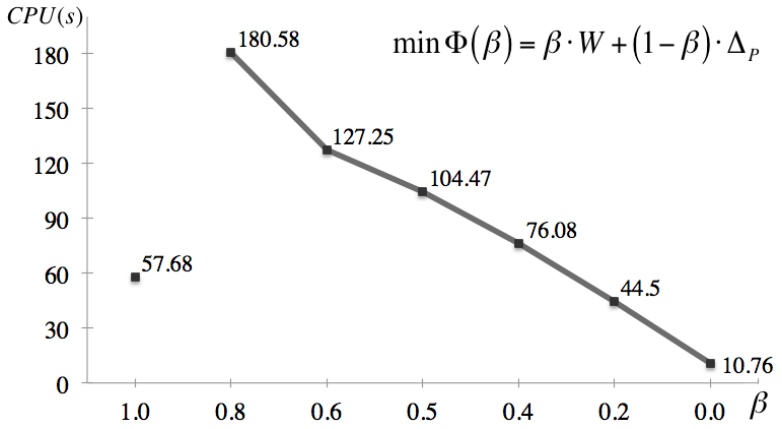


Figura 4.2: Tiempos medios de CPU (segundos) utilizados por $M4'_RWR$ para distintos valores del coeficiente de ponderación β.

De forma similar a la experiencia anterior (Subsección 4.5.1), para poder evaluar la calidad de las soluciones que resultan de la explotación de $M4'_RWR$, se definen dos ratios, cuyos valores se presentan en la tabla 4.8. El primero de ellos, para medir la desviación porcentual relativa entre la sobrecarga total óptima, cuando $\beta = 1$ en $M4'_RWR$ ($W^{\star}$), y el valor óptimo de la sobrecarga total cuando $\beta \neq 1$ ($W^{\star}(\beta)$) y es:

$$RPD_W(\beta, \epsilon) = \frac{\Big(W^{\star}(\beta, \epsilon)\Big) - \Big(W^{\star}(\epsilon)\Big)}{\Big(W^{\star}(\epsilon)\Big)} \cdot 100 \qquad (\beta = 0.8, \ldots, 0.0; \epsilon \in \mathrm{E}) \tag{4.78}$$

Y el segundo ratio (ecuación 4.79), para medir la desviación porcentual relativa entre el valor óptimo de la no-regularidad del trabajo requerido, cuando $\beta = 0$ en $M4'_RWR$, y el valor óptimo de la función de no-regularidad cuando $\beta \neq 0$.

$$RPD_{\Delta_P}(\beta,\epsilon) = \frac{\Big(\Delta_P^{\star}(\beta,\epsilon)\Big) - \Big(\Delta_P^{\star}(\epsilon)\Big)}{\Big(\Delta_P^{\star}(\epsilon)\Big)} \cdot 100 \qquad (\beta = 0.8,\ldots,0.0; \epsilon \in \mathrm{E}) \tag{4.79}$$

	RPD_W							RPD_{Δ_P}						
β	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
$E1$	0	1.64	3.77	4.89	5.73	10.9	34.64	48.94	13.14	6.82	5.06	4.13	2	0
$E2$	0	1.1	1.91	2.66	4.05	9.39	23.31	38.09	10.85	7.44	6.04	4.42	1.35	0
$E3$	0	0.56	1.28	1.82	2.67	4.66	8.35	51.49	11.07	6.52	4.81	3	0.81	0
$E4$	0	0.01	0.03	0.03	0.06	0.15	0.38	47.4	0.62	0.38	0.33	0.24	0.04	0
$E5$	0	1.4	2.88	3.6	5.36	9.42	26.84	38.29	10.85	6.16	4.86	3.43	1.79	0
$B1$	0	0	0.04	0.16	0.27	0.6	1.79	50.69	1.76	1.47	1.26	1.02	0.39	0
$B2$	0	0.87	1.22	1.57	2.08	5.71	11.87	45.86	6.3	3.99	2.94	2.42	0.78	0
$B3$	0	1.42	3.21	4.15	6.16	13.01	36.54	51.61	13.62	8.13	6.59	4.49	1.94	0
$B4$	0	1.31	3.09	3.75	4.96	6.27	22.55	45.47	12.6	5.82	4.76	2.78	1.96	0
$B5$	0	0.92	1.94	2.62	3.51	6.58	17.39	41.53	9.51	5.66	4.25	3.16	1.09	0
$\overline{RPD}$	0	0.94	1.97	2.6	3.57	6.9	18.7	44.84	9.31	5.46	4.22	3.05	1.2	0

Tabla 4.8: Valores de RPD_W y RPD_{Δ_P} (%), por estructuras y bloques, y valores promedio ($\overline{RPD}$) para las soluciones de los 225 ejemplares con $M4'_RWR$, en función del coeficiente de ponderación β.

A partir de los resultados obtenidos y los valores de los ratios calculados (Tabla 4.8) se concluyen los siguientes puntos:

1. Se produce un empeoramiento medio en sobrecarga total (W) que aumenta en progresión, en todas las estructuras de tiempo y en todos los bloques de demanda, a medida que disminuye el valor del coeficiente de ponderación β (valores $\overline{RPD_W}$).

2. Se produce una mejora media en los valores de la función de no-regularidad del trabajo requerido (Δ_P) que disminuye progresivamente, en todas las estructuras y bloques, en sintonía con la disminución β (valores $\overline{RPD_{\Delta_P}}$).

3. La estructura $E4$ se muestra como la más estable ante la variación del coeficiente β, en el rango de valores comprendidos entre 0.0 y 0.8, tanto para los valores de $RPD_W(\beta)$ como para los de $RPD_{\Delta_P}(\beta)$. Mientras, en el resto de estructuras se detectan unos valores similares para $RPD_{\Delta_P}(\beta)$ y algo más dispersos para $RPD_W(\beta)$.

4. El bloque de planes de demanda $B1$ es el más estable frente al resto de bloques. Para el rango de valores de β comprendidos entre 0.0 y 0.8, un empeoramiento medio en W del $1.79\,\%$ supone una mejora media en Δ_P del $1.76\,\%$.

5. Considerando los valores promedio, el empeoramiento medio de la sobrecarga es cercano al $19\,\%$, mientras que la mejora media de la no-regularidad del trabajo requerido es del $45\,\%$, aproximadamente, pasando por puntos intermedios como el $2.60\,\%$ de empeoramiento para W con un $40.62\,\%$ ($44.84 - 4.22 = 4.62$) de mejora para Δ_P y alcanzándose el mejor compromiso en β igual a 0.4 y 0.5 (ver figura 4.3).

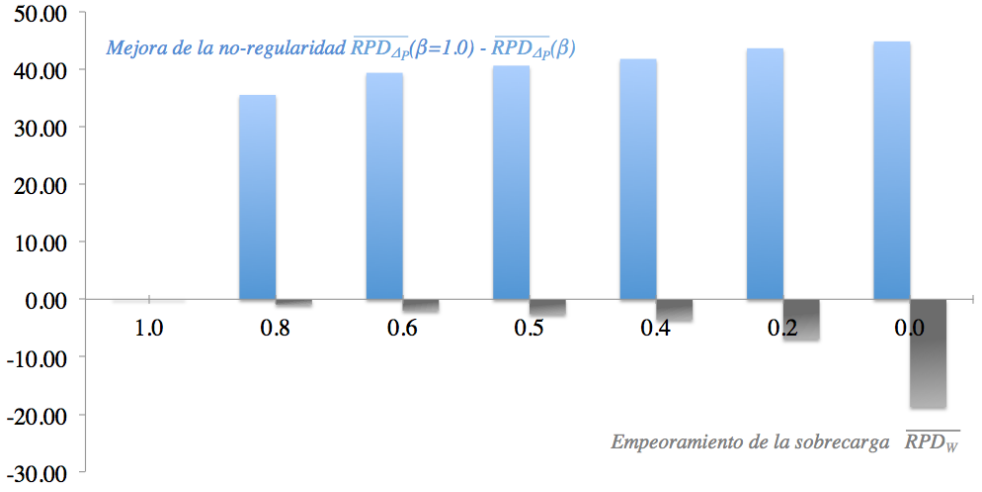


Figura 4.3: Mejora ($\%$) de la no-regularidad del trabajo requerido frente al empeoramiento ($\%$) de la sobrecarga en función del coeficiente de ponderación (β), obtenida con $M4'_RWR$.

4.6. Conclusiones

Este capítulo se ha desarrollado a partir de los modelos $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$ para el *MMSP-W*, propuestos en el capítulo 3, y a partir del modelo de referencia $M4'$, descrito en el capítulo 2, que, con el objetivo de minimizar la sobrecarga global de trabajo, permiten obtener secuencias en líneas de montaje de productos mixtos con estaciones de trabajo dispuestas en serie, con procesadores homogéneos en paralelo, con libre interrupción de las operaciones en cualquier instante posible entre el ciclo (c) y la ventana temporal (l_k).

Específicamente, en esta parte del trabajo, atendiendo al caso de estudio de la planta de motores de Nissan en Barcelona, se ha considerado la conveniencia, para los recursos humanos asignados a la línea, de obtener secuencias de motores de forma que el trabajo requerido a los operarios en todas las estaciones, en una jornada laboral, se distribuya de la manera más homogénea posible a lo largo del tiempo. Esta consideración, analizada bajo distintos enfoques, como son la regularidad del trabajo requerido, del trabajo completado y de la sobrecarga generada, ha conducido a la formulación de diversos modelos, mono y multi-objetivo, para el nuevo problema.

Entre los modelos propuestos, se han seleccionado dos modelos mono-objetivo con restricciones para preservar el mix de producción mientras se fabrican los motores, $M3 \cup 4_pmr$, $M4 \cup 3_pmr$, y un modelo mono-objetivo, $M4'_RWR$, que minimiza la función de sobrecarga global generada y la de no-regularidad en el trabajo requerido, mediante un coeficiente de ponderación.

A partir de los modelos seleccionados, se ha realizado una experiencia computacional dividida en dos grandes bloques. En primer lugar, se ha llevado a cabo un experimento en el que se comparan los resultados obtenidos con los modelos $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, usados como referencia en este capítulo, con los resultados de $M3 \cup 4_pmr$, $M4 \cup 3_pmr$, que restringen la secuencia con el fin de mantener el mix de producción en la misma. Para ello, se han seleccionado los 225 ejemplares de la literatura, utilizados ya en el capítulo anterior, y el $Bloque - I$ del conjunto de datos NISSAN-9ENG.

Tras ejecutar los 225 ejemplares de datos, con los cuatro modelos, en el LP Solver of Gurobi Optimizer v4.5.0, se han obtenido los óptimos en unos tiempos medios de CPU (por ejemplar) iguales a $93.66\ s$, $59.95\ s$, $17.19\ s$, $11.78\ s$, para cada uno de los modelos, respectivamente. Estos resultados permiten observar cómo los modelos con instantes de inicio absolutos ($M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$) se comportan peor que los los modelos con instantes relativos $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$. Además, también se observa que, al incorporar las restricciones de preservación del mix de producción, el tiempo medio de CPU para obtener las soluciones óptimas se reduce a una quinta parte.

Esta reducción de tiempo de CPU de los nuevos modelos, $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, supone un empeoramiento medio del $1.34\,\%$ en cuanto a la sobrecarga global. Sin embargo, en contrapartida, se consigue una mejora media del $18\,\%$ en la regularidad del trabajo requerido y una mejora que supera el $33\,\%$ en la preservación del mix de producción, siendo ambas propiedades deseables en contextos de fabricación *JIT* y *DS*.

Por otro lado, si comparamos los tiempos medios de CPU utilizados por los modelos $M3 \cup 4$ y el $M4 \cup 3$ para resolver los 225 ejemplares de la literatura, mediante el solver CPLEX y el solver Gurobi, se observa que en función del solucionador utilizado los modelos se comportan de forma diferente (ver tiempos consumidos por CPLEX en tabla B.1 y tiempos consumidos por Gurobi en tablas B.5 y B.6 del anexo B).

En concreto, tal y como puede apreciarse en la tabla 4.9, utilizando el solver CPLEX, el modelo con instantes absolutos se comportaba mejor que el modelo con instantes relativos, al contrario de lo que ha pasado con el solver Gurobi.

	$M3 \cup 4$	$M4 \cup 3$
$\overline{CPU}_{CPLEX}$	32.92	81.7
$\overline{CPU}_{Gurobi}$	93.66	59.95

Tabla 4.9: Tiempos promedio de CPU (segundos) utilizados por el solver CPLEX y Gurobi para resolver los 225 ejemplares de la literatura con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$.

En cuanto al caso de estudio de la planta de motores de Nissan en Barcelona, con 23 ejemplares con una demanda total de 270 motores, correspondientes a un día de fabricación con dos turnos de trabajo, los modelos $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$ se han ejecutado con un tiempo límite de CPU de 7200 s por ejemplar.

En este caso, sólo se han obtenido los óptimos en dos de los ejemplares, el $\#10$ y el $\#19$ con los modelos $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$ y en uno, el $\#10$, con $M3 \cup 4$.

En cuanto a la sobrecarga total generada, se observa que los modelos con restricciones en el mix, el $M3 \cup 4_pmr$ y el $M4 \cup 3_pmr$, empeoran los resultados de su modelos de referencia, el $M3 \cup 4$ y el $M4 \cup 3$, un $4.60\,\%$ y un $5.79\,\%$, respectivamente. Además, los resultados muestran cómo el modelo $M4 \cup 3$ domina o empata en todos los ejemplares a todos los modelos, siendo las ganancias medias de un $19.66\,\%$ respecto a $M3 \cup 4$, un $16.08\,\%$ respecto a $M3 \cup 4_pmr$ y un $5.79\,\%$ respecto a su extensión, el modelo $M4 \cup 3_pmr$.

Se puede observar también, si se comparan los resultados de $M4 \cup 3$ con el solver CPLEX y los obtenidos, a partir del mismo modelo, con el solver Gurobi, que este último mejora 17 soluciones y empata 2, alcanzando una ganancia media del $11.24\,\%$ (ver tabla B.20 en anexo B).

Por otro lado, atendiendo a las funciones de regularidad del trabajo requerido, completado y de la producción, se observa que los nuevos modelos, $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, mejoran, en los 23 ejemplares, los resultados de los modelos de referencia, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$. Más detalladamente, la ganancia en regularidad del trabajo requerido que se consigue con ambos modelos, respecto a sus modelos de referencia, es del $90.71\,\%$ y del $92.54\,\%$, respectivamente; la ganancia en regularidad del trabajo completado es del $20.56\,\%$ y del $33.53\,\%$; y la ganancia en la regularidad de la producción es del $91.07\,\%$ y del $94.55\,\%$. Además, se comprueba también que $M4 \cup 3_pmr$ se muestra más competitivo que su equivalente $M3 \cup 4_pmr$, ya que el primero mejora las soluciones del segundo, en cuanto a regularidad del trabajo requerido y completado y a regularidad de la producción en unos porcentajes de $6.59\,\%$, $20.96\,\%$ y del $6.39\,\%$, respectivamente.

Obviamente, todas estas ganancias compensan la pérdida en cuanto a regularidad de la sobrecarga, ya que los nuevos modelos $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$ han empeorado dichos resultados en un $13.71\,\%$ y un $17.71\,\%$, respectivamente. Aún así, el modelo $M4 \cup 3_pmr$ sigue mostrándose más competitivo que su homólogo, mejorando en promedio los resultados de este último un $30.73\,\%$.

Respecto a la segunda parte de la experiencia computacional desarrollada en este capítulo, se ha evaluado el comportamiento del modelo $M4'_RWR$. En concreto, se ha ejecutado dicho modelo para los 225 ejemplares de referencia de la literatura y diferentes escenarios. En cada uno de dichos escenarios se ha asignado un valor al parámetro de ponderación (β) de las funciones a minimizar en la función objetivo, considerando así, por una parte, la minimización de la sobrecarga (W), por otra, la minimización de la no-regularidad del trabajo requerido (Δ_P) y, por último, situaciones intermedias en las que el objetivo era minimizar la suma de ambas.

Los resultados obtenidos han permitido observar que, además de alcanzar todos los óptimos, los tiempos de CPU medios para conseguirlos dependen claramente del valor del coeficiente de ponderación β. De hecho, para valores de β comprendidos entre 0.20 y 0.80 los tiempos medios oscilan entre $44.50\ s$ y $180.58\ s$ por ejemplar. Además, se ha comprobado cómo, en el peor de los casos, la sobrecarga global ha empeorado un $18.70\,\%$ frente a una mejora de la no-regularidad del $44.84\,\%$.

Gracias a los nuevos modelos propuestos y las experiencias computacionales, en este capítulo se han conseguido adaptar los modelos de referencia de la literatura ($M1$, propuesto por Yano y Rachamadugu, 1991 y $M2$, propuesto por Scholl *et al.*, 1998) a situaciones más reales de entornos industriales en sintonía con las ideologías de gestión *JIT* y *DS*.

Obviamente, al restringir la secuencia de unidades mediante las restricciones del mix de producción, los valores de sobrecarga global han sido más elevados. No obstante, las pérdidas sufridas han sido altamente compensadas con la ganancia en regularidad del trabajo completado y requerido y en regularidad de la producción, características que benefician a los recursos humanos, evitándoles picos de trabajo, y al aprovisionamiento de materiales a las estaciones de la línea.

Además, en vista a los resultados obtenidos, podemos concluir que ninguna de las herramientas de resolución de programas matemáticos utilizadas se muestra más competitiva, en cuanto a tiempos de ejecución, que la otra. Ya que, para un modelo, el $M3 \cup 4$, el solver CPLEX obtiene soluciones en menos tiempo de CPU y, para el otro modelo, $M4 \cup 3$, el solucionador más rápido es Gurobi. No obstante, debido a la mejora de 17 soluciones no óptimas, que ofrece el solucionador Gurobi, respecto a las soluciones ofrecidas por CPLEX con el modelo $M4 \cup 3$, en posteriores experiencias computacionales, que se realicen a lo largo de esta tesis, se utilizará Gurobi.

Capítulo 5

INCORPORACIÓN DEL FACTOR DE ACTIVIDAD EN EL *MMSP-W*

5.1. Introducción

Hasta el momento, los modelos de referencia $M3$ y $M4$, formulados a partir de los modelos de la literatura ($M1$ y $M2$), han sido extendidos en cuanto a aspectos productivos con el fin de acercarlos a situaciones reales de entornos industriales.

De hecho, en el capítulo 3 se formularon dos modelos equivalentes para el *MMSP-W*. Dichos modelos, el $M3 \cup 4$ y el $M4 \cup 3$, consideraban vínculos entre estaciones, la posibilidad de que en una estación de trabajo pudiera haber más de un procesador homogéneo y la interrupción de las operaciones en cualquier instante comprendido entre el tiempo de ciclo y la finalización de la ventana temporal. Tras la aplicación de los modelos al caso de estudio NISSAN-9ENG, se observó que, a pesar de que los modelos daban buenos resultados en cuanto a sobrecarga global, ésta se concentraba, mayoritariamente, en cinco de las 21 estaciones de trabajo y debido, sobretodo, a dos de los nueve tipos de motores.

Estos resultados junto con la idea de adaptar los modelos a las filosofías de gestión *JIT* y *DS* dieron lugar, en el capítulo 4, a nuevas extensiones de los modelos de referencia. En esta ocasión, con el fin de regularizar la carga de trabajo y evitar la concentración de sobre-esfuerzos en determinados momentos de la secuencia y determinadas estaciones de trabajo, se introdujo el concepto de regularidad en los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$. Esto provocó, como era de esperar, un aumento en la sobrecarga global generada. No obstante, dicha pérdida se vio compensada por la ganancia en regularidad del trabajo requerido, del trabajo completado y de la producción.

Así, en este capítulo, con el fin de reducir la cantidad de trabajo no completado (sobrecarga), se presenta una extensión del problema *MMSP-W* con minimización de la sobrecarga, estaciones en serie, procesadores homogéneos en paralelo y con tiempos de proceso de las operaciones variables. Esta extensión se basa en la consideración de que los tiempos de proceso de las operaciones pueden contraerse o dilatarse, respecto a los tiempos estándares[1] establecidos, en función del ritmo de trabajo o actividad[2] de los operarios. En particular, el objetivo de esta parte de la investigación es reducir al mínimo la sobrecarga de trabajo y aumentar el ritmo de trabajo cada cierto tiempo de la jornada laboral, teniendo en cuenta las condiciones usuales de las empresas de automoción y la relación entre el rendimiento del operador y su nivel de activación o estrés.

De forma similar al resto de capítulos, en éste se presentan, en primer lugar, una serie de conceptos previos, necesarios para la posterior definición de los nuevos modelos. Después, se describen las diversas funciones que pueden adoptarse para el factor de actividad a lo largo de la jornada laboral. Una vez descritos los modelos y los parámetros necesarios para los mismos, se presenta un ejemplo con el fin de ilustrar el efecto de la variabilidad de los tiempos de proceso de las operaciones. Finalmente, se desarrolla una experiencia computacional basada en el caso de estudio de la planta de motores de Nissan en Barcelona.

Gracias a esta parte de la tesis también se ha conseguido una comunicación a congreso (Bautista, Alfaro, Batalla y Cano, 2013a), un capítulo de libro (Bautista, Alfaro, Batalla y Cano, 2014c) y un artículo en proceso de revisión (Bautista, Alfaro, Batalla y Cano, 2014d).

5.2. Conceptos Previos

Cuando en los entornos de fabricación con sistemas de organización de la producción *JIT* y *DS* intervienen recursos humanos en las operaciones, los tiempos de dichas operaciones se determinan, inicialmente, utilizando el sistema de medición de métodos y tiempos, *MTM*[3], (Methods and Time Measurement system). Estos tiempos corresponden al tiempo requerido por un operador experto medio, trabajando a un ritmo, velocidad o actividad normal, para llevar a cabo una tarea específica mediante un método prescrito, teniendo en cuenta el tiempo para las necesidades personales, la fatiga y el retraso (Lawrence, 2001).

[1] Tiempo requerido para terminar una unidad de trabajo, utilizando un método y equipo estándar, por un trabajador que posee la habilidad requerida, desarrollando una velocidad normal que pueda mantener día tras día, sin mostrar síntomas de fatiga.

[2] Velocidad con la que los procesadores realizan el trabajo que les ha sido asignado.

[3] Sistema de control de tiempos predeterminados, utilizado, principalmente, en entornos industriales para establecer el tiempo estándar de fabricación.

Un operador experto medio puede considerarse como representativo de los trabajadores que realizan la tarea. Éste no es ni el mejor ni el peor, sino que es un operador experto en el trabajo y, por tanto, puede llevar a cabo dicho trabajo a lo largo de toda la jornada laboral.

El ritmo o actividad normal es una velocidad de trabajo que puede mantenerse durante todo un día de trabajo; no es ni muy rápida ni muy lenta; es el ritmo de un trabajador experto medio. Raramente un trabajador desempeña su labor manteniendo un ritmo normal durante toda la jornada de trabajo. A veces, el trabajador puede realizar una tarea a un ritmo de trabajo superior al normal establecido, lo que provoca que el tiempo de proceso de la operación sea menor que el tiempo estándar predeterminado para dicha operación. Otras veces, en cambio, el trabajador puede ir a un ritmo más lento que el normal, consumiendo así más tiempo que el estándar asignado, para realizar la tarea. Por lo tanto, el ritmo de trabajo normal, la actividad normal o la velocidad normal de trabajo representa un ideal que el experto en métodos y tiempos cree que debe ser capaz de mantener, a largo plazo, un operador experto medio.

Los tiempos de proceso de las operaciones determinados en base a las consideraciones anteriores son los tiempos estándares. Estos tiempos se corresponden con un ritmo de trabajo estándar, que es igual a 100 en la escala centesimal, y se toman como referencia en todas las plantas de producción bajo la denominación de MTM_100.

Una vez establecidos los tiempos de proceso MTM_100, las grandes compañías de automoción negocian un conjunto de condiciones, relativas a los puestos de trabajo, con los representantes de los trabajadores. Entre estas condiciones se encuentran las siguientes:

- La duración efectiva de la jornada de trabajo teniendo en cuenta el horario, los descansos y las paradas programadas para los operarios.
- El nivel de actividad o ritmo de trabajo considerado por la empresa como normal y, bajo el cual, se desarrollarán las operaciones a lo largo de la jornada laboral efectiva.

A continuación se detallan cada una de ellas.

5.2.1. La Jornada Laboral

Centrándonos en la jornada laboral europea para el sector de automoción, frecuentemente, empresas y representantes de los trabajadores acuerdan, mediante convenios colectivos, el calendario laboral y la duración efectiva de un turno de trabajo.

El calendario laboral, con un horizonte de un año de duración, se segmenta en semanas numeradas (52 o 53) y sirve para fijar los días laborales del año para el colectivo. En este entorno, es usual que el número de los días considerados como de trabajo, en el calendario laboral de los distintos centros de trabajo (jornada industrial), sea de 225 (Art. 20 del XXI Convenio colectivo de trabajo de la Empresa Nissan Motor Ibérica, 2012-2014).

Estos días laborales pueden tener hasta 3 turnos de 8 horas de presencia, aunque el número de horas efectivas[4] de un turno está comprendido entre 6h 15' y 7h, pues se deja un tiempo a los operarios para cubrir sus necesidades fisiológicas.

Una vez establecidas las horas efectivas de la jornada laboral (H) y el número de unidades a fabricar durante dicha jornada (T), se determina el tiempo de ciclo (c), que es el tiempo concedido a cualquier estación de trabajo para procesar cualquier operación. Obviamente, $c = H/T$.

5.2.2. La Actividad Normal Concertada

A pesar de que las grandes compañías, pertenecientes a la *OCDE* (Organization for Economic Cooperation and Development), preestablecen los tiempos estándar de sus operaciones a partir del método MTM_100, éstas acuerdan, por medio de convenios colectivos, el ritmo de trabajo considerado como normal a partir del cual se determinarán los tiempos normales de proceso de las operaciones.

Habitualmente, en el sector automovilístico, los tiempos de proceso $p_{i,k}$ ($\forall i \in I, \forall k \in K$) se establecen considerando como actividad normal la resultante de la aplicación directa de los tiempos estándar (MTM_100) a actividad 110 (MTM_110) (Art. 11 del XXI Convenio colectivo de trabajo de la Empresa Nissan Motor Ibérica, 2012-2014). Esto supone un cambio de escala en los tiempos de proceso ($p_{i,k} : i \in I,\ k \in K$), pasando de MTM_100 a MTM_110, de la siguiente manera:

$$p_{i,k} = p_{i,k}(MTM_110) = p_{i,k}(MTM_100) \cdot \frac{100}{110} \qquad i = 1, \ldots, |I|; k = 1, \ldots, |K| \tag{5.1}$$

Donde $p_{i,k} = p_{i,k}(MTM_110) : i \in I,\ k \in K$ son los tiempos de proceso (establecidos) requeridos por las unidades de producto a los procesadores de las estaciones de trabajo, cuando éstos trabajan a un ritmo cuyo factor de actividad es $\alpha^N = 1$, es decir, cuando éstos trabajan a actividad normal.

[4] Horas de trabajo productivas.

En tales condiciones, dado un conjunto de tiempos de proceso ($\hat{p}_{i,k} : i \in I,\ k \in K$), obtenidos por observación y cronometraje de las tareas en los puestos de la línea, es fácil determinar los ritmos de trabajo con los que cada procesador desempeñó sus trabajos. Dichos ritmos (actividad) se representan mediante los factores de actividad por producto y estación ($\alpha_{i,k} : i \in I,\ k \in K$) y se calculan imponiendo las siguientes condiciones: $\alpha_{i,k} \cdot \hat{p}_{i,k} = \alpha^N \cdot p_{i,k} : i \in I,\ k \in K$. En definitiva, si $\alpha^N = 1$:

$$\alpha_{i,k} = \frac{p_{i,k}}{\hat{p}_{i,k}} \qquad i = 1, \ldots, |I|; k = 1, \ldots, |K| \tag{5.2}$$

Donde α^N es el factor de actividad asociado a la actividad asumida como normal por la empresa.

Cabe señalar que compañías y representantes de los trabajadores también acuerdan, mediante convenio, el ritmo mínimo y óptimo exigible a partir del ritmo de trabajo establecido como normal. En el caso del ritmo de trabajo mínimo, éste se establece como el $90\,\%$ de la actividad normal y se corresponde con la velocidad mínima de trabajo con la que un procesador puede desarrollar su trabajo en algún momento de su jornada laboral. Por su parte, la actividad óptima, que normalmente corresponde al $120\,\%$ de la actividad normal, representa el ritmo de trabajo máximo que un trabajador puede desarrollar, sin la pérdida de la vida laboral, mientras se trabaja 8 horas al día. Lógicamente, aunque esta actividad se puede requerir a los operadores en algún momento de la jornada de trabajo, cuando la línea de fabricación de productos mixtos requiere más trabajo y para evitar pérdidas de producción, es conveniente establecer secuencias de productos que impidan este tipo de sobre-esfuerzo durante un tiempo prolongado.

Con todo esto, es posible diferenciar entre tres tipos de actividad: la actividad estándar, normal y óptima; estando asociadas cada una de ellas a las escalas de tiempo MTM_100, MTM_110 y MTM_132, respectivamente, y cuyos correspondientes factores de actividad son $\alpha^{\circ}_{i,k} = 0.90$, $\alpha^{N}_{i,k} = 1.00$ y $\alpha^{\star}_{i,k} = 1.20$.

5.3. Incorporando el Factor de Actividad al *MMSP-W*

Antes de formular los nuevos modelos matemáticos para el *MMSP-W* teniendo en cuenta la variación de los tiempos de proceso de las operaciones en función de la actividad con la que trabajan los operarios, se presentan un conjunto de ideas que permitirán establecer funciones para el factor del ritmo de trabajo a lo largo de la jornada laboral y que fijarán los valores de la actividad de los procesadores de la línea a lo largo de tiempo.

5.3.1. El Factor de Actividad a lo largo de la Jornada Laboral

Uno de los estudios más sustantivos sobre la gestión del tiempo y el rendimiento viene de la mano de dos investigadores de Harvard, Robert Yerkes y John Dodson, quienes, en 1908, demostraron que la eficiencia aumenta cuando el estrés aumenta. Sin embargo, esta relación sólo es válida hasta un cierto punto de nivel de tensión, pues después de dicho nivel el rendimiento disminuye drásticamente; dicha relación se denomina ley de Yerkes-Dodson.

Básicamente, los autores, Robert Yerkes y John Dodson, señalan que el operario mejora su rendimiento en la frontera entre el mínimo y el máximo estrés. Esta idea está representada por la curva de Yerkes-Dodson, una curva en forma de -U invertida-, donde el estrés óptimo se halla entre el exceso y el defecto de activación, como se muestra en la figura 5.1. Por lo tanto, se puede establecer que la relación entre el desempeño de un operario y su nivel de "activación", reflejado en su nivel de estrés, sigue una función cóncava (Muse, Harris y Field, 2003).

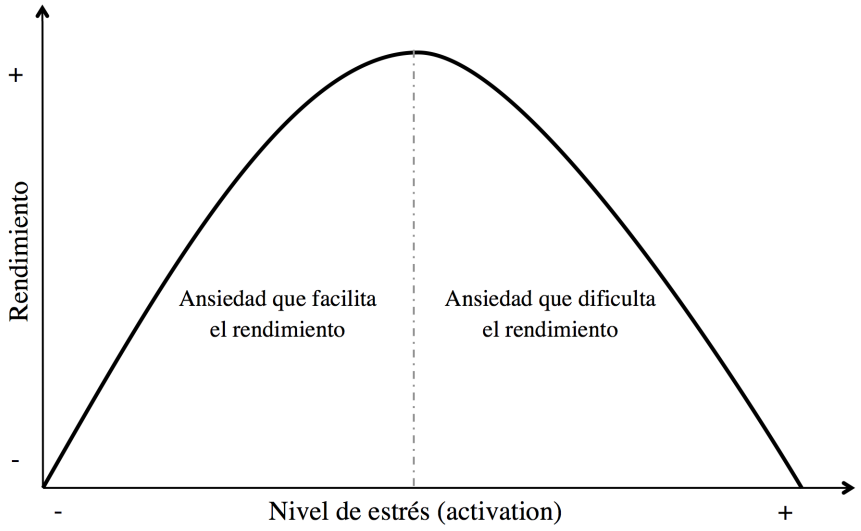


Figura 5.1: Curva de Yerkes-Dodson, -U invertida-.

En base a esta idea y teniendo en cuenta que la actividad de los trabajadores es dinámica y, por tanto, varía a lo largo del tiempo, se puede asociar la eficiencia del operario con el ritmo o actividad de trabajo. En concreto, considerando que la actividad, con la que un operador realiza el trabajo en una unidad de producto, depende del momento y no del producto, es fácil establecer una correlación directa entre el factor de actividad y el nivel de estrés con el tiempo.

De esta manera, las primeras y las últimas unidades de producto de la secuencia se procesarán con menor activación del estrés y, por tanto, a una velocidad de trabajo similar al ritmo normal. Por el contrario, transcurrida la etapa de adaptación, propia del inicio de la jornada laboral, durante los periodos de trabajo en los que el operario alcanza la rutina y, por tanto, aumenta su activación, se incrementará el factor de actividad de trabajo. Este aumento se dará hasta que el operario alcance la fatiga o estrés óptimo, característico del final de la jornada, y a partir del cual la actividad decrecerá hasta alcanzar de nuevo el ritmo de trabajo normal.

En tales condiciones, se pueden determinar diferentes funciones para el factor dinámico de actividad de trabajo a lo largo del tiempo, teniendo en cuenta la curva de estrés óptimo de Yerkes-Dodson y la variación de dicho estrés en distintos momentos de la jornada laboral. En concreto, en esta tesis se proponen cuatro funciones o perfiles para un día de trabajo, compuesto por un turno, y una línea de montaje con un conjunto K de estaciones en serie. Estas funciones implican los siguientes supuestos:

(1) La actividad con la que un operario lleva a cabo el trabajo que se le requiere depende del momento del día y no de la unidad de producto sobre la que trabaje en cada momento. Así, aparece el factor dinámico de actividad $\dot{\alpha}_{k,t}$, asociado con la *t-ésima* unidad secuenciada en la estación k ($k = 1, \ldots, |K|$).

(2) La jornada laboral se compone por T periodos o ciclos (demanda total en un turno de trabajo) y la extensión de dicha jornada, con $T + |K| - 1$ periodos, depende de la línea de montaje. Esta extensión de la jornada laboral incluye T ciclos de producción más $|K| - 1$ ciclos adicionales, necesarios para completar el trabajo requerido por todas las unidades en todas las estaciones.

(3) Todos los operarios que componen los procesadores de las estaciones de trabajo de la línea asumen el mismo factor de actividad para cada periodo de su jornada laboral. Esto es: $\dot{\alpha}_{k,t} = \dot{\alpha}_t$ ($k = 1, \ldots, |K|,\ t = 1, \ldots, T + |K| - 1$).

(4) Se distinguen diferentes intervalos temporales a lo largo de la jornada laboral (T primeros periodos): dos intervalos de hipo-estrés[5], al principio y al final de la jornada, y un intervalo intermedio correspondiente a la activación del estrés[6]. Para diferenciarlos se definen los siguientes parámetros:

- t_0 : Instante de finalización del primer intervalo de hipo-estrés, correspondiente al periodo de adaptación del inicio del turno de trabajo.
- t_∞: Instante final del periodo de activación, a partir del cual se inicia el segundo intervalo de hipo-estrés correspondiente al periodo de fatiga del final del turno de trabajo.

[5]Nivel de estrés inferior al estrés óptimo de activación.
[6]Nivel de estrés en el que el rendimiento del operario es óptimo.

- t_{med}: Instante en el que el operario alcanza su máxima activación. En esta tesis, se corresponde con el instante medio del periodo de activación, comprendido entre t_0 y t_∞.

(5) El factor del ritmo de trabajo no excederá, en ningún momento de la jornada laboral, el factor correspondiente al ritmo de trabajo óptimo (20 % por encima de la actividad normal acordada entre empresa y sindicatos, $\dot{\alpha}_t \leqslant \alpha^\star = 1.2, \forall t \in T + |K| - 1$). Tampoco estará por debajo del factor de actividad correspondiente a una actividad normal, ($\dot{\alpha}_t \geqslant \alpha^N = 1.0, \forall t \in T + |K| - 1$).

(6) Cuando la demanda total se realice en turnos consecutivos, los valores para el factor dinámico del ritmo de trabajo, $\dot{\alpha}_t$, serán idénticos para cada turno (T): $\dot{\alpha}_{t+T} = \dot{\alpha}_t$ ($\forall t \geqslant 0$).

(7) La activación moderada de los operarios durante ciertos periodos persigue lo siguiente:

- Incrementar la productividad y reducir el trabajo perdido (sobrecarga).
- Obtener beneficios adicionales diariamente, mediante el incremento del trabajo completado (V) y compensar económicamente tanto a los operarios como a la compañía.

A continuación se describen las cuatro funciones propuestas para el factor de actividad de trabajo a lo largo de la jornada laboral extendida: la función escalón, ($\dot{\alpha}^S$); la función triangular, ($\dot{\alpha}^T$); la función trapezoidal ($\dot{\alpha}^Z$); y la función parabólica ($\dot{\alpha}^P$). Donde α^0, α^N y α^{max} son los factores de actividad estándar, normal y máximo, respectivamente.

Función escalón, $\dot{\alpha}^S$***:***

$$\dot{\alpha}_t = \alpha^N \qquad (1 \leqslant t \leqslant t_0) \vee (t_\infty + 1 \leqslant t \leqslant T) \tag{5.3}$$

$$\dot{\alpha}_t = \alpha^{max} \qquad (t_0 + 1 \leqslant t \leqslant t_\infty) \tag{5.4}$$

$$\dot{\alpha}_t = \alpha_{t-T} \qquad (T + 1 \leqslant t \leqslant T + |K| - 1) \tag{5.5}$$

$$\overline{\alpha^S} = \frac{1}{T}\left\{\alpha^N\left(T - t_\infty + t_0\right) + \alpha^{max}\left(t_\infty - t_0\right)\right\} \tag{5.6}$$

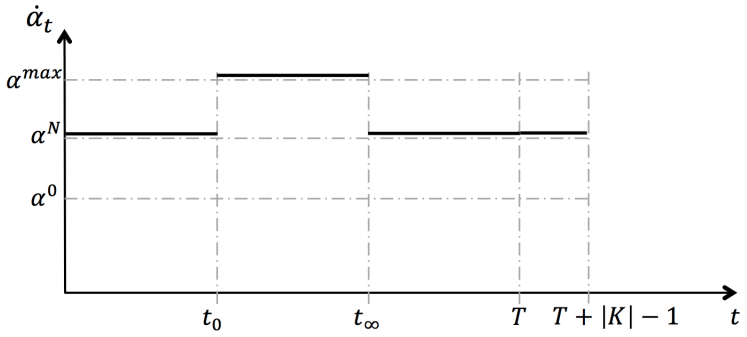


Figura 5.2: Función escalón para el factor dinámico de ritmo de trabajo, $\dot{\alpha}^S$.

Función triangular, $\dot{\alpha}^T$[7]:

$$\dot{\alpha}_t = \alpha^N + \frac{\alpha^{max} - \alpha^N}{t_{med}} \cdot t \qquad (1 \leqslant t \leqslant t_{med}) \tag{5.7}$$

$$\dot{\alpha}_t = \alpha^{max} - \frac{\alpha^{max} - \alpha^N}{t_{med}} \cdot (t - t_{med}) \qquad (t_{med} + 1 \leqslant t \leqslant T) \tag{5.8}$$

$$\dot{\alpha}_t = \alpha_{t-T} \qquad (T + 1 \leqslant t \leqslant T + |K| - 1) \tag{5.9}$$

$$\overline{\alpha^T} = \frac{\alpha^{max} + \alpha^N}{2} \tag{5.10}$$

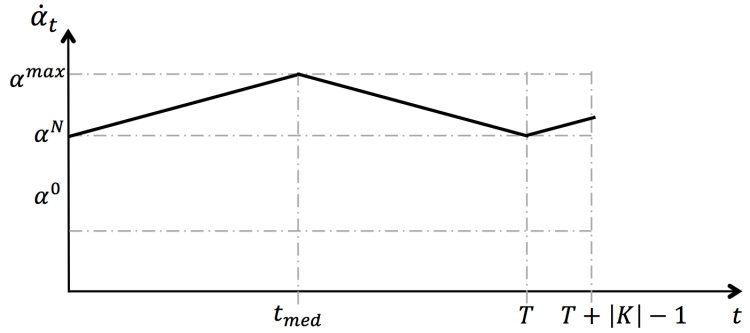


Figura 5.3: Función triangular para el factor dinámico de ritmo de trabajo, $\dot{\alpha}^T$.

Función trapezoidal, $\dot{\alpha}^Z$:

$$\dot{\alpha}_t = \alpha^N + \frac{\alpha^{max} - \alpha^N}{t_0} \cdot t \qquad (1 \leqslant t \leqslant t_0) \tag{5.11}$$

$$\dot{\alpha}_t = \alpha^{max} - \frac{\alpha^{max} - \alpha^N}{T - t_\infty} \cdot (t - t_\infty) \qquad (t_\infty \leqslant t \leqslant T) \tag{5.12}$$

$$\dot{\alpha}_t = \alpha^{max} \qquad (t_0 \leqslant t \leqslant t_\infty) \tag{5.13}$$

$$\dot{\alpha}_t = \alpha_{t-T} \qquad (T + 1 \leqslant t \leqslant T + |K| - 1) \tag{5.14}$$

$$\overline{\alpha^Z} = \frac{1}{T}\left\{\frac{\alpha^{max} + \alpha^N}{2}(T - t_\infty + t_0) + \alpha^{max}(t_\infty - t_0)\right\} \tag{5.15}$$

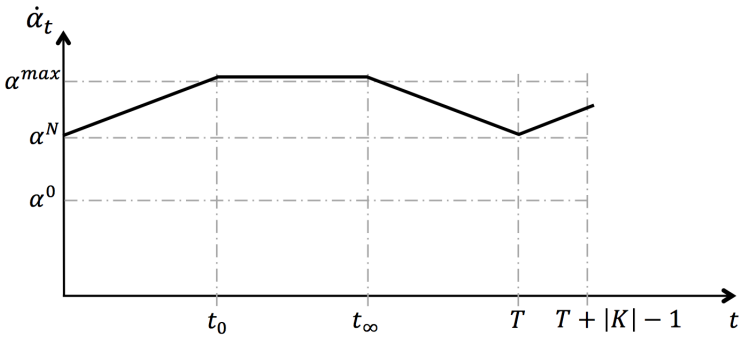


Figura 5.4: Función trapezoidal para el factor dinámico de ritmo de trabajo, $\dot{\alpha}^Z$.

[7]Si t_{med} coincide con la mitad del turno debe tenerse en cuenta si el turno tiene un número de periodos par o impar.

Función parabólica, $\dot{\alpha}^P$***:***

$$\dot{\alpha}\left(t\right) = \dot{\alpha}_t = \alpha^N + 4 \cdot \left(\alpha^{max} - \alpha^N\right) \cdot \frac{t}{T} \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right)^{8} \qquad (1 \leqslant t \leqslant T) \tag{5.16}$$

$$\dot{\alpha}_t = \alpha_{t-T} \qquad (T+1 \leqslant t \leqslant T + |K| - 1) \tag{5.17}$$

$$\overline{\alpha^P} \cong \frac{1}{T}\int_0^T \dot{\alpha}\left(t\right)\,\mathrm{d}t = \alpha^N + \frac{2}{3}\left(\alpha^{max} - \alpha^N\right) \tag{5.18}$$

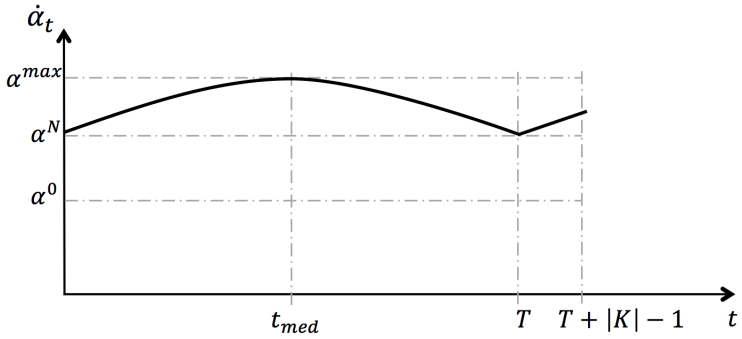


Figura 5.5: Función parabólica para el factor dinámico de ritmo de trabajo, $\dot{\alpha}^P$.

Como vemos, las cuatro funciones seleccionadas representan el nivel de estrés en función del tiempo en la zona de ansiedad positiva que facilita el rendimiento de la curva de Yerkes-Dodson.

5.3.2. Modelos para el *MMSP-W* con Factor dinámico de Actividad de Trabajo

A partir de los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, propuestos en el capítulo 3 (páginas 45 y 46), y los conceptos definidos anteriormente, se formulan dos nuevos modelos matemáticos teniendo en cuenta que la actividad de trabajo puede variar a lo largo de la jornada laboral y que los tiempos de proceso de las operaciones pueden, por tanto, alargarse o contraerse. De esta manera se intenta aumentar la cantidad total de trabajo completado por parte de los procesadores de la línea, aumentando su factor de actividad en ciertos periodos de la jornada laboral y reduciendo, así, la sobrecarga de trabajo. Los parámetros y variables de los nuevos modelos son:

Parámetros	
K	Conjunto de estaciones de trabajo ($k = 1, \ldots, \|K\|$).
b_k	Número de procesadores homogéneos en cada estación de trabajo k ($k = 1, \ldots, \|K\|$).
I	Conjunto de tipos de producto ($i = 1, \ldots, \|I\|$).

[8] Aproximación continua para el rango $[0, T]$ de t.

d_i Demanda programada del tipo de producto i $(i = 1, \ldots, |I|)$.

$p_{i,k}$ Tiempo de proceso (a actividad normal) requerido a cada procesador homogéneo, por una unidad de producto de tipo i $(i = 1, \ldots, |I|)$ en la estación k $(k = 1, \ldots, |K|)$.

T Demanda total. Obviamente: $\sum_{i=1}^{|I|} d_i = T$.

t Indice de posición en la secuencia $(t = 1, \ldots, T)$.

c Tiempo de ciclo. Tiempo estándar asignado a cada procesador homogéneo de las estaciones de trabajo $(k = 1, \ldots, |K|)$ para tratar cualquier unidad de producto.

l_k Ventana temporal. Tiempo máximo que se le permite, a cada procesador homogéneo de la estación k $(k = 1, \ldots, |K|)$, trabajar en cualquier unidad de producto; siendo $l_k - c > 0$ el tiempo máximo que se puede retener una unidad de producto en la estación k, una vez concluido el ciclo.

$\dot{\alpha}_{k,t}$ Factor dinámico de actividad de trabajo asociado a la *t-ésima* operación de la secuencia de productos $(t = 1, \ldots, T)$ en la estación k $(k = 1, \ldots, |K|)$. Nótese que $\alpha_{i,k}$ (ver ecuación 5.2) es el factor de actividad por producto y estación y no depende de la secuencia.

$\dot{\alpha}_t$ Factor dinámico de actividad de trabajo asociado al periodo t $(t = 1, \ldots, T + |K| - 1)$ de la jornada laboral extendida. Esta jornada laboral extendida incluye T ciclos de manufactura (demanda total) más $|K| - 1$ ciclos adicionales, necesarios para completar el trabajo requerido por las unidades de producto en todas las estaciones de trabajo. Nótese que si se asocia el mismo factor dinámico a cada momento de la jornada laboral en todas las estaciones de trabajo, se tiene: $\dot{\alpha}_{k,t} = \dot{\alpha}_{t+k-1}$ $(k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T)$.

Variables

$x_{i,t}$ Variable binaria que adopta el valor 1 si una unidad del producto i $(i = 1, \ldots, |I|)$ se asigna a la posición t $(t = 1, ..., T)$ de la secuencia, y valor 0 en caso contrario.

$s_{k,t}$ Instante de inicio del trabajo aplicado a la *t-ésima* unidad de la secuencia de productos en la estación k $(k = 1, \ldots, |K|)$.

$v_{k,t}$ Tiempo de proceso aplicado, por cada procesador homogéneo (a actividad normal), a la *t-ésima* unidad de producto secuenciada en la estación k $(k = 1, \ldots, |K|)$.

$\hat{s}_{k,t}$ Diferencia positiva entre el instante de inicio real y el mínimo instante de inicio de la *t-ésima* operación en la estación de trabajo k. Se cumple $\hat{s}_{k,t} = [s_{k,t} - (t + k - 2)c]^+$ (con $[x]^+ = max\{0, x\}$).

$w_{k,t}$ Sobrecarga generada en cada procesador homogéneo (a actividad normal), medida en tiempo, por la *t-ésima* unidad de producto secuenciada en la estación de trabajo k $(k = 1, \ldots, |K|)$.

$\hat{v}_{k,t}$ Tiempo de proceso reducido correspondiente a $v_{k,t}$ trabajando con un factor de actividad $\dot{\alpha}_{k,t}$. Se impone: $v_{k,t} = \dot{\alpha}_{k,t} \cdot \hat{v}_{k,t}$ $(k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T)$.

Nótese que si se considera $\dot{\alpha}_{k,t} = 1$ (factor dinámico correspondiente a una actividad normal), los tiempos de proceso corresponden a los tiempos MTM_110. Del mismo modo, las escalas de tiempos MTM_121 y MTM_132 se corresponden, respectivamente, con unos valores para el factor dinámico de actividad de $\dot{\alpha}_{k,t} = 1.1$ y $\dot{\alpha}_{k,t} = 1.2$.

Considerando la relación $\dot{\alpha}_{k,t} = \dot{\alpha}_{t+k-1}$ $(k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T)$ y los parámetros y variables definidos, los nuevos modelos matemáticos para el *MMSP-W* son:

Modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$:

$$\text{máx}\, V = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} v_{k,t} \right) \Longleftrightarrow \text{mín}\, W = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right) \tag{5.19}$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^{T} x_{i,t} = d_i \qquad i = 1, \ldots, |I| \tag{5.20}$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \qquad t = 1, \ldots, T \tag{5.21}$$

$$v_{k,t} + w_{k,t} = \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot x_{i,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.22}$$

$$\dot{\alpha}_{t+k-1} \cdot \hat{v}_{k,t} - v_{k,t} = 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.23}$$

$$s_{k,t} \geqslant \big(t + k - 2\big)c \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.24}$$

$$s_{k,t} \geqslant s_{k,t-1} + \hat{v}_{k,t-1} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 2, \ldots, T \tag{5.25}$$

$$s_{k,t} \geqslant s_{k-1,t} + \hat{v}_{k-1,t} \qquad k = 2, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.26}$$

$$s_{k,t} + \hat{v}_{k,t} \leqslant \big(t + k - 2\big)c + l_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.27}$$

$$v_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.28}$$

$$\hat{v}_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.29}$$

$$w_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.30}$$

$$x_{i,t} \in \{0, 1\} \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{5.31}$$

Modelo $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$:

$$\text{mín}\, W = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right) \Longleftrightarrow \text{máx}\, V = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} v_{k,t} \right) \tag{5.32}$$

Sujeto a:

$$\sum_{t=1}^{T} x_{i,t} = d_i \qquad i = 1, \ldots, |I| \tag{5.33}$$

$$\sum_{i=1}^{|I|} x_{i,t} = 1 \qquad t = 1, \ldots, T \tag{5.34}$$

$$v_{k,t} + w_{k,t} = \sum_{i=1}^{|I|} p_{i,k} \cdot x_{i,t} \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.35}$$

$$\dot{\alpha}_{t+k-1} \cdot \hat{v}_{k,t} - v_{k,t} = 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.36}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant \hat{s}_{k,t-1} + \hat{v}_{k,t-1} - c \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 2, \ldots, T \tag{5.37}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant \hat{s}_{k-1,t} + \hat{v}_{k-1,t} - c \qquad k = 2, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.38}$$

$$\hat{s}_{k,t} + \hat{v}_{k,t} \leqslant l_k \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.39}$$

$$\hat{s}_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.40}$$

$$v_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.41}$$

$$\hat{v}_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.42}$$

$$w_{k,t} \geqslant 0 \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{5.43}$$

$$x_{i,t} \in \{0, 1\} \qquad i = 1, \ldots, |I|; t = 1, \ldots, T \tag{5.44}$$

$$\hat{s}_{1,1} = 0 \tag{5.45}$$

En ambos modelos, las funciones objetivo (5.19) y (5.32) y las restricciones (5.20)-(5.22) y (5.33)-(5.35) coinciden con las funciones objetivo (3.1), (3.12) y las restricciones (3.2)-(3.4) y (3.13)-(3.15) de los modelos de referencia (ver páginas 45 y 46) . Por su parte, las restricciones (5.23) y (5.36) reducen o elongan los tiempos de proceso aplicados en función del factor de trabajo. Las restricciones (5.24) - (5.27) y (5.37) - (5.39) establecen los instantes de inicio absolutos y relativos de las operaciones en cada estación de trabajo, respectivamente, teniendo en cuenta los tiempos de proceso reducidos aplicados. Por último, las restricciones (5.28) - (5.30) y (5.40) - (5.43) de ambos modelos, respectivamente, establecen la no-negatividad de las variables; las restricciones (5.31) y (5.44) imponen la cualidad de binarias a las variables de asignación de las unidades a las posiciones de la secuencia; y la restricción (5.45) establece el instante de inicio de las operaciones en el modelo con la escala de tiempo relativa, el $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$.

Nótese que si $\dot{\alpha}_t = \alpha^N = 1$ ($t = 1, \ldots, T + |K| - 1$), los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$ coinciden con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, respectivamente.

5.4. Un Ejemplo Ilustrativo

Al igual que en capítulos anteriores (capítulos 3 y 4), en esta sección se presenta un ejemplo para ilustrar el efecto de la incorporación del factor de actividad de trabajo en los modelos de referencia ($M4 \cup 3$). En concreto, a partir de los datos del ejemplo (coincidentes con los del ejemplo de la página 48), se resolverá el modelo $M4 \cup 3$ y el $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, fijando los valores del factor de actividad, en éste último, de acuerdo a las siguientes funciones:

- Función Escalón, $\dot{\alpha}^S$: $t_0 = 2$, $t_\infty = 4$, $\alpha^N = 1.0$ y $\alpha^{max} = 1.1$.
- Función Triangular, $\dot{\alpha}^T$: $t_{med} = 3$, $\alpha^N = 1.0$ y $\alpha^{max} = 1.1$.

A modo de resumen, en la siguiente tabla se muestran los datos del ejemplo.

	$A(d_A = 3)$	$B(d_B = 1)$	$C(d_C = 2)$	b_k
m_1	5	4	3	1
m_2	5	4	4	2
m_3	4	3	5	1
Total	19 ($V_0(A) = 57$)	15 ($V_0(B) = 15$)	16 ($V_0(C) = 32$)	$V_0 = 104$

Tabla 5.1: Ejemplo. Tiempos de proceso (en segundos), a actividad normal, requeridos por producto y procesador homogéneo de cada estación,$p_{i,k}$, y número de procesadores homogéneos, b_k, por estación.

Las soluciones obtenidas con el modelo ($M4 \cup 3$) y su extensión ($M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$), con las funciones escalón ($\dot{\alpha}^S$) y triangular ($\dot{\alpha}^T$), se presentan, en forma de diagrama de Gantt, en la figura 5.6.

En base a los resultados obtenidos, observamos los siguientes puntos:

(1) Ninguna solución coincide en cuanto a secuencia ni sobrecarga.

(2) El modelo $M4 \cup 3$ completa un trabajo total de $V = 101$ unidades de tiempo, sobre un total de trabajo requerido de $V_0 = 104$ unidades de tiempo. Por tanto, la sobrecarga generada es $W = 3$ unidades de tiempo. Esta sobrecarga interrumpe el proceso de la unidad A_1 en la estación m_1 y el de la unidad A_3 en la estación m_2.

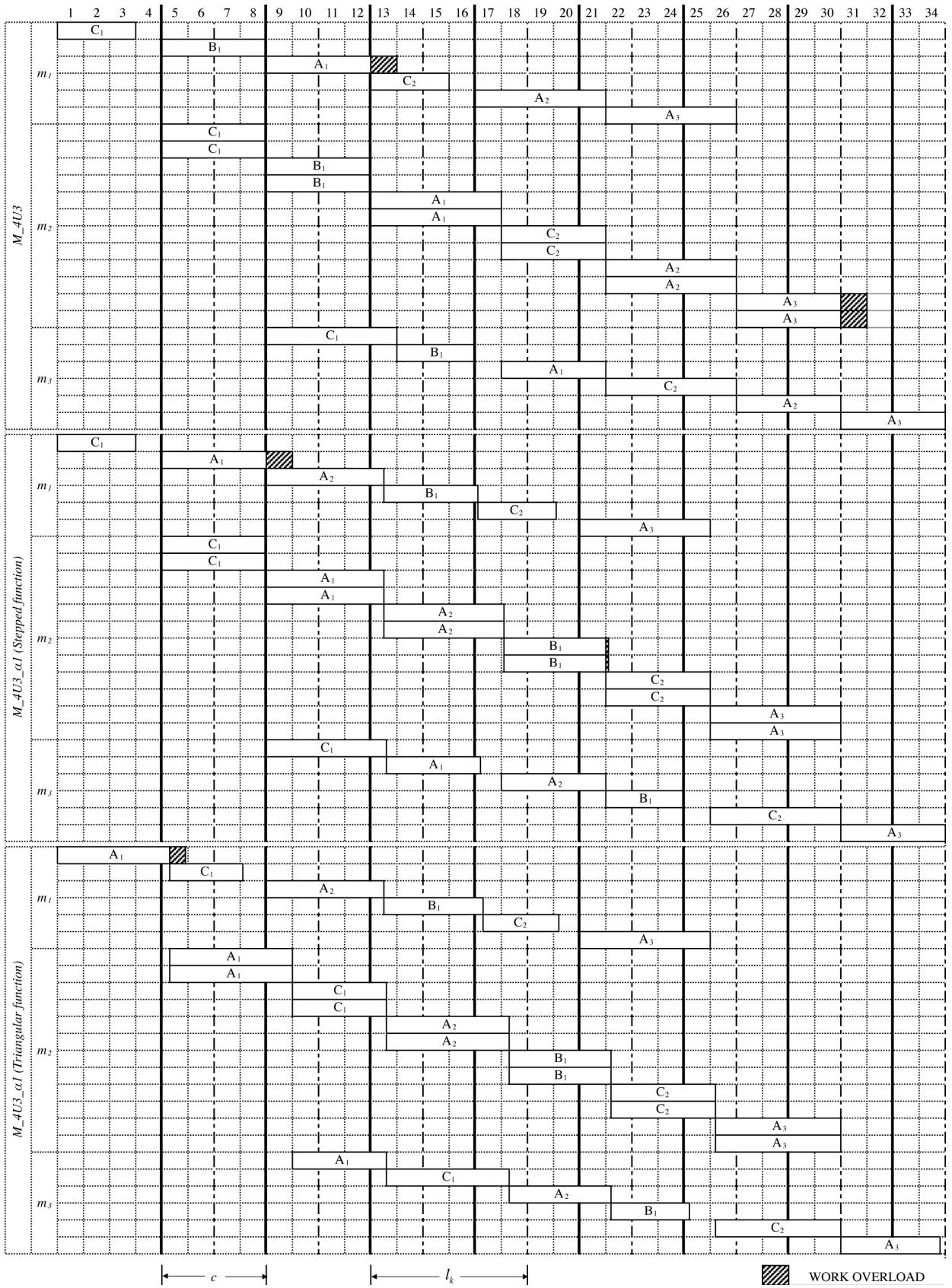


Figura 5.6: Diagrama de Gantt de las soluciones ofrecidas por $M4 \cup 3$ (diagrama superior), $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ (diagrama central) y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)$ (diagrama inferior).

(3) La solución ofrecida por el modelo $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$ reduce la sobrecarga global generada, sea cual sea la función del factor de actividad. En concreto, cuando el factor de actividad sigue una función escalonada a lo largo del tiempo, $\dot{\alpha}^S$, la sobrecarga se reduce a $W = 1.2$ unidades de tiempo. Dicha sobrecarga se debe al producto A_1 en la estación m_1 (1 unidad) y al producto B_1 en la estación m_2 (0.2 unidades, 0.1 por cada procesador homogéneo). En cambio, para una función triangular del factor de actividad, $\dot{\alpha}^T$, la sobrecarga obtenida es de $W = 0.6$ unidades de tiempo, debido al producto A_1 en la estación m_1.

(4) El incremento del ritmo de trabajo en determinados instantes de tiempo, reduce la sobrecarga o trabajo perdido. Esta reducción depende del nivel de activación permitido en cada instante.

Finalmente, la tabla 5.2 recoge los resultados obtenidos, para el ejemplo, con los tres modelos.

	V	W	$w(m_1)$	$w(m_2)$	$w(m_3)$	$s_{\|K\|,T} + \hat{v}_{\|K\|,T}$
$M4 \cup 3$	101.0	3.0	1.0	2.0	0.0	34.0
$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$	102.8	1.2	1.0	0.2	0.0	34.0
$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)$	103.4	0.6	0.6	0.0	0.0	33.8

Tabla 5.2: Resumen de resultados del ejemplo, para los modelos $M4 \cup 3$, $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)$.

5.5. Experiencia Computacional

En esta ocasión, para evaluar los dos modelos propuestos, el $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y el $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, se utilizan los mismos ejemplares de datos que en la experiencia computacional desarrollada en el capítulo 4 (Sección 4.5, página 86), correspondientes a un único día de trabajo ($Bloque - I$) de la planta de motores de Nissan.

Este conjunto E, formado por 23 ejemplares, con una demanda total de $T = 270$ motores cada uno, representa diferentes situaciones, en cuanto al mix de producción, que pueden darse en la línea de motores de la planta de Nissan, compuesta por $|K| = 21$ estaciones.

En efecto, algunos ejemplares tienen una demanda equilibrada para todos los tipos de motores ($p_1, \ldots, p_9$) y otros, presentan mayor o menor predominancia de algunos tipos (ver tablas 3.8 y 3.9 en páginas 56 y 57). De esta manera, podremos observar el efecto de los tiempos de proceso variables, en función del factor de actividad dinámico, sobre los distintos planes de demanda que pueden darse en una planta de producción.

Específicamente, esta parte del estudio se centra en la reducción de la sobrecarga de trabajo, en todos los ejemplares de datos representativos de la variación de la demanda de productos. Esta reducción podrá conseguirse a expensas de un pequeño esfuerzo por parte de los operarios, ya que éstos deberán ajustar su ritmo de trabajo, a lo largo de toda la jornada laboral, a los perfiles o funciones del factor de actividad de trabajo definidas en la sección anterior. Evidentemente, este esfuerzo debería ser compensado económicamente debido al aumento del trabajo completado. Por este motivo, tras la ejecución de los modelos con los 23 ejemplares y las cuatro funciones del factor de ritmo de trabajo definidas ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$, y $\dot{\alpha}^P$), se analizará la calidad de las soluciones y se calcularán las ganancias obtenidas, respecto a los modelos de referencia, en cuanto al trabajo completado.

Como ya se apuntó en las conclusiones del capítulo anterior, para llevar a cabo el experimento, se utiliza el solucionador de programación matemática, LP Solver de Gurobi Optimizador v4.5.0, en un ordenador iMac de Apple Macintosh con un procesador Core i7 de 2.93 GHz Intel y 8 GB de memoria RAM con MAC OS X 10.6.7. Además, cabe destacar que, para la obtención de las soluciones, se permite un tiempo límite de CPU $7200\ s$ para cada modelo y para cada uno de los 23 planes de producción del conjunto de NISSAN-9ENG.

5.5.1. Reducción de la Sobrecarga a través del Aumento del Factor de Actividad

Para poder ejecutar los nuevos modelos y, por tanto, evaluar su comportamiento, es preciso definir, inicialmente, los parámetros implicados en las funciones del factor de actividad dinámico, $\dot{\alpha}_t$. Para ello, se han tenido en cuenta las características de la línea de montaje del caso de estudio que nos ocupa, correspondiente a la línea de motores de la planta de Nissan en Barcelona. Específicamente, en base al convenio colectivo de *NSIO*, que permite aumentar la actividad de los operarios por encima de la normal ($\alpha^N = 1.0$), hasta alcanzar un valor máximo de 1.2 en las puntas de trabajo ($\alpha^\star = 1.2$)(Art. 11 del XXI Convenio colectivo de trabajo de la Empresa Nissan Motor Ibérica, 2012-2014), se ha definido un factor máximo de trabajo de 1.1 ($\alpha^{max} = 1.1$), de forma que en ningún momento se alcance el factor de actividad óptimo permitido.

- Factor de trabajo normal y máximo: $\alpha^N = 1.0$, $\alpha^{max} = 1.1$.

Por otro lado, considerando que los periodos de adaptación, activación y fatiga, propios de un turno de trabajo, tienen la misma duración, se han definido los parámetros temporales de las funciones de actividad (t_0, t_∞ y t_{med}) como sigue:

- Turno 1 (Shift 1): $t_0 = 45$, $t_{med} = 67$, $t_\infty = 90$.
- Turno 2 (Shift 2): $t_0 = 180$, $t_{med} = 202$, $t_\infty = 225$.

Así, por ejemplo, la función escalón ($\dot{\alpha}^S$) del factor de ritmo de trabajo a lo largo de la jornada laboral en el caso de Nissan, queda de la siguiente manera:

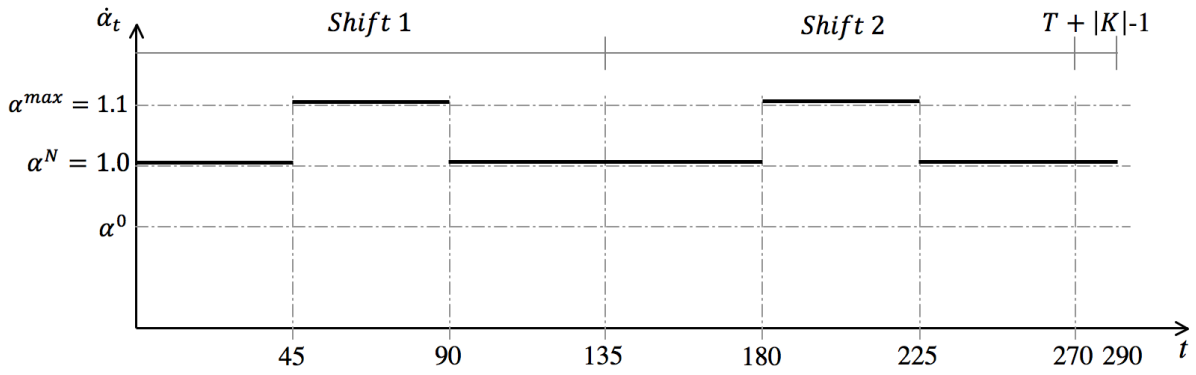


Figura 5.7: Función escalón para el factor de ritmo de trabajo en el caso de Nissan.

Además, teniendo en cuenta que, en el caso de Nissan, todas las estaciones de trabajo están compuestas por un procesador homogéneo, formado por un equipo de dos operarios, y que a su vez, éstos son equivalentes en cuanto a capacidades, se supondrá la misma función del factor de actividad para ambos operarios.

Por otro lado, para poder evaluar los resultados, no sólo en cuanto a sobrecarga, sino también, en cuanto a las mejoras logradas con respecto a las soluciones ofrecidas por los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, se definen cuatro indicadores. Éstos, muy similares a los indicadores definidos en la experiencia computacional del capítulo anterior (ecuaciones 4.72 - 4.77, página 84), miden la desviación porcentual relativa entre dos soluciones dadas respecto a los valores de sobrecarga. Los indicadores son:

$$RPD_7\big(W,\epsilon\big) = \frac{W_{3\cup4}(\epsilon) - W_{3\cup4_\dot{\alpha}I}(\epsilon)}{W_{3\cup4}(\epsilon)} \cdot 100 \qquad (\epsilon \in \mathrm{E}) \tag{5.46}$$

$$RPD_8\big(W,\epsilon\big) = \frac{W_{4\cup3}(\epsilon) - W_{3\cup4_\dot{\alpha}I}(\epsilon)}{W_{4\cup3}(\epsilon)} \cdot 100 \qquad (\epsilon \in \mathrm{E}) \tag{5.47}$$

$$RPD_9\big(W,\epsilon\big) = \frac{W_{3\cup4}(\epsilon) - W_{4\cup3_\dot{\alpha}I}(\epsilon)}{W_{3\cup4}(\epsilon)} \cdot 100 \qquad (\epsilon \in \mathrm{E}) \tag{5.48}$$

$$RPD_{10}\big(W,\epsilon\big) = \frac{W_{4\cup3}(\epsilon) - W_{4\cup3_\dot{\alpha}I}(\epsilon)}{W_{4\cup3}(\epsilon)} \cdot 100 \qquad (\epsilon \in \mathrm{E}) \tag{5.49}$$

De forma similar, para las soluciones no óptimas de ambos modelos, se define un indicador de la distancia entre dichas soluciones y los mejores valores encontrados para cada una de ellas. Esto es:

$$RPD_{11}\big(W,\epsilon\big)= \frac{W_{3\cup 4_\dot{\alpha}I}(\epsilon) - Mejor\ Cota_{3\cup 4_\dot{\alpha}I}(\epsilon)}{W_{3\cup 4_\dot{\alpha}I}(\epsilon)} \cdot 100 \qquad (\epsilon \in \mathrm{E}) \tag{5.50}$$

$$RPD_{12}\big(W,\epsilon\big)= \frac{W_{4\cup 3_\dot{\alpha}I}(\epsilon) - Mejor\ Cota_{4\cup 3_\dot{\alpha}I}(\epsilon)}{W_{4\cup 3_\dot{\alpha}I}(\epsilon)} \cdot 100 \qquad (\epsilon \in \mathrm{E}) \tag{5.51}$$

Una vez definidos todos los parámetros, se han ejecutado cada uno de los modelos ($M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$) con cada uno de los ejemplares ($|\mathrm{E}| = 23$) y cada una de las funciones del factor de ritmo de trabajo definidas en la sección 5.3.1 ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$ y $\dot{\alpha}^P$). Además, también se han considerado las funciones lineales, equivalentes al valor medio de las funciones escalón, triangular, trapezoidal y parabólica ($\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^t}$ y $\overline{\alpha^Z} = \overline{\alpha^P}$), con el fin de poder evaluar el efecto de un aumento constante a lo largo de toda la jornada laboral. De esta manera, cada modelo ha sido ejecutado un total de 161 veces.

Los resultados obtenidos (ver tablas B.25, B.26 y B.27 del anexo B), muestran cómo, al incorporar el factor de ritmo de trabajo, se consigue una reducción de la sobrecarga de trabajo respecto a las soluciones ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$. También se observa cómo las soluciones ofrecidas por los modelos y el tiempo necesitado para hallarlas varían en función del nivel de activación del operario a lo largo de la jornada laboral.

En particular, para ambos modelos, se obtienen todas las soluciones óptimas, sin agotar el tiempo máximo de CPU concedido ($7200\ s$) cuando se emplean funciones, para el factor de actividad, en las que la activación del operario se inicia desde principio de la jornada, aumenta progresivamente hasta un punto óptimo y, finalmente, disminuye al final de la jornada. Estas funciones son la triangular ($\dot{\alpha}^T$), la trapezoidal ($\dot{\alpha}^Z$) y la parabólica ($\dot{\alpha}^P$). Concretamente, en estos tres casos, ambos modelos alcanzan las soluciones óptimas en menos de $13\ s$ de tiempo de CPU, ofreciendo una sobrecarga nula ($W = 0$) en todos los planes de demanda y, por tanto, mejorando las soluciones previas en un $100\,\%$. La tabla 5.3 muestra los tiempos de CPU máximos, mínimos y medios, empleados por cada modelo para cada una de las cuatro funciones definidas.

	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$				$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$			
	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\dot{\alpha}^Z$	$\dot{\alpha}^P$	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\dot{\alpha}^Z$	$\dot{\alpha}^P$
CPU_{min}	396.830	1.220	1.124	1.138	348.630	1.194	1.094	1.100
CPU_{max}	7047.20	11.440	1.416	1.380	7132.580	12.031	1.439	1.337
$\overline{CPU}$	5172.340	3.285	1.253	1.230	5377.470	4.140	1.221	1.184

Tabla 5.3: Tiempos, máximos, mínimos y medios, de CPU (en segundos) de los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$ para alcanzar los óptimos con cada una de las funciones del factor de ritmo de trabajo.

		$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$					$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$			
ϵ	$W_{3\cup4}$	$W_{3\cup4_\dot{\alpha}I}$	RPD_7	RPD_8	RPD_{11}	$W_{4\cup3}$	$W_{4\cup3_\dot{\alpha}I}$	RPD_9	RPD_{10}	RPD_{12}
#1	251	0*	100	100	0	187	0*	100	100	0
#2	444	23	94.82	93.26	100	341	12	97.3	96.48	100
#3	477	0*	100	100	0	427	0*	100	100	0
#4	402	0*	100	100	0	310	0*	100	100	0
#5	754	182	75.86	71.25	87.45	633	225	70.16	64.45	89.67
#6	525	93	82.29	77.48	100	413	86	83.62	79.66	100
#7	818	116	85.82	84.37	61.55	742	105	87.16	85.85	57.24
#8	228	0*	100	100	0	139	0*	100	100	0
#9	824	204	75.24	72.13	85.87	732	239	71	67.35	88.07
#10	1208*	459	62	62	2.61	1208*	458	62.09	62.09	2.53
#11	165	0*	100	100	0	78	0*	100	100	0
#12	406	8	98.03	97.18	100	284	0*	100	100	0
#13	383	34	91.12	88.11	100	286	21	94.52	92.66	100
#14	500	55	89	86.9	100	420	46	90.8	89.05	100
#15	506	27	94.66	93.76	100	433	10	98.02	97.69	100
#16	321	0*	100	100	0	227	8	97.51	96.48	100
#17	550	46	91.64	90.38	100	478	53	90.36	88.91	100
#18	673	228	66.12	62.31	90.79	605	198	70.58	67.27	90.13
#19	949	250	73.66	73.54	11.07	945*	242	74.5	74.39	8.13
#20	233	0*	100	100	0	139	0*	100	100	0
#21	652	89	86.35	84.11	100	560	104	84.05	81.43	100
#22	1006	282	71.97	71.43	7.17	987	301	70.08	69.5	12.99
#23	188	0*	100	100	0	140	0*	100	100	0
Promedio ($\forall\epsilon$)			88.63	87.31	49.85			88.79	87.53	49.95

Tabla 5.4: Valores de sobrecarga, W, obtenidos con los modelos $M3 \cup 4$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$, $M4 \cup 3$, $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$; mejora o reducción de la sobrecarga, conseguida por $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ (RPD_7 y RPD_8) y por $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ (RPD_9 y RPD_{10}), respecto a los resultados de $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$; y distancia entre la solución dada por ambos modelos y la mejor cota encontrada por el solucionador (RPD_{11} y RPD_{12}). Las soluciones óptimas están indicadas con un *.

Por el contrario, la tabla 5.4 muestra la sobrecarga obtenida con los modelos de referencia y con los propuestos en este capítulo, el $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y el $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, cuando el factor de ritmo de trabajo sigue una la función escalón ($\dot{\alpha}^S$). En este caso, con cada uno de los nuevos modelos se obtienen ocho soluciones óptimas; siete de las cuales se corresponden a los mismos ejemplares de datos, mientras que una de ellas corresponde a un plan de demanda distinto en cada caso (el ejemplar $\#16$ en el caso de $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y el $\#12$ para $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$). En el resto de ejemplares, a pesar de no alcanzar las soluciones óptimas, los resultados mejoran respecto a los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$.

Específicamente, los resultados que recoge la tabla 5.4 muestran que el incremento del factor de actividad en un $3.\widehat{33}\,\%$[9] (función escalón, $\dot{\alpha}^S$) a lo largo de cada turno de trabajo, consigue una reducción de más del $87\,\%$ de la sobrecarga, respecto a las soluciones de referencia ($W_{3\cup4}$ y $W_{4\cup3}$). En concreto, el modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ reduce la sobrecarga total generada respecto a los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, un $88.79\,\%$ y un $87.31\,\%$, en promedio, respectivamente. Por su lado, el modelo $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$ alcanza unas reducciones medias del $88.79\,\%$ y del $87.53\,\%$ sobre los valores de sobrecarga obtenidos con $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$. Además, se observa que, en promedio, las soluciones encontradas para los 23 ejemplares de datos, se encuentran a un $50\,\%$ de la mejor cota encontrada por el solucionador empleado (RPD_{11} y RPD_{12}).

Cabe destacar, que los modelos también han sido ejecutados considerando funciones lineales constantes para el factor de actividad. Esto es, teniendo en cuenta que los procesadores mantienen el mismo nivel de actividad a lo largo de la jornada de trabajo y estableciendo dicho factor de actividad como el valor promedio (ecuaciones 5.6, 5.10, 5.15 y 5.18) de cada una de las funciones de actividad definidas previamente ($\dot{\alpha}_t = \overline{\dot{\alpha}_t}, \forall t = 1, \ldots, T + |K| - 1$):

- Función escalón: $\overline{\alpha^S} = \frac{1}{135}\left\{1.0 \cdot (135 - 90 + 45) + 1.1 \cdot (90 - 45)\right\} = 1.0\widehat{33}$
- Función triangular: $\overline{\alpha^T} = \frac{1.1+1.0}{2} = 1.05$
- Función trapezoidal: $\overline{\alpha^Z} = \frac{1}{135}\left\{\frac{1.1+1.0}{2}(135 - 90 + 45) + 1.1\,(90 - 45)\right\} = 1.0\widehat{66}$
- Función parabólica: $\overline{\alpha^P} \cong \frac{1}{T}\int_0^T \dot{\alpha}\,(t)\;\mathrm{d}t = 1.0 + \frac{2}{3}\,(1.1 - 1.0) = 1.0\widehat{66}$

Bajo tales circunstancias, los modelos han ofrecido soluciones óptimas con una sobrecarga nula en todos los casos. No obstante, se debe tener en cuenta que esta última opción no considera el periodo de adaptación y el de fatiga, correspondientes al inicio y fin de la jornada de trabajo, respectivamente, y, por tanto, los operarios deberían mantener su esfuerzo a lo largo del tiempo.

[9] Activación media a lo largo de la jornada laboral si el factor de actividad sigue una función escalón.

5.5.2. Análisis de la Calidad de las Soluciones

Los resultados de la experiencia computacional demuestran cómo aumentando la actividad de trabajo, en determinados momentos de la jornada laboral, se consigue una reducción de la sobrecarga. En concreto, se ha visto que con tres de las cuatro funciones para el factor de ritmo de trabajo propuestas, la reducción de la sobrecarga conseguida, respecto a los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, es del $100\,\%$. Sin embargo, dichas funciones no suponen el mismo esfuerzo por parte de los trabajadores.

De hecho, considerando que el factor de actividad normal es $\alpha^N = 1.0$, el aumento medio de actividad que deben llevar a cabo los trabajadores en un turno de trabajo es del $3.\widehat{33}\,\%$, para el caso de la función escalón, del $5\,\%$ para la función triangular y del $6.\widehat{66}\,\%$ para las funciones trapezoidal y parabólica.

Por consiguiente, si se tiene en cuenta que con las funciones triangular, trapezoidal y parabólica se obtuvieron todos los óptimos, con unos valores de sobrecarga nulos ($W = 0$), la mejor función será aquella que implique menor activación. En este caso, dicha función es la función triangular, con tan sólo un $5\,\%$ de activación media.

Descartando las funciones trapezoidal y parabólica, pues alcanzan los mismos resultados que la función triangular pero con un mayor sobre-esfuerzo, y descartando las funciones lineales constantes, pues requieren una activación de los operarios desde el inicio de la jornada, podemos determinar la ganancia (€/*año*) que supone la activación de los trabajadores en determinados momentos de la jornada laboral, ya sea con la función triangular o con la función escalón. De esta manera, podemos tener una idea de la compensación económica que podrían tener los trabajadores por este sobre-esfuerzo.

Así, teniendo en cuenta que el beneficio que supone un motor es de $4000\ €/unidad$, que el tiempo de ciclo es de $175\ s$, que el calendario laboral es de 225 días y que la línea de motores supone un $10\,\%$ sobre el beneficio del producto (Consolidated Operating Profit), podemos determinar las pérdidas máxima[10], media[11] y mínima[12] debida al trabajo no completado obtenido con los modelos de referencia, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, y los modelos aquí propuestos cuando el factor de actividad sigue una función escalón, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ (ver tabla 5.5).

[10]Pérdida debida al plan de producción con mayor sobrecarga.
[11]Pérdidas debidas al promedio de las sobrecargas obtenidas con todos los planes de producción.
[12]Pérdidas debidas al plan de producción con menor sobrecarga.

	$M3 \cup 4$	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$	$M4 \cup 3$	$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$
Pérdida máxima	621,257.14 (#10)	236,057.14 (#10)	621,257.14 (#10)	235,542.86 (#10)
Pérdida mínima	84,857.14 (#11)	0.00	40,114.29 (#11)	0.00
Pérdida media	278,675.78	46,867.08	239,567.70	47,135.40

Tabla 5.5: Pérdidas económicas (€/*año*) máximas, mínimas y medias, debidas al trabajo no completado obtenido con $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$.

De forma similar, a partir de la tabla 5.5 es sencillo determinar la ganancia que se obtiene al aumentar el ritmo de actividad de los procesadores respecto a la situación en la que los operarios trabajan durante toda su jornada con una actividad normal.

En concreto, con cualquiera de los dos modelos propuestos ($M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$), cuando éstos utilizan una función para el factor de ritmo de trabajo triangular, trapezoidal, parabólica, o bien una función lineal constante ($\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$, $\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$), las ganancias obtenidas corresponden a las perdidas obtenidas con sus respectivos modelos de referencia, pues la sobrecarga obtenida es 0 en todos estos casos. Sin embargo, cuando el factor de actividad de los procesadores sigue una función escalón las ganancias obtenidas, mínima, media y máxima, corresponden a la disminución en sobrecarga respecto a los modelos de referencia (p. ej., $(1208 - 459) \times 225 \times 400 \div 175 = 385{,}200.0$) (Tabla 5.6). De esta manera conoceremos el beneficio económico que se obtendría y, por tanto, la cantidad máxima que podría destinarse a la compensación de los operarios por el sobre-esfuerzo exigido.

	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$		$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$	
	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^{T13}$	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$
Ganancia máxima	385,200.00 (#10)	621,257.14 (#10)	385,714.29 (#10)	621,257.14 (#10)
Ganancia mínima	84,857.14 (#11)	84,857.14 (#11)	40,114.29 (#11)	40,114.29 (#11)
Ganancia media	231,808.70	278,675.78	192,432.30	239,567.70

Tabla 5.6: Ganancias (€/*año*) máximas, mínimas y medias, que se pueden obtener mediante el aumento del factor de ritmo de trabajo a lo largo de la jornada laboral.

Los datos reflejados en la tabla 5.6 muestran cómo la ganancia mínima, obtenida con cada uno de los nuevos modelos, coincide para ambas funciones del factor de actividad, debiéndose en todos los casos a la reducción de la sobrecarga del ejemplar #11.

[13] Las ganancias obtenidas con la función triangular coinciden con las correspondientes a las funciones trapezoidal ($\dot{\alpha}^Z$), parabólica ($\dot{\alpha}^P$) y las funciones lineales correspondientes a los valores medios ($\overline{\dot{\alpha}^S}$, $\overline{\dot{\alpha}^T}$, $\overline{\dot{\alpha}^Z}$ y $\overline{\dot{\alpha}^P}$).

Sin embargo, esto no ocurre en el caso de la ganancia media y máxima, donde la función triangular presenta mejores resultados. Específicamente, el aumento del $1.\widehat{6}\,\%$ del factor de actividad promedio, cuando pasamos de la función escalón a la triangular ($\overline{\dot{\alpha}^S} = 1.0\widehat{3}$ versus $\overline{\dot{\alpha}^T} = 1.05$), genera un incremento del $20.2\,\%$ y del $24.5\,\%$ en la ganancia media obtenida con ambos modelos ($M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$), respectivamente. Del mismo modo, en cuanto a la ganancia máxima (correspondiente, en todos los casos, al ejemplar $\#10$), la función triangular proporciona unos beneficios superiores a los de la función escalón, en más de un $61\,\%$.

Por otro lado, teniendo en cuenta que actualmente en el sector de automoción, el coste horario de un operario en España está entre $[20\ ,\ 25]$ €/*h*, muy por debajo de Alemania o Francia, donde los costes están en torno a los $[40\ ,\ 45]$ €/*h*, una actividad media igual a $1.0\widehat{33}$ supondría unos costes adicionales por operario que estarían entre $[0.66\ ,\ 0.825]$ €/*h* en España, y entre $[1.32\ ,\ 1.485]$ €/*h* en Francia o Alemania. Mientras que, una actividad media igual a 1.05 supondría unos costes adicionales por operario que estarían entre $[1\ ,\ 1.25]$ €/*h* en España, y entre $[2\ ,\ 2.25]$ €/*h* en Francia o Alemania.

En tales condiciones, teniendo en cuenta que nuestro caso de estudio se sitúa en España, podemos calcular el sobre-coste derivado del sobre-esfuerzo exigido a los trabajadores. En efecto, considerando las 21 estaciones de trabajo, los dos trabajadores por procesador, los dos turnos que componen cada plan de producción y las funciones para el factor de actividad escalón y triangular, el sobre-coste anual que se tendría estaría en los siguientes conjuntos cerrados:

- Función escalón del factor de actividad: $[81{,}860.63$[14] $\ ,\ 102{,}325.78]$ €/*año-línea*.

- Función triangular del factor de actividad: $[124{,}031.25\ ,\ 155{,}039.06]$ €/*año-línea*.

Por lo tanto, considerando las ganancias medias obtenidas por la reducción de la sobrecarga y los sobre-costes derivados por la compensación del sobre-esfuerzo exigido a los trabajadores, el beneficio neto que se podría obtener al incrementar la actividad de los procesadores en cada una de las situaciones analizadas es (ver tabla 5.7):

[14] 0.66 €/*h* $\times$ 6.5625 *h/turno* $\times 2$ *turnos/día* $\times 225$ *días/año* $\times 21$ *estaciones/línea* $\times 1$ *procesador/estación* $\times 2$ *trabajadores/procesador*

	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$		$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$	
	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^{T15}$	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$
B° *neto máximo*	[303,339.4 , 282,874.2]	[497,225.9 , 466, 218.1]	[303,853.7 , 283,388.5]	[497,225.9 , 466,218.1]
B° *neto mínimo*	[2,996.5 , −17,468.6]	[−39,174.1 , −70,181.9]	[−41,746.3 , −62,211.5]	[−83,917.0 , −114,924.8]
B° *neto medio*	[149,948.1 , 129,482.9]	[154,644.5 , 123,636.7]	[110,571.7 , 90,106.5]	[115,536.5 , 84,528.6]

Tabla 5.7: Beneficio neto (€/*año*) máximo, mínimo y medio, que se podría obtener por la reducción de la sobrecarga de trabajo debida al aumento del factor de ritmo de trabajo, compensando a los trabajadores en base al rango del coste por hora de trabajo en España.

A partir de la 5.7 podemos destacar los siguientes puntos:

1. Las ganancias máximas y medias, debidas a la reducción de la sobrecarga de trabajo por medio del aumento de la actividad de los operarios, ya sea en forma de función escalón, triangular o de forma homogénea a lo largo del tiempo con un valor constante igual al valor medio de dichas funciones, permiten compensar económicamente a los trabajadores. En efecto, aún considerando la mayor compensación por el sobre-esfuerzo exigido (0.825 €/*h*) la compañía obtendría unos beneficios netos de $84{,}528.6$[16] €/*año-línea* en el peor de los casos, y de $466{,}218.1$[17] €/*año-línea*, en el mejor de los casos.

2. La ganancia mínima sólo podría ser compensada en el caso del modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ (beneficio neto de $2{,}996.5$ €/*año-línea*) y considerando un incremento del coste laboral por operario de 0.66 €/*h*. En el resto de casos el sobre-coste de los operarios no se vería compensado por la ganancias obtenidas al reducir la sobrecarga de la línea.

3. La cantidad máxima con la que podría compensarse el sobre-esfuerzo de un trabajador, sin que la empresa se viera repercutida en cuanto a gastos, es 0.323 €/*h-operario*. De esta manera, las ganancias mínimas obtenidas por la reducción de la sobrecarga, en cualquier caso, igualarían el sobre-coste de los operarios.

4. En el caso de la función homogénea en el tiempo con valor constante $1.0\widehat{33}$, el sobre-coste mínimo de los trabajadores de la línea (0.66 €/*h*), se compensa, en todas las situaciones, por las ganancias obtenidas con el modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ (ganancia de $84{,}857.14$ €/*año-línea* frente a sobre-coste de $81{,}860.6$ €/*año-línea*). Sin embargo, en este caso, no se respetarían los periodos de adaptación y de fatiga del inicio y fin del turno de trabajo.

En definitiva, vemos que el aumento del factor de actividad de trabajo genera unas ganancias a la compañía, pues consigue reducir parte o la totalidad del trabajo no completado y, por tanto, consigue reducir los costes derivados de la pérdida de motores en la línea.

[16] Beneficio medio obtenido con el modelo $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)$.
[17] Beneficio máximo obtenido con $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)$.

Además, se ha comprobado que el aumento del factor de actividad puede ser compensado económicamente a los trabajadores, a pesar de que el factor de actividad máximo, al que se somete el trabajador, está dentro de los límites establecidos por convenio.

Por último, si comparamos los resultados por modelos, vemos cómo el modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ proporciona mayores ganancias mínima y media. Sin embargo, debemos tener en cuenta que estos valores se deben a que los resultados de sobrecarga obtenidos, en la peor y en la situación media, con el modelo de referencia $M3 \cup 4$ eran peores que los obtenidos con el modelo $M4 \cup 3$ y, por tanto, la mejora, en términos relativos, es mayor (ver columnas $W_{3\cup4_\dot{\alpha}I}$ y $W_{4\cup3_\dot{\alpha}I}$ de tabla 5.4). De hecho, si observamos las pérdidas debidas a la sobrecarga obtenida con los modelos de referencia (ver tabla 5.5) vemos cómo el modelo $M4 \cup 3$ genera, en promedio, menos del $50\,\%$ de las pérdidas obtenidas con $M3 \cup 4$. De ahí, que la ganancia propiciada por el incremento del factor de actividad sea menor.

5.6. Conclusiones

A lo largo de este quinto capítulo, se han formulado dos nuevos modelos, para el problema *MMSP-W*, que consideran tiempos de proceso de las operaciones variables en función de la activación del trabajador a lo largo de su jornada laboral. En concreto, la activación de los operarios se ha incorporado en el problema mediante un parámetro corrector, llamado factor de ritmo de trabajo, cuyos valores a lo largo de la jornada laboral, se han fijado de acuerdo a diferentes funciones.

Las funciones del factor de ritmo de trabajo a lo largo de la jornada, se han definido sobre la base, de la zona de ansiedad positiva, de la curva de estrés óptimo de Yerkes-Dodson. Estas funciones, establecen al inicio de la jornada el factor de ritmo de trabajo normal (α^N), fijado por las compañías, aumentándolo hasta alcanzar el factor de actividad máximo (α^{max}), y disminuyéndolo de nuevo, drástica o gradualmente, hasta el factor normal, cuando se alcanza la fatiga.

De forma similar, considerando los valores medios del factor de actividad para cada una de las funciones definidas, se han evaluado cuatro funciones lineales en las que el factor de actividad se mantiene constante a lo largo del tiempo.

Con los modelos formulados y las funciones del factor de actividad definidas, se han realizado 322 ejecuciones, una por cada ejemplar de datos del caso NISSAN-9ENG ($|\mathrm{E}| = 23$), por cada modelo ($M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$) y por cada función ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\dot{\alpha}^S}$, $\overline{\dot{\alpha}^T}$ y $\overline{\dot{\alpha}^Z} = \overline{\dot{\alpha}^P}$).

Tras llevar a cabo todas las ejecuciones en el solucionador Gurobi v4.5.0, los resultados reflejan que, tal y como se esperaba, el aumento del ritmo de trabajo en determinados momentos del día reduce considerablemente la sobrecarga total generada. De hecho, con las funciones triangular, trapezoidal y parabólica, la reducción de la sobrecarga es del $100\,\%$ respecto a los resultados obtenidos con los modelos utilizados como referencia ($M3\cup4$ y $M4\cup3$); alcanzando todos los óptimos con una sobrecarga nula ($W = 0$).

Por otro lado, con la función escalón, función en la que el aumento medio del factor de actividad es menor ($3.\widehat{33}\,\%$) se consigue una reducción media de la sobrecarga del $88\,\%$, con una reducción máxima del $100\,\%$ y una reducción mínima del $62\,\%$.

En cuanto a tiempos de CPU, los nuevos modelos se muestran mucho más competitivos que los utilizados como referencia. Ambos modelos, $M3\cup4$ y $M4\cup3$, sólo conseguían alcanzar la solución óptima para dos de los 23 ejemplares, el $\#10$ y el $\#19$, en un máximo de tiempo de CPU de dos horas. Sin embargo, con la incorporación de la variabilidad de la velocidad de trabajo, ambos modelos alcanzan los óptimos para todos los ejemplares, cuando los valores del factor de actividad siguen una función triangular, trapezoidal o parabólica, con unos tiempos de CPU inferiores a 13 segundos en todos los casos. Por su lado, cuando el factor de ritmo de trabajo sigue una función escalón, los modelos alcanzan la solución óptima en 8 de los ejemplares, con un tiempo medio de CPU inferior a $2400\ s$ ($2058.67\ s$ para $M3 \cup 4$ y $2337.41\ s$ para $M4 \cup 3$).

Igualmente, los nuevos modelos se han mostrado competitivos al suponer un incremento del factor de actividad lineal y constante durante toda la jornada laboral. En efecto, para cualquier valor del factor de actividad ($\overline{\dot{\alpha}^S}$, $\overline{\dot{\alpha}^T}$ y $\overline{\dot{\alpha}^Z} = \overline{\dot{\alpha}^P}$) la sobrecarga obtenida, en todos los casos, ha sido $W = 0$, alcanzando así todos los óptimos en un tiempo de CPU inferior a $2\ s$.

Finalmente, en vista de los resultados obtenidos, se han evaluado los ahorros anuales medios que podrían alcanzarse debido al aumento del trabajo completado y la compensación económica que podrían recibir los trabajadores de la línea por el sobre-esfuerzo exigido. Para ello se han seleccionado los resultados correspondientes a las funciones escalón y triangular, debido a que las funciones trapezoidal y parabólica, con un mayor aumento medio del factor de actividad ($6.\widehat{66}\,\%$), proporcionaron los mismos resultados que la triangular, cuyo aumento medio es menor ($5\,\%$); y debido a que, a pesar de obtener buenos resultados, las funciones lineales ($\overline{\dot{\alpha}^S}$, $\overline{\dot{\alpha}^T}$ y $\overline{\dot{\alpha}^Z} = \overline{\dot{\alpha}^P}$) no consideran la variación del estrés a lo largo del tiempo y, por tanto, no contemplan el periodo de adaptación y el de fatiga, propios del inicio y fin de la jornada laboral.

Así, en base a la peor[18], la mejor[19] y la situación media[20] que puede darse en cuanto a disminución de los valores de sobrecarga y teniendo en cuenta el coste que supone la pérdida de un motor (400 €$/unidad$) en la línea, el calendario laboral (225 días) y el tiempo de ciclo de la línea ($c = 175\ s$), se obtiene una ganancia mínima de $0.04\ M$€, una ganancia máxima de $0.38\ M$€ y una ganancia media de $0.19\ M$€cuando se considera la función escalón para el factor de actividad. Mientras que si se considera la función triangular, las ganancias que pueden obtenerse son de $0.04\ M$€*/año*, $0.62\ M$€*/año* y $0.24\ M$€*/año*, considerando la peor[21], la mejor[22] y la situación media[23] respectivamente.

En definitiva, en este capítulo se ha alcanzado el objetivo definido al inicio de este documento, relativo al estudio de la variante del *MMSP-W* que considera tiempos variables en función de la actividad de los operarios. Se han demostrado, mediante la aplicación de un caso de estudio, las hipótesis de partida del estudio de esta variante. En concreto, los resultados obtenidos muestran que es posible que, tanto empresa como operarios, obtengan beneficios sustanciales. Estos beneficios se deben a la reducción drástica del trabajo no completado (sobrecarga de trabajo), que se puede conseguir si los trabajadores aceptan un ligero aumento de su esfuerzo, aumentando su ritmo de trabajo, de acuerdo con un preestablecido perfil o función, a lo largo de la jornada laboral.

[18] $\triangle W_{4\cup3\ vs\ 4\cup3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S,\dot{\alpha}^T,\dot{\alpha}^Z,\dot{\alpha}^P)}(\#11) = 78$.
[19] $\triangle W_{3\cup4\ vs\ 3\cup4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)}(\#10) = 749$ y $\triangle W_{4\cup3\ vs\ 4\cup3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)}(\#10) = 750$.
[20] $\triangle \overline{W}_{4\cup3\ vs\ 4\cup3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)} = 374$.
[21] $\triangle W_{4\cup3\ vs\ 4\cup3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S,\dot{\alpha}^T,\dot{\alpha}^Z,\dot{\alpha}^P)}(\#11) = 78$.
[22] $\triangle W_{3\cup4\ vs\ 3\cup4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T,\dot{\alpha}^Z,\dot{\alpha}^P)}(\#10) = 1208$ y $\triangle W_{4\cup3\ vs\ 4\cup3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T,\dot{\alpha}^Z,\dot{\alpha}^P)}(\#10) = 1208$.
[23] $\triangle \overline{W}_{4\cup3\ vs\ 4\cup3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T,\dot{\alpha}^Z,\dot{\alpha}^P)}(\#11) = 466$.

Capítulo 6

CONTROL DE LA SATURACIÓN DE LAS ESTACIONES DE TRABAJO EN EL *MMSP-W*

6.1. Introducción

Con la incorporación del factor de ritmo de trabajo en el *MMSP-W*, hemos conseguido, en el capítulo anterior, mejorar la productividad un $62\,\%$, como mínimo. Este aumento del trabajo total completado se ha alcanzado a costa de un incremento en la actividad de los operarios, en determinados instantes de su jornada laboral. En concreto, el factor de actividad, correspondiente a cada instante de tiempo, se ha determinado en base a cuatro perfiles, definidos a partir de la ley de Yerkes-Dadson del estrés óptimo y de la consideración del estrés variable en función del tiempo.

Sin embargo, a pesar de apoyar esta variación de ritmos en dicha teoría del aumento de la eficiencia con el aumento del estrés (ver figura 5.1, página 102) y, a pesar de delimitar el factor de ritmo de trabajo a un mínimo (factor de actividad normal fijado por la compañía, $\alpha^N = 1.0$, correspondiente a tiempos de proceso MTM_110) y un máximo permitidos ($\alpha^{max} = 1.1$, valor inferior al factor óptimo fijado por la empresa, $\alpha^\star = 1.2$, correspondiente a los tiempos MTM_132), no se ha considerado, hasta el momento, la saturación[1] de los procesadores en las estaciones de trabajo.

Por este motivo, aquí se presentan cuatro nuevos modelos para el *MMSP-W* que consideran, mediante restricciones, la saturación máxima y media a la que puede estar sometido un procesador a lo largo de su jornada laboral. De este modo, el problema no sólo considerará aspectos meramente productivos, sino que, también, considerará condiciones laborales que debe cumplir la empresa.

[1] Proporción de tiempo que el procesador está ocupado, sobre el tiempo total de la jornada laboral.

Al igual que en el resto de capítulos, se utilizarán como referencia los modelos propuestos a lo largo del desarrollo de esta tesis. En concreto, se utilizarán los modelos $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$.

Finalmente, cabe destacar que esta parte de la investigación desarrollada a lo largo de la tesis ha dado como resultado, hasta la fecha, tres comunicaciones a congreso (Bautista *et al.*, 2014a, Bautista *et al.*, 2014b y Bautista *et al.*, 2014e).

6.2. Saturación de los Procesadores de la Línea de Montaje

La saturación a la que pueden estar sometidos los procesadores (operarios) a lo largo de la jornada laboral en una línea de producción, es una de las condiciones, relativas a los puestos de trabajo, que las grandes compañías de automoción negocian con los representantes de los trabajadores. Estos valores, normalmente, se determinan teniendo en cuenta el mix de producción y los tiempos de proceso de las operaciones, correspondientes a la actividad concertada para cada instante de la jornada de trabajo, y se controlan estableciendo unos límites para la saturación máxima y la saturación media (η_{max}^{∞}[2] y η_{med}^{∞}).

La saturación máxima se entiende como la proporción de tiempo que emplea la operación (carga de trabajo) con mayor tiempo de proceso en un momento determinado de la jornada laboral, respecto al tiempo de ciclo disponible para ejecutar dicha operación; mientras que la saturación media, se entiende como la proporción del tiempo requerido por todo el trabajo, respecto al tiempo disponible para completarlo.

Generalmente, en las factorías europeas, cuando se trabaja con factores de actividad, $\alpha_{i,k}$, comprendidos entre 1.0 y 1.2 ($\alpha^N = 1.0 \leqslant \alpha_{i,k} \leqslant 1.2 = \alpha^\star$), correspondientes a los sistemas de tiempos MTM_110 y MTM_132, respectivamente, son usuales los valores límite $\eta_{max}^{\infty} = 1.2$[3] y $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$[4] (Art. 11 del XXI Convenio colectivo de trabajo de la Empresa Nissan Motor Ibérica, 2012-2014).

Una vez establecidos estos valores límite para la saturación de los procesadores de las estaciones de trabajo, todo plan de producción que se lleve a cabo en la línea debe cumplirlos. Para ello, es necesario distinguir entre saturación estática y saturación dinámica.

[2] El símbolo ∞, que ahora llamamos "límite", también puede significar "valor máximo" o "valor admisible".

[3] Saturación máxima permitida, usual en las compañías de automoción europeas. Es un valor fijado mediante los reglamentos de la compañía.

6.2.1. Saturación Estática de la Línea de Montaje

La saturación estática se determina a partir de un tiempo de ciclo (c), una matriz de tiempos de proceso de las operaciones ($\mathrm{P} := (p_{i,k}) : i \in I,\ k \in K$), una matriz de factores de actividad estática ($\mathrm{A} := (\alpha_{i,k}) : i \in I,\ k \in K$) y un plan de demanda ($\vec{d} = (d_1, \ldots, d_{|I|})$) compuesto por T unidades de productos mixtos.

En sintonía con los límites descritos anteriormente, distinguimos entre saturación estática media y saturación estática máxima.

Saturación estática media.

Definimos saturación estática media, $\eta^{\circ}_{med}(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A})$, asociada a cada procesador de la estación de trabajo $k \in K$, al tiempo de ciclo c, al plan de demanda $\vec{d}$, al conjunto de tiempos de proceso P y al conjunto de factores de actividad A, a la proporción de tiempo que necesita cada procesador para completar su trabajo requerido, respecto al tiempo disponible para realizarlo. Esto es:

$$\eta^{\circ}_{med}(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}) = \frac{1}{c \cdot T} \cdot \sum_{i=1}^{|I|} \frac{p_{i,k}}{\alpha_{i,k}} \cdot d_i \qquad k = 1, \ldots, |K| \tag{6.1}$$

Saturación estática máxima.

Llamamos saturación estática máxima, $\eta^{\circ}_{max}(k, c, \mathrm{P}, \mathrm{A})$, asociada a cada procesador de la estación de trabajo $k \in K$, al tiempo de ciclo c, al conjunto de tiempos de proceso P y al conjunto de factores de actividad A, a la proporción de tiempo requerido a cada procesador por la operación más laboriosa, respecto al tiempo de ciclo. Esto es:

$$\eta^{\circ}_{max}(k, c, \mathrm{P}, \mathrm{A}) = \frac{1}{c} \cdot \max_{i \in I} \left\{ \frac{p_{i,k}}{\alpha_{i,k}} \right\} \qquad k = 1, \ldots, |K| \tag{6.2}$$

Así, considerando las condiciones establecidas entre empresa y representantes de los trabajadores, debería cumplirse lo siguiente:

$$\eta^{\circ}_{med}(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}) \leqslant \eta^{\infty}_{med} \qquad k = 1, \ldots, |K| \tag{6.3}$$

$$\eta^{\circ}_{max}(k, c, \mathrm{P}, \mathrm{A}) \leqslant \eta^{\infty}_{max} \qquad k = 1, \ldots, |K| \tag{6.4}$$

Obviamente, a efectos prácticos, para determinar tanto la saturación estática máxima, como la media, de los procesadores de las estaciones de trabajo, dados un plan de producción ($\vec{d}$) y unos tiempos de proceso de las operaciones (P), el conjunto de valores de factores de actividad (A) será independiente de las estaciones de trabajo ($k \in K$) y de los productos ($i \in I$). Por lo tanto, se tendrá en cuenta el valor medio del factor de actividad, determinado a partir de los valores correspondientes a cada momento de la jornada laboral (ver funciones para el ritmo de trabajo, capítulo 5, sección 5.3.1, página 104).

6.2.2. Saturación Dinámica de la Línea de Montaje

Además del concepto de saturación estática, vinculada a un plan de producción, definido anteriormente, podemos hablar de saturación dinámica vinculada a una secuencia de producción. En efecto, dada una secuencia, $\pi(T) = \{\pi_1, \pi_2, \ldots, \pi_T\}$, de T unidades de producto, el tiempo de ciclo c, una matriz de tiempos correspondientes al trabajo completado V ($\mathrm{V} := (v_{k,t}) : k \in K,\ t \in T$) en cada estación y posición de la secuencia y una matriz de factores dinámicos de actividad $\dot{\mathrm{A}}$ ($\dot{\mathrm{A}} := (\dot{\alpha}_{k,t}) : k \in K,\ t \in T$) en cada estación y posición de la secuencia, se puede definir la saturación dinámica media y máxima, por procesador, de la siguiente manera:

$$\eta_{med}\big(k, c, \pi(T), \mathrm{V}, \dot{\mathrm{A}}\big) = \frac{1}{c \cdot T} \cdot \sum_{t=1}^{T} \frac{v_{k,t}}{\dot{\alpha}_{k,t}} \qquad k = 1, \ldots, |K| \tag{6.5}$$

$$\eta_{max}\big(k, c, \pi(T), \mathrm{V}, \dot{\mathrm{A}}\big) = \frac{1}{c} \cdot \max_{1 \leqslant t \leqslant T} \left\{ \frac{v_{k,t}}{\dot{\alpha}_{k,t}} \right\} \qquad k = 1, \ldots, |K| \tag{6.6}$$

Por tanto, para limitar la saturación dinámica máxima y media en las estaciones de la línea, bastará con añadir a los modelos del *MMSP-W* las siguientes restricciones:

$$\frac{v_{k,t}}{\dot{\alpha}_{k,t}} \leqslant \eta^{\infty}_{max} \cdot c \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{6.7}$$

$$\sum_{t=1}^{T} \frac{v_{k,t}}{\dot{\alpha}_{k,t}} \leqslant \eta^{\infty}_{med} \cdot c \cdot T \qquad k = 1, \ldots, |K| \tag{6.8}$$

6.3. Efecto de la Saturación de los Procesadores sobre la Sobrecarga de Trabajo

Es evidente que, por muchas precauciones que se tomen en el diseño de métodos y medida de tiempos mediante el sistema *MTM* (Methods Time Measurement), puede darse el caso en el que se superen los valores límite de saturación, a causa de un plan de demanda muy exigente en carga o de una secuencia de fabricación inapropiada.

Si bien es verdad que la violación de la saturación máxima se considera inaceptable, y requiere recurrir al departamento de métodos y tiempos para buscar alternativas en el montaje que reduzcan los tiempos de proceso, no ocurre lo mismo con la saturación media.

En efecto, el hecho de que la saturación media, ya sea estática o dinámica, supere el valor límite admisible (η^{∞}_{med}) en alguna estación, refleja que los procesadores no dispondrán de tiempo suficiente para completar el trabajo que se les requiere, y, por tanto, aparecerá una sobrecarga de trabajo cuyo valor crecerá frente a la reducción del valor de η^{∞}_{med}.

Ahora, dado un plan de producción ($\vec{d}$), los tiempos de proceso de las operaciones en las estaciones (P) y los valores para el factor de ritmo de trabajo (A), se generará sobrecarga de trabajo no sólo debido únicamente a la variabilidad en los tiempos de proceso de los distintos tipos de productos, sino también, debido a la limitación de la saturación media estática y dinámica.

Así, si consideramos la limitación de la saturación estática media, aparece una sobrecarga de trabajo elemental o inevitable, asociada a cada procesador de la estación $k \in K$. Esto es:

$$w_0(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}, \eta^{\infty}_{med}) = c \cdot T \cdot \max\left\{0, \eta^{\circ}_{med}(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}) - \eta^{\infty}_{med}\right\}^{5} \qquad k = 1, \ldots, |K| \tag{6.9}$$

Y, para determinar la sobrecarga estática de la línea, bastará con agregar las sobrecargas estáticas de sus estaciones multiplicadas por los procesadores que contengan, $\vec{b} = (b_1, \ldots, b_{|K|})$. Consecuentemente, la sobrecarga global inevitable de la línea es:

$$W_0(c, \vec{d}, \vec{b}, \mathrm{P}, \mathrm{A}, \eta^{\infty}_{med}) = \sum_{k=1}^{|K|} b_k \cdot w_0(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}, \eta^{\infty}_{med}) \tag{6.10}$$

[5] $w_0(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}, \eta^{\infty}_{med}) = \left[\sum_{i=1}^{|I|} d_i \cdot \frac{p_{i,k}}{\alpha_{i,k}} - \eta^{\infty}_{med} \cdot c \cdot T\right]^{+}$

Análogamente, las sobrecargas dinámicas asociadas a las estaciones y a la línea se determinan así:

$$w(k, c, \pi(T), \mathrm{V}, \dot{\mathrm{A}}, \eta^{\infty}_{med}) = c \cdot T \cdot \text{máx}\left\{0, \eta^{\circ}_{med}(k, c, \pi(T), \mathrm{V}, \dot{\mathrm{A}}) - \eta^{\infty}_{med}\right\}^{6} \quad k = 1, \ldots, |K| \tag{6.11}$$

$$W(c, \vec{b}, \pi(T), \mathrm{V}, \dot{\mathrm{A}}, \eta^{\infty}_{med}) = \sum_{k=1}^{|K|} b_k \cdot w(k, c, \pi(T), \mathrm{V}, \dot{\mathrm{A}}, \eta^{\infty}_{med}) \tag{6.12}$$

Obviamente, el valor de sobrecarga inevitable que se deriva de la saturación dinámica (W) siempre será igual o mayor que el derivado de la saturación estática (W_0), pues habrá que sumarle a éste último los efectos producidos por la variación de los tiempos de proceso combinados con la secuencia.

6.4. Medidas para reducir la Sobrecarga de Trabajo generada por la Limitación de la Saturación

Ya hemos visto que la limitación de la saturación de los procesadores, puede suponer un aumento en la sobrecarga de trabajo y, por tanto, un aumento de pérdidas económicas. Por este motivo, teniendo presente el objetivo principal del *MMSP-W* y la obligación de respetar los límites de saturación, se proponen las siguientes alternativas para contrarrestar la violación de los límites de la saturación:

1. Recurrir al departamento de métodos y tiempos para buscar alternativas en el montaje que reduzcan los tiempos de proceso. Esta acción no es inmediata porque requiere la intervención de Ingeniería del Producto y del Proceso.

2. Aumentar el nivel de activación de los procesadores (en base al factor de actividad explicado en el capítulo anterior), realizando así, el trabajo asignado a cada uno de ellos en menor tiempo y, por tanto, reduciendo la relación entre el tiempo total disponible y el tiempo de trabajo real, es decir, reduciendo la saturación media. De hecho, para un mismo plan de producción $\vec{d}$, la saturación media, asociada a un procesador, será mayor o menor en función de si el factor de actividad es menor o mayor, respectivamente (tal como puede observarse en la ecuación 6.1).

[6] $w(k, c, \pi(T), \mathrm{V}, \dot{\mathrm{A}}, \eta^{\infty}_{med}) = \left[\sum_{t=1}^{T} \frac{v_{k,t}}{\dot{\alpha}_{k,t}} - \eta^{\infty}_{med} \cdot c \cdot T\right]^{+}$

Obviamente, esta activación no podrá superar, en ningún momento de la jornada laboral, el factor de ritmo de trabajo óptimo ($\alpha^\star = 1.2 : i \in I, k \in K$), fijado por la compañía.

3. Reforzar la línea de producción, aumentando su capacidad, mediante la incorporación de procesadores auxiliares, polivalentes o no, al sistema, de forma que su trabajo se concentre en asistir a todas las estaciones de trabajo sobre-saturadas.

4. Recurrir a la rotación entre estaciones consecutivas. Así, la sobre-saturación de un operador, debida a un determinado puesto de trabajo, puede compensarse, a medio plazo, con saturaciones inferiores de otros puestos de trabajo con mayor calidad ergonómica.
   Cabe destacar, que esta última medida para combatir el exceso de saturación estática media, a medio o largo plazo, no está permitida en empresas occidentales, pertenecientes a la *OCDE*, ya que está totalmente prohibido que, en ningún momento de la jornada laboral, dicha saturación media sobrepase su valor límite. Sin embargo, debido a que otras compañías, situadas en aquellos países en los que no exista dicha limitación, sí lo permiten, desarrollaremos esta acción de forma teórica.

Debido a que la primera medida sale de nuestro alcance y la segunda ya ha sido explicada en el capítulo anterior, a continuación se desarrollan las dos últimas medidas propuestas.

6.4.1. Refuerzos

Conocida la sobrecarga inevitable por estación, tanto la estática como la dinámica, es posible determinar el número de operarios auxiliares, Δb_0, necesarios para completar dicho trabajo inacabado. Este cálculo puede hacerse de tres maneras:

I. ***Número de procesadores auxiliares requeridos por la línea***. A partir del valor de sobrecarga global obtenido, tanto estática como dinámica, y del tiempo total disponible por procesador a lo largo de la jornada laboral podemos obtener una cota inferior del número de procesadores auxiliares. Para ello, deben tenerse en cuenta los siguientes puntos:

   (a) Los procesadores auxiliares son polivalentes y, por tanto, pueden realizar, de forma adecuada, cualquier tarea asignada a cualquier estación de trabajo.

   (b) El desplazamiento entre estaciones se considera despreciable.

   (c) No hay sobrecarga simultánea en el tiempo.

   En tales condiciones, es posible obtener el número de procesadores auxiliares necesarios para completar la sobrecarga estática inevitable de la línea (Δb°) y la sobrecarga dinámica (Δb):

$$\Delta b^{\circ} = \sum_{k=1}^{|K|} b_k \cdot \text{máx}\left\{0, \eta^{\circ}_{med}(k, c, \vec{d}, \text{P}, \text{A}) - \eta^{\infty}_{med}\right\} \tag{6.13}$$

$$\Delta b = \sum_{k=1}^{|K|} b_k \cdot \text{máx}\left\{0, \eta_{med}(k, c, \pi(T), \text{V}, \dot{\text{A}}) - \eta^{\infty}_{med}\right\} \tag{6.14}$$

Este número de procesadores auxiliares, también puede determinarse para una estación concreta ($k \in K$). Así, el número de procesadores adicionales, por cada procesador de la estación k, tanto en la situación estática como dinámica, es:

$$\Delta b^{\circ}_k = \text{máx}\left\{0, \eta^{\circ}_{med}(k, c, \vec{d}, \text{P}, \text{A}) - \eta^{\infty}_{med}\right\} \tag{6.15}$$

$$\Delta b_k = \text{máx}\left\{0, \eta_{med}(k, c, \pi(T), \text{V}, \dot{\text{A}}) - \eta^{\infty}_{med}\right\} \tag{6.16}$$

Y, obviamente, se cumple:

$$\Delta b^{\circ} = \sum_{k=1}^{|K|} b_k \cdot \Delta b^{\circ}_k \tag{6.17}$$

$$\Delta b = \sum_{k=1}^{|K|} b_k \cdot \Delta b_k \tag{6.18}$$

Tal y como se ha indicado, el valor Δb° corresponde a una cota inferior del número de procesadores de refuerzo para contrarrestar el efecto de la saturación estática sobre la sobrecarga de trabajo; y el valor Δb corresponde a una cota inferior del número de procesadores refuerzo para contrarrestar el efecto de la saturación dinámica sobre la sobrecarga de trabajo. Sin embargo, debemos tener en cuenta que, en el cálculo de ambas cotas, se está representando la situación ideal en la que cualquier procesador auxiliar puede realizar, de forma adecuada, cualquier tarea asignada a cualquier estación, que dichos procesadores, pueden desplazarse de una estación a otra en un tiempo despreciable y que la sobrecarga de trabajo no coincide en el tiempo en dos estaciones diferentes.

II. ***Número de procesadores auxiliares por estación***. A partir de la sobrecarga generada por estación y el tiempo total disponible de un procesador para realizar su trabajo en una jornada laboral se puede obtener una cota superior del número de procesadores necesarios para completar la sobrecarga de trabajo. En este caso, la consideración a tener en cuenta es:

(a) Los procesadores auxiliares están especializados en las operaciones asignadas a una única estación y, por tanto, están asignados única y exclusivamente a una estación de trabajo. Esto es, cada estación sobrecargada recibe la asistencia individualizada de un procesador auxiliar especializado.

Así, el número de procesadores especializados necesarios para llevar a cabo el trabajo no completado, debido a la limitación de la saturación estática, en el conjunto de estaciones de la línea, es:

$$\widehat{\Delta b^{\circ}} = \sum_{k=1}^{|K|} \lceil b_k \cdot \Delta b_k^{\circ} \rceil \tag{6.19}$$

Y el número de procesadores refuerzo por estación con sobre-saturación dinámica es:

$$\widehat{\Delta b} = \sum_{k=1}^{|K|} \lceil b_k \cdot \Delta b_k \rceil \tag{6.20}$$

De esta manera consideramos el caso extremo a la opción (I), en el que toda estación con una saturación estática o dinámica media superior al límite establecido ($\eta_{med}^{\circ}(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}) > \eta_{med}^{\infty}$; $\eta_{med}(k, c, \pi(T), \mathrm{V}, \dot{\mathrm{A}}) > \eta_{med}^{\infty}$), recibe la asistencia individualizada de un procesador auxiliar especializado.

III. ***Número de procesadores auxiliares asignados a un conjunto de estaciones***. A partir de la sobrecarga generada por estaciones consecutivas, el tiempo total disponible de un procesador para realizar su trabajo en una jornada laboral y el número máximo de estaciones consecutivas que pueden ser asignadas a un único procesador, podemos determinar el número de procesadores auxiliares necesarios para cada conjunto de estaciones consecutivas. De esta manera se contempla una situación intermedia entre las situaciones anteriores (I y II), en la que un mismo procesador se encarga del refuerzo de un conjunto, más o menos reducido, de estaciones contiguas.

En efecto, definiendo como k_R^{α} y k_R^{ω} como la primera y la última estación de trabajo que requieren refuerzos, respectivamente, y k_R como el número máximo de estaciones consecutivas que pueden ser asignadas a un único procesador refuerzo, podemos determinar el número de segmentos[7] que habrá que reforzar en la línea. Esto es:

$$m_R = \left\lceil \frac{k_R^{\omega} - k_R^{\alpha} + 1}{k_R} \right\rceil \tag{6.21}$$

[7]Conjuntos de estaciones consecutivas.

Y, por tanto, el número de procesadores necesarios para cada segmento $\Lambda_i(k_R)$ ($i = 1, \ldots, m_R$), de longitud máxima k_R, se calcula de la siguiente manera, tanto estática ($\Delta b^\circ(\Lambda_i(k_R))$) como dinámicamente ($\Delta b(\Lambda_i(k_R))$):

$$\widehat{\Delta b^\circ}(\Lambda_i(k_R)) = \left\lceil \sum_{k \in \Lambda_i(k_R)} b_k \cdot \Delta b_k^\circ \right\rceil \qquad i = 1, \ldots, m_R \tag{6.22}$$

$$\widehat{\Delta b}(\Lambda_i(k_R)) = \left\lceil \sum_{k \in \Lambda_i(k_R)} b_k \cdot \Delta b_k \right\rceil \qquad i = 1, \ldots, m_R \tag{6.23}$$

Hasta el momento, sólo hemos considerado el cálculo de procesadores refuerzo. Sin embargo, si consideramos que un procesador puede estar compuesto por uno o más recursos humanos, podemos determinar el número de operarios mínimos necesarios para reforzar la línea. Para ello, designando como $\mathcal{H}$ el número de operarios, o recursos humanos, que componen un procesador, tenemos el número mínimo de recursos humanos auxiliares o refuerzo, de la siguiente forma:

$$\Delta\mathcal{H}^\circ = \lceil \mathcal{H} \cdot \Delta b^\circ \rceil \tag{6.24}$$

$$\Delta\mathcal{H} = \lceil \mathcal{H} \cdot \Delta b \rceil \tag{6.25}$$

Donde $\Delta\mathcal{H}^\circ$ es el número mínimo de operarios refuerzo polivalentes, necesarios para cubrir la sobrecarga inevitable estática de la línea; y $\Delta\mathcal{H}$ el número mínimo de operarios refuerzo polivalentes para eliminar la sobrecarga dinámica debida a la limitación de la saturación media de los procesadores.

De forma similar, tenemos también, el número de operarios especializados, en el conjunto de estaciones, considerando tanto la saturación estática ($\widehat{\Delta\mathcal{H}^\circ}$) como la dinámica ($\widehat{\Delta\mathcal{H}}$) :

$$\widehat{\Delta\mathcal{H}^\circ} = \sum_{k=1}^{|K|} \lceil \mathcal{H} \cdot b_k \cdot \Delta b_k^\circ \rceil \tag{6.26}$$

$$\widehat{\Delta\mathcal{H}} = \sum_{k=1}^{|K|} \lceil \mathcal{H} \cdot b_k \cdot \Delta b_k \rceil \tag{6.27}$$

Y, en el caso intermedio, de disponer de m_R segmentos de k_R estaciones consecutivas, el número de recursos humanos, necesarios por segmento para contrarrestar el efecto de la saturación estática y dinámica media, es:

$$\widehat{\Delta\mathcal{H}^{\circ}}(\Lambda_i(k_R)) = \left\lceil \sum_{k\in\Lambda_i(k_R)} \mathcal{H}\cdot b_k \cdot \Delta b_k^{\circ} \right\rceil \qquad i = 1,\ldots,m_R \tag{6.28}$$

$$\widehat{\Delta\mathcal{H}}(\Lambda_i(k_R)) = \left\lceil \sum_{k\in\Lambda_i(k_R)} \mathcal{H}\cdot b_k \cdot \Delta b_k \right\rceil \qquad i = 1,\ldots,m_R \tag{6.29}$$

Donde los conjuntos o segmentos de estaciones Λ_i quedan definidos así:

$$\begin{aligned}
&\Lambda_i(k_R) = \{k \in K : k^{\alpha}(i) \leqslant k \leqslant k^{\omega}(i)\} && i = 1,\ldots,m_R \\
&k^{\alpha}(i) = k_R^{\alpha} + (i-1)\cdot k_R && i = 1,\ldots,m_R \\
&k^{\omega}(i) = \left\{ \begin{array}{ll} k_R^{\alpha} + i\cdot k_R - 1, & \text{si} \quad 1 \leqslant i < m_R \\ k_R^{\omega}, & \text{si} \quad i = m_R \end{array} \right\}
\end{aligned} \tag{6.30}$$

Obviamente, los segmentos definidos anteriormente son disjuntos[8]. No obstante, se puede permitir que una estación, que requiera refuerzo, sea asistida por más de un procesador de refuerzo, siempre y cuando se imponga la condición de limitar los desplazamientos a k_R estaciones consecutivas. De esta forma, se puede reducir el número de procesadores y de recursos humanos de refuerzo en todo la línea. En efecto, si definimos:

$K_{\Delta b^{\circ}}$ Conjunto de estaciones que requieren procesadores refuerzo.
Esto es: $K_{\Delta b^{\circ}} = \{k \in K : \triangle b_k^{\circ} > 0\}$.

$\overline{\Lambda}_i(k_R)$ Tramo o conjunto de k_R estaciones consecutivas cuya primera estación es i ($i = 1,\ldots,|K| - k_R + 1$). Esto es: $\overline{\Lambda}_i(k_R) = \{k \in K : i \leqslant k \leqslant i + k_R - 1\}$.

$\lambda_{k,i}$ Coeficiente binario que adopta el valor 1 si la estación $k \in K_{\Delta b^{\circ}}$ está contenida en el tramo $\overline{\Lambda}_i(k_R)$, y 0 en caso contrario:

$$\lambda_{k,i} = \left\{ \begin{array}{ll} 1, & \text{si} \quad i \leqslant k \leqslant i + k_R - 1 \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{array} \right\}$$

x_i Variable binaria igual a 1 si se refuerza el tramo $\overline{\Lambda}_i(k_R)$ e igual a 0 en caso contrario.

[8] No comparten estaciones.

Podemos proceder de la siguiente manera:

(1) Determinar el conjunto mínimo de segmentos que cubren las estaciones a reforzar, mediante un sencillo problema de cubrimiento:

$$\text{mín} \sum_{\forall i} x_i \tag{6.31}$$

Sujeto a:

$$\sum_{\forall i} \lambda_{k,i} \cdot x_i \geqslant 1 \qquad \forall k \in K_{\Delta b^\circ} \tag{6.32}$$

$$x_i \in \{0,1\} \qquad \forall i = 1, \ldots, |K| - k_R + 1 \tag{6.33}$$

(2) Dada la solución óptima x_i^* ($\forall i = 1, \ldots, |K| - k_R + 1$) del punto anterior, determinar el número de procesadores y recursos humanos de refuerzo asignados a cada uno de los tramos seleccionados por dicha solución:

$$\widehat{\Delta b^\circ}(\overline{\Lambda}_i(k_R)) = \left\lceil \left(\sum_{k \in \overline{\Lambda}_i(k_R)} x_k^* \right)^{-1} \left(\sum_{k \in \overline{\Lambda}_i(k_R)} b_k \cdot \Delta b_k^\circ \right) \right\rceil \qquad \forall i : x_i^* = 1 \tag{6.34}$$

$$\widehat{\Delta \mathcal{H}^\circ}(\overline{\Lambda}_i(k_R)) = \left\lceil \left(\sum_{k \in \overline{\Lambda}_i(k_R)} x_k^* \right)^{-1} \left(\sum_{k \in \overline{\Lambda}_i(k_R)} \mathcal{H} \cdot b_k \cdot \Delta b_k^\circ \right) \right\rceil \qquad \forall i : x_i^* = 1 \tag{6.35}$$

Nótese que el procedimiento anterior sirve para determinar el número de procesadores, u operarios, necesarios para el cubrir el menor número de conjuntos de estaciones consecutivas con sobrecarga inevitable generada por la limitación de la saturación media estática. Sin embargo, este procedimiento, también podría aplicarse para la saturación dinámica, considerando el conjunto de estaciones que requieren procesadores auxiliares para eliminar la sobrecarga dinámica ($K_{\Delta b}$).

6.4.2. Rotaciones

Las rotaciones entre puestos de trabajo pueden emplearse para mejorar la saturación media de los procesadores (y operarios contenidos en ellos) asignados a dichos puestos de trabajo, pero no, para compensar una violación de la saturación estática media, resultante de un convenio.

No obstante, esta prohibición de la violación de la saturación media, únicamente afecta a la grandes compañías de automoción, pertenecientes a la *OCDE*. Por ello, bajo el supuesto de encontrarnos con alguna compañía que permita la compensación de la sobre-saturación de algunos puestos de trabajo con la bajo-saturación de otros, mediante rotaciones, se definen y desarrollan una serie de conceptos y limitaciones para llevar a cabo esta medida.

En primer lugar, para llevar a cabo las rotaciones, es preciso limitar el número de estaciones de trabajo implicadas y la proximidad entre ellas. Así, se facilitará el aprendizaje de los operarios, por el hecho de encontrarse con operaciones de características similares o que les resulten familiares.

En base a la condición anterior, definimos el parámetro k_r como el número de estaciones consecutivas que pueden rotar entre ellas[9]. Así, se puede definir el número medio de procesadores contenidos en el tramo de la línea $[k, k+k_r-1]$, con k_r estaciones consecutivas:

$$\overline{b_k}(k_r) = \frac{1}{k_r} \sum_{\kappa=k}^{k+k_r-1} b_\kappa \qquad k = 1, \ldots, |K| - k_r + 1 \tag{6.36}$$

Obviamente, k_r debe ser lo suficientemente grande para que la saturación estática media de los tramos no supere el límite η^{∞}_{med}. De hecho, si consideramos una rotación continua de puestos consecutivos, se debe cumplir:

$$\sum_{\kappa=k}^{k+k_r-1} b_\kappa \cdot \eta^{\circ}_{med}(\kappa, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}) \leqslant k_r \cdot \overline{b_k}(k_r) \cdot \eta^{\infty}_{med} \qquad k = 1, \ldots, |K| - k_r + 1 \tag{6.37}$$

Mientras que, si se considera rotación fragmentada[10] bastará con imponer la restricción (6.37) a valores de k iguales a múltiplos de k_r más uno ($k = \dot{k_r} + 1$).

Como puede observarse, la ecuación (6.37) limita la sobre-saturación total de las estaciones en rotación, a la saturación estática media máxima permitida según los convenios de las compañías (η^{∞}_{med}). Por este motivo, y teniendo presente la obligación, por parte de las grandes compañías, de respetar dicha saturación media máxima, en todas y cada una de las estaciones de trabajo, la ecuación (6.37), puede adaptarse con el fin de utilizar las rotaciones para la mejora de la saturación media de las estaciones:

[9] Nótese que este tramo de línea con k_r estaciones consecutivas es similar al parámetro k_R, utilizado para los refuerzos. No obstante, éste último (k_R) hace referencia al número de estaciones consecutivas que pueden ser cubiertas por un único procesador de refuerzo, mientras que k_r hace referencia a las estaciones que pueden sufrir rotaciones por parte de sus procesadores.

[10] Rotación de k_r en k_r estaciones consecutivas.

$$\sum_{\kappa=k}^{k+k_r-1} b_\kappa \cdot \eta^{\circ}_{med}(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}) \leqslant k_r \cdot \overline{b_k}(k_r) \cdot \eta^{\star}_{med} \qquad k = 1, \ldots, |K| - k_r + 1 \tag{6.38}$$

Donde $\eta^{\star}_{med}$ es la saturación media considerada como óptima, tanto por trabajadores como por la compañía. Obviamente, deberá cumplirse: $\eta^{\star}_{med} \leqslant \eta^{\infty}_{med}$ y $\eta^{\circ}_{med}(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}) \leqslant \eta^{\infty}_{med}$ $(\forall k \in K)$.

Lógicamente, para compensar[11] las sobre-saturaciones de trabajo, de algunas estaciones, a medio plazo, o mejorar[12] la saturación media de las estaciones, las rotaciones entre k_r estaciones consecutivas de la línea, deben hacerse a una cadencia razonable. Además, se debe tener en cuenta, que el hecho de que se puedan llevar a cabo rotaciones, exigirá operarios con mayor cualificación, aunque también permitirá incorporar, a la línea de producción, productos más complejos que requieran mayores tiempos de proceso.

En este caso, también se pueden considerar rotaciones entre k_r estaciones consecutivas, ya sea para compensar la sobre-saturación de los procesadores[13], o para mejorar la saturación dinámica media. Así, la saturación dinámica media, por procesador de una estación, puede determinarse como sigue:

$$\eta_{med}\big(k, k_r, c, \pi(T), \mathrm{V}, \dot{\mathrm{A}}\big) = \frac{1}{k_r \cdot \overline{b_k}(k_r) \cdot c \cdot T} \cdot \sum_{t=1}^{T} \left(\sum_{\kappa=k}^{k+k_r-1} b_k \cdot \frac{v_{\kappa,t}}{\dot{\alpha}_{\kappa,t}} \right) \qquad k = 1, \ldots, |K| - k_r + 1 \tag{6.39}$$

Y por tanto, en caso de que se permitan rotaciones con el fin de evitar las sobre-saturaciones medias de los procesadores, la limitación de dicho valor de saturación dinámica media, a la hora de determinar la secuencia, es:

$$\sum_{t=1}^{T} \left(\sum_{\kappa=k}^{k+k_r-1} b_k \cdot \frac{v_{\kappa,t}}{\dot{\alpha}_{\kappa,t}} \right) \leqslant \eta^{\infty}_{med} \cdot k_r \cdot \overline{b_k}(k_r) \cdot c \cdot T \qquad k = 1, \ldots, |K| - k_r + 1 \tag{6.40}$$

Similarmente, en el caso en que las rotaciones se utilicen únicamente para mejorar la saturación media de los procesadores, la limitación de la saturación dinámica media que se tendrá en cuenta a la hora de secuenciar los productos, considerará la saturación media óptima, fijada por empresa y trabajadores ($\eta^{\star}_{med}$). Esto es:

$$\sum_{t=1}^{T} \left(\sum_{\kappa=k}^{k+k_r-1} b_k \cdot \frac{v_{\kappa,t}}{\dot{\alpha}_{\kappa,t}} \right) \leqslant \eta^{\star}_{med} \cdot k_r \cdot \overline{b_k}(k_r) \cdot c \cdot T \qquad k = 1, \ldots, |K| - k_r + 1 \tag{6.41}$$

[11] Siempre que sea posible legalmente.

[12] Cuando no pueda superarse, bajo ningún concepto, la saturación media máxima impuesta por convenio.

[13] Siempre y cuando esté permitido por la compañía.

6.5. Modelos para el *MMSP-W* limitando la Saturación Dinámica Máxima y Media de los Procesadores

En base a algunas de las definiciones de la sección 6.2.2, a continuación se presentan dos nuevos modelos para el *MMSP-W*, considerando los límites de saturación, permitidos en los procesadores de las estaciones de trabajo. En esta ocasión, los modelos utilizados como referencia son el $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y el $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$, por lo que los parámetros y variables utilizados están descritos en la Sección 5.3.2 (ver página 106).

Modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$:

$$\text{máx}\, V = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} v_{k,t} \right) \Longleftrightarrow \text{mín}\, W = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right) \tag{6.42}$$

Sujeto a: Restricciones (5.20) - (5.31) del modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ (ver página 108).

$$\frac{v_{k,t}}{\dot{\alpha}_{k,t}} \leqslant \eta^{\infty}_{max} \cdot c \qquad k = 1, \ldots, |K|; t = 1, \ldots, T \tag{6.43}$$

$$\sum_{t=1}^{T} \frac{v_{k,t}}{\dot{\alpha}_{k,t}} \leqslant \eta^{\infty}_{med} \cdot c \cdot T \qquad k = 1, \ldots, |K| \tag{6.44}$$

Modelo $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$:

$$\text{mín}\, W = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t} \right) \Longleftrightarrow \text{máx}\, V = \sum_{k=1}^{|K|} \left(b_k \sum_{t=1}^{T} v_{k,t} \right) \tag{6.45}$$

Sujeto a: Restricciones (5.33) - (5.45) del modelo $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$ (ver página 109) y restricciones (6.43) - (6.44) del modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$.

En ambos modelos, las restricciones añadidas (ecuaciones (6.7) y (6.8) de Sección 6.2.2) delimitan el valor de la saturación dinámica, máxima y media, asociadas a los procesadores de las estaciones de trabajo, a los valores límite establecidos por la compañía.

Obviamente, si se incorporan a los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ las restricciones (6.43) y (6.44) se pueden obtener dos nuevos modelos, el $M3 \cup 4_\eta$ y $M4 \cup 3_\eta$, que contemplan la limitación de la saturación, para favorecer las condiciones laborales, pero sin incorporar el concepto de ritmo de trabajo.

Del mismo modo, si se considera la posibilidad de realizar rotaciones entre k_r estaciones consecutivas, se pueden obtener nuevos modelos.

Por un lado, sustituyendo, en los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ o $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, la restricción (6.44) por la restricción (6.40) (ver página 138), se obtendrían modelos que, además de considerar, o no, la variación de tiempos en función del factor de actividad, contemplarían la limitación de la saturación dinámica máxima y la limitación de la saturación dinámica media, permitiendo rotaciones para compensar la sobre-saturación de algunos procesadores con la baja-saturación de otros.

Por otro lado, si lo que se permite es mejorar el valor de la saturación dinámica media, habrá que substituir, en los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ o $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, la restricción (6.44) por la restricción (6.41) (ver página 138).

6.6. Experiencia Computacional

A continuación se evaluará, mediante el caso de estudio NISSAN-9ENG[14], el comportamiento de los nuevos modelos propuestos para el *MMSP-W*, el modelo $M3 \cup 4_\eta$, el $M4 \cup 3_\eta$, el $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y el $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, en cuanto a valores de sobrecarga total generada y calidad de las soluciones.

Inicialmente se determinará la saturación estática media y máxima de los procesadores de las estaciones para cada uno de los 23 planes de producción del caso de estudio de Nissan. Del mismo modo, en base a los límites establecidos por convenio ($\eta^{\infty}_{max} = 1.2$ y $\eta^{\infty}_{med} = 0.95$), se calcularán las sobrecargas estáticas inevitables de las estaciones de la línea y la sobrecarga estática global. Esto, nos permitirá comparar, a posteriori, la situación estática frente a la situación dinámica, en la que la sobrecarga de trabajo puede verse afectada no sólo por la limitación de la saturación de los procesadores, sino también, por la variabilidad en los tiempos de proceso de las unidades mixtas.

Posteriormente, se ejecutarán, mediante Gurobi, los 23 ejemplares con los modelos sin activación de los operarios ($M3 \cup 4_\eta$, el $M4 \cup 3_\eta$)[15] y con los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ para las funciones del factor de actividad escalón ($\dot{\alpha}^S$), triangular ($\dot{\alpha}^T$), trapezoidal ($\dot{\alpha}^Z$), parabólica ($\dot{\alpha}^P$) y sus respectivas funciones homogéneas con factor de actividad constante ($\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$ y $\overline{\alpha^Z} = \overline{\alpha^P}$).

[14] 23 ejemplares de Nissan, correspondientes a diferentes planes de producción de 270 motores en un día de trabajo compuesto por dos turnos, ver tablas 3.8 y 3.9 en páginas 56 y 57).

[15] Nótese que los modelos $M3 \cup 4_\eta$ y el $M4 \cup 3_\eta$ son equivalentes a los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ cuando se utiliza la función lineal $\dot{\alpha}^L$ para el factor de actividad.

Tanto para los cálculos previos como para la ejecución de los modelos no se considera la posibilidad de realizar rotaciones ($k_r = 1$) y el valor de la saturación media admisible se fija según el convenio actual de la planta de Nissan en Barcelona, $\eta^{\infty}_{med} = 0.95$.

6.6.1. Cálculos Previos

Para cada ejemplar y cada función del factor de actividad, se calcula la saturación estática máxima (ecuación 6.2) y media (ecuación 6.1), la sobrecarga estática inevitable por procesador[16] (ecuación 6.9) y la sobrecarga estática inevitable de la línea (ecuación 6.10).

Todos estos cálculos se han realizado bajo la hipótesis de partida de que el factor de actividad es independiente del tipo de producto y de la estación, es decir, considerando el valor medio de las posibles funciones del factor de actividad, que son:

- No considerar ninguna activación y, por tanto, emplear la función lineal, $\overline{\alpha^L}$.
- Considerar una activación media correspondiente a la función escalón, $\overline{\alpha^S}$.
- Considerar una activación media correspondiente a la función triangular, $\overline{\alpha^T}$.
- Considerar una activación media correspondiente a la función trapezoidal o parabólica, ya que ambas funciones coinciden en valor medio, $\overline{\alpha^Z} = \overline{\alpha^P}$.

Los resultados obtenidos en cuanto a saturación estática máxima, muestran que ninguna estación de trabajo supera el valor máximo permitido ($\eta^{\infty}_{max} = 1.2$), siendo dicha saturación del orden de 1 ($\eta^{\circ}_{max} \simeq 1$) para todas las estaciones, todos los planes de producción y cualquier factor de actividad promedio (ver tabla B.28 en anexo B).

Por el contrario, en cuanto a la saturación estática media (ver resultados completos en tablas B.29, B.30 , B.31 y B.32, en anexo B), sólo cuando se considera la función trapezoidal, $\overline{\alpha^Z}$, o parabólica, $\overline{\alpha^P}$, para factor de actividad, se obtiene una saturación media inferior al límite establecido ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$), en todas las estaciones y todos los ejemplares. En el resto de casos (función lineal[17], $\overline{\alpha^L}$[18], escalón, $\overline{\alpha^S}$, y función triangular, $\overline{\alpha^T}$), existen, al menos, cinco estaciones sobre-saturadas en función del mix de producción.

[16] En el caso NISSAN-9ENG, al tener todas las estaciones un único procesador, $b_k = 1$, la sobrecarga elemental por procesador es equivalente a la sobrecarga elemental por estación de trabajo.

[17] Función equivalente a mantener una actividad normal, $\alpha^N = 1$, a lo largo de toda la jornada laboral. Esto es: $\alpha_{i,k} = 1, (\forall i \in I; \forall k \in K)$.

[18] Función homogénea con valor constante igual al factor de actividad normal $\alpha^N = 1$.

En concreto, cuando no se aumenta la actividad ($\overline{\alpha^L}$), las estaciones 4, 9, 10, 16, 17 y 18 presentan una saturación media superior a 0.95, sea cual sea el mix de producción; mientras que, las estaciones 11 y 21, están sobre-saturadas para 5 y 8 planes de producción, respectivamente. Obviamente, el número de estaciones sobre-saturadas, disminuye con el aumento de la activación media del operario, es decir, al considerar la función del factor de ritmo de trabajo escalón ($\overline{\alpha^S}$), triangular ($\overline{\alpha^T}$), trapezoidal ($\overline{\alpha^Z}$) y/o parabólica ($\overline{\alpha^P}$) (ver tabla 6.1).

k	$\overline{\alpha^L}$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\overline{\alpha^Z}, \overline{\alpha^P}$
4	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	-	-	-
9	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	$\epsilon = \#1, \ldots, \#10, \epsilon = \#12, \ldots, \#19, \#21, \#22$	-
10	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	$\epsilon = \#1, \ldots, \#8, \epsilon = \#10, \ldots, \#23$	-
11	$\#3, \#10, \#11, \#19, \#23$	-	-	-
16	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	$\#1, \#2, \epsilon = \#4, \ldots, \#6, \#8, \#9, \epsilon = \#11, \ldots, \#18, \#20, \#21$	-
17	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	$\#1, \#4, \#6, \#8, \#9, \#11, \#13, \#16, \#18, \#20, \#21, \#23$	-
18	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	$\forall \epsilon \in \mathrm{E}$	-
21	$\#3, \#5\ \#7, \#10, \#15, \#17, \#19, \#22$	-	-	-

Tabla 6.1: Ejemplares[19] (ϵ) que provocan que existan estaciones de trabajo cuya saturación estática media sea superior a la saturación estática media máxima ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$).

A pesar de que los cálculos realizados, para determinar las saturaciones estáticas medias, ya muestran la necesidad de la activación del ritmo de trabajo para respetar las condiciones negociadas en cuanto al sobre-esfuerzo de los trabajadores y completar el trabajo requerido, también se calculan las sobrecargas elementales de las estaciones y la sobrecarga inevitable de la línea (ver tablas B.33, B.34 y B.35, en anexo B). De esta manera, se podrá evaluar la calidad de las soluciones, obtenidas, posteriormente, con los modelos.

Para el cálculo de dichas sobrecargas estáticas, se utilizan las ecuaciones (6.9) y (6.10), y se consideran las diferentes opciones en cuanto a la activación del factor de actividad, excepto las funciones trapezoidal ($\overline{\alpha^Z}$) y parabólica ($\overline{\alpha^P}$), pues al no presentar, para ningún mix de producción, ningún procesador sobre-saturado es evidente que tanto la sobrecarga elemental de las estaciones como la sobrecarga inevitable de la línea serán cero.

Así, la sobrecarga inevitable global, para cada uno de los planes de producción seleccionados y cada valor del factor de ritmo de trabajo, son los que se muestran en la tabla 6.2.

[19] Planes de producción.

$\#\epsilon$	$W_0(\alpha_{i,k}, d_i)$			
	$\overline{\alpha^L}$	$\overline{\alpha^S}(\forall i; \forall k)$	$\overline{\alpha^T}(\forall i; \forall k)$	$\overline{\alpha^Z} = \overline{\alpha^P}(\forall i; \forall k)$
$\#1$	12,315.0	4,220.6	591.1	0.0
$\#2$	12,458.0	4,312.6	725.2	0.0
$\#3$	12,210.0	4,123.9	794.6	0.0
$\#4$	12,470.0	4,269.0	638.7	0.0
$\#5$	13,012.5	4,549.7	1,053.8	0.0
$\#6$	12,910.0	4,506.1	872.0	0.0
$\#7$	12,722.5	4,361.0	1,080.4	0.0
$\#8$	12,018.0	4,075.5	448.2	0.0
$\#9$	13,363.0	4,694.8	1,071.9	0.0
$\#10$	13,122.0	4,404.5	1,545.1	0.0
$\#11$	11,792.5	3,838.4	355.7	0.0
$\#12$	12,246.0	4,209.0	649.0	0.0
$\#13$	12,551.0	4,335.8	704.4	0.0
$\#14$	12,646.0	4,398.7	789.0	0.0
$\#15$	12,393.5	4,271.9	796.7	0.0
$\#16$	12,363.0	4,249.7	619.6	0.0
$\#17$	12,597.5	4,375.5	872.9	0.0
$\#18$	13,208.0	4,646.4	1,010.1	0.0
$\#19$	12,810.0	4,312.6	1,294.6	0.0
$\#20$	11,875.0	3,983.5	440.5	0.0
$\#21$	13,065.0	4,554.5	919.6	0.0
$\#22$	13,062.5	4,452.9	1,330.8	0.0
$\#23$	11,902.5	3,935.2	318.5	0.0
Promedio	12,570.2	4,307.9	822.7	0.0

Tabla 6.2: Sobrecarga inevitable de la línea, debida al mix de producción (ϵ), a la saturación media admisible ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$) y al factor de actividad ($\alpha_{i,k}$)[20].

Como puede apreciarse, la sobrecarga inevitable debida a la limitación de la saturación, cuando se trabaja, durante toda la jornada, con un factor de actividad igual a 1 (actividad normal, α^N), es del orden de $12{,}570\ s$ de media. El simple hecho de limitar el exceso de trabajo, con el fin de no sobre-saturar a ningún operario de la línea, provoca una pérdida de trabajo, aproximada, de 72[21] motores diarios, lo que supondría unas perdidas monetarias de $28{,}800$ €/*día*[22].

[20]Para todos los cálculos realizados, se ha considerado una factor de actividad independiente del tipo de producto y de la estación. Por tanto, se ha empleado el valor medio del factor de actividad asociado a una jornada laboral.

[21]Equivalencia en motores de la sobrecarga inevitable media de la línea. Esto es, la relación entre las unidades de tiempo de sobrecarga, generada a lo largo de la jornada laboral, y las unidades de tiempo que se tarda en obtener un motor, lo cual es equivalente al tiempo de ciclo ($12{,}570\ s \div 175\ s/ciclo$).

[22]Considerando que la pérdida de un motor en la línea supone un coste de 400 €.

Por otro lado, al igual que ocurría con la saturación media, la sobrecarga inevitable se ve reducida, considerablemente, cuando se aumenta la velocidad de trabajo de los operadores en algún momento de la jornada laboral. En concreto, si se aumenta el ritmo de trabajo estableciendo un factor de actividad escalonado, lo cual únicamente supone un aumento medio del $3.\widehat{33}\,\%$, la sobrecarga inevitable media obtenida es de $4{,}308\ s$. Mientras que si se establece un factor de actividad triangular, la sobrecarga inevitable media obtenida es de $823\ s$. Así, las pérdidas diarias inevitables, debidas al trabajo no completado, en ambas situaciones, serían de $10{,}000\ €/$*día* (25 motores) y $2{,}000\ €/$*día* (5 motores), para la función escalón y la triangular respectivamente.

Sin embargo, con un aumento medio del nivel de actividad de los procesadores, de sólo un $6.\widehat{66}\,\%$ (correspondiente a la función trapezoidal y/o parabólica), la sobrecarga inevitable es nula y, por tanto, la pérdidas económicas inevitables, debidas a motores no completados, también son nulas.

6.6.2. Evaluación de los Modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$

Una vez conocida la mejor situación (estática) ante la que podría encontrarse la linea de montaje de la planta de Nissan, frente a los planes de producción establecidos y las negociaciones llevadas a cabo en cuanto a las condiciones laborales, se obtendrán los valores de la sobrecarga real. Esta sobrecarga real, debida a las nuevas limitaciones de saturación dinámica de las estaciones y a la variabilidad de los tiempos de proceso entre los tipos de motores, se obtendrá mediante los nuevos modelos propuestos, el $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$.

Esta parte de experiencia computacional, que permitirá evaluar el comportamiento de los modelos propuestos en este capítulo frente a los propuestos en el capítulo 3 y en el capítulo 5, también se resolverá mediante programación matemática, utilizando para ello el solucionador LP Solver de Gurobi Optimizador v4.5.0, en un ordenador iMac de Apple Macintosh con un procesador Core i7 de 2.93GHz Intel y 8GB de memoria RAM con MAC OS X10.6.7. Además, como en experimentos anteriores, se permite un tiempo límite de CPU de $7200\ s$ para cada modelo y cada uno de los 23 planes de producción, correspondientes al $Bloque - I$ de datos del caso NISSAN-9ENG.

Por otro lado, en cuanto a los parámetros necesarios para la ejecución de los modelos ($M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$), se han fijado los siguientes valores[23]:

[23] Valor máximo de la saturación máxima y media, posibilidad, o no, de llevar a cabo rotaciones y valores necesarios para definir el factor de actividad de trabajo a lo largo de la jornada laboral. Estos últimos valores dependerán de si el modelo contempla, o no, la activación de los operarios y del tipo de función que se seleccione, en caso de que se trate de los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ (ver Sección 5.3.1 del Capítulo 5, página 102).

- Saturación máxima permitida por estación: $\eta_{max}^{\infty} = 1.2$.
- Saturación media admisible por estación: $\eta_{med}^{\infty} = 0.95$.
- Número de rotaciones permitidas entre estaciones consecutivas: $k_r = 1$ (no se permiten).
- Factor de trabajo normal y máximo: $\alpha^N = 1.0$, $\alpha^{max} = 1.1$.
- Turno 1 (Shift 1): $t_0 = 45$, $t_{med} = 67$, $t_{\infty} = 90$.
- Turno 2 (Shift 2): $t_0 = 180$, $t_{med} = 202$, $t_{\infty} = 225$.

Además, para evaluar la calidad de las soluciones ofrecidas, se definen las siguientes desviaciones porcentuales relativas, entre el valor de sobrecarga inevitable, calculado en el punto anterior, y la sobrecarga real obtenida. Estas pérdidas o ganancias en sobrecarga, provocados por la secuenciación, se determinarán para cada uno de los modelos y cada una de las funciones del factor de actividad, que conforman el conjunto $\mathfrak{F}(\alpha) = \{\dot{\alpha}^S, \dot{\alpha}^T, \dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P, \overline{\alpha^S}, \overline{\alpha^T}, \overline{\alpha^Z} = \overline{\alpha^P}\}$.

$$RPD_{13}\big(W_0, W, \epsilon\big) = \frac{W_0(\epsilon) - W_{3\cup 4_\eta}(\epsilon)}{W_0(\epsilon)} \cdot 100 \qquad (\epsilon \in \mathrm{E}) \tag{6.46}$$

$$RPD_{14}\big(W_0, W, \epsilon\big) = \frac{W_0(\epsilon) - W_{4\cup 3_\eta}(\epsilon)}{W_0(\epsilon)} \cdot 100 \qquad (\epsilon \in \mathrm{E}) \tag{6.47}$$

$$RPD_{15}\big(W_0, W, f(\alpha), \epsilon\big) = \frac{W_0(f(\alpha), \epsilon) - W_{3\cup 4_\dot{\alpha}I_\eta}, (f(\alpha), \epsilon)}{W_0(f(\alpha), \epsilon)} \cdot 100 \qquad (f(\alpha) \in \mathfrak{F}(\alpha); \epsilon \in \mathrm{E}) \tag{6.48}$$

$$RPD_{16}\big(W_0, W, f(\alpha), \epsilon\big) = \frac{W_0(f(\alpha), \epsilon) - W_{4\cup 3_\dot{\alpha}I_\eta}, (f(\alpha), \epsilon)}{W_0(f(\alpha), \epsilon)} \cdot 100 \qquad (f(\alpha) \in \mathfrak{F}(\alpha); \epsilon \in \mathrm{E}) \tag{6.49}$$

Tras las 598 ejecuciones, los valores de sobrecarga obtenidos para cada ejemplar de datos y cada modelo, se recogen en la tablas B.36 - B.45 del anexo B. Su análisis nos permite observar que la sobrecarga obtenida, tanto con los modelos con instantes de inicio absolutos ($M3\cup4_\eta$ y $M3\cup4_\dot{\alpha}I_\eta$), como con los modelos con instantes relativos de inicio de las operaciones ($M4\cup3_\eta$ y $M4\cup3_\dot{\alpha}I_\eta$), son prácticamente idénticas[24], en función del factor de actividad considerado.

En la tabla 6.3, se presentan de forma resumida los resultados obtenidos.

[24] La diferencia máxima entre los resultados de ambos tipos de modelos, para un ejemplar dado y una función del factor de actividad considerada, es de 0.08 segundos de sobrecarga.

ϵ	$W_{3\cup4_\eta} = W_{4\cup3_\eta}$	$W_{3\cup4_\dot{\alpha}I_\eta} = W_{4\cup3_\dot{\alpha}I_\eta}$					RPD_{15}			
		$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P, \overline{\alpha^Z}, \overline{\alpha^P}$	$(\dot{\alpha}^S)$	$(\dot{\alpha}^T)$	$(\overline{\alpha^S})$	$(\overline{\alpha^T})$
#1	12,315.0	4,601.8	796.0	4361.3	620.6	0.0	-9.0	-34.7	-3.3	-5.0
#2	12,458.0	4,692.7	884.9	4456.3	761.5	0.0	-8.8	-22.0	-3.3	-5.0
#3	12,210.0	4,509.2	895.4	4261.3	834.4	0.0	-9.3	-12.7	-3.3	-5.0
#4	12,470.0	4,649.5	843.2	4411.3	670.6	0.0	-8.9	-32.0	-3.3	-5.0
#5	13,012.5	4,929.8	1,202.9	4701.3	1106.5	0.0	-8.4	-14.1	-3.3	-5.0
#6	12,910.0	4,882.2	1,072.5	4656.3	915.6	0.0	-8.3	-23.0	-3.3	-5.0
#7	12,722.5	4,743.9	1,212.2	4506.3	1134.4	0.0	-8.8	-12.2	-3.3	-5.0
#8	12,018.0	4,459.6	657.1	4211.3	470.6	0.0	-9.4	-46.6	-3.3	-5.0
#9	13,363.0	5,066.8	1,258.2	4851.3	1125.5	0.0	-7.9	-17.4	-3.3	-5.0
#10	13,122.0	4,795.6	1,660.4	4551.3	1622.4	0.0	-8.9	-7.5	-3.3	-5.0
#11	11,792.5	4,231.1	520.8	3966.3	373.5	0.0	-10.2	-46.4	-3.3	-5.0
#12	12,246.0	4,590.8	801.1	4349.3	681.5	0.0	-9.1	-23.4	-3.3	-5.0
#13	12,551.0	4,715.1	907.0	4480.3	739.6	0.0	-8.7	-28.8	-3.3	-5.0
#14	12,646.0	4,777.3	968.3	4545.3	828.5	0.0	-8.6	-22.7	-3.3	-5.0
#15	12,393.5	4,653.1	946.6	4414.3	836.5	0.0	-8.9	-18.8	-3.3	-5.0
#16	12,363.0	4,630.4	823.9	4391.3	650.6	0.0	-9.0	-33.0	-3.3	-5.0
#17	12,597.5	4,755.0	1,022.3	4521.3	916.5	0.0	-8.7	-17.1	-3.3	-5.0
#18	13,208.0	5,020.7	1,210.2	4801.3	1060.6	0.0	-8.1	-19.8	-3.3	-5.0
#19	12,810.0	4,700.6	1,403.5	4456.3	1359.4	0.0	-9.0	-8.4	-3.3	-5.0
#20	11,875.0	4,370.0	599.7	4116.3	462.5	0.0	-9.7	-36.1	-3.3	-5.0
#21	13,065.0	4,929.1	1,120.4	4706.3	965.6	0.0	-8.2	-21.8	-3.3	-5.0
#22	13,062.5	4,838.9	1,440.5	4601.3	1397.4	0.0	-8.7	-8.2	-3.3	-5.0
#23	11,902.5	4,323.0	524.0	4066.3	334.4	0.0	-9.9	-64.5	-3.3	-5.0
						Promedio ($\overline{RPD}$)	-8.9	-24.8	-3.3	-5.0

Tabla 6.3: Sobrecarga dada por modelos $M3\cup4_\eta$, $M4\cup3_\eta$, $M3\cup4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4\cup3_\dot{\alpha}I_\eta$, con cada factor de actividad ($\dot{\alpha}I$), por ejemplar (ϵ); y empeoramiento o aumento porcentual de la sobrecarga, respecto a la sobrecarga inevitable[25].

Los modelos $M3\cup4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4\cup3_\dot{\alpha}I_\eta$, presentan una sobrecarga dinámica superior a la sobrecarga estática, cuando se consideran las funciones del ritmo de trabajo escalón y triangular ($\dot{\alpha}^S$ y $\dot{\alpha}^T$) y sus correspondientes con valor homogéneo y constante ($\overline{\alpha^S}$ y $\overline{\alpha^T}$). En el caso de las funciones con ritmos de trabajo variables a lo largo de la jornada laboral, esta diferencia no sólo se debe a la variabilidad de los tiempos de proceso, sino también al hecho de que el ritmo de trabajo se incrementa en determinados momentos de la jornada de trabajo, y no, durante toda la jornada, como se tiene en cuenta al considerar la activación media, a la hora de calcular la saturación estática.

[25]El hecho de que los modelos $M3\cup4_\eta$ y $M4\cup3_\eta$, alcancen las soluciones óptimas y éstas sean idénticas a los valores de sobrecarga inevitable calculados para cada ejemplar (ϵ), provoca que las desviaciones porcentuales relativas entre estos valores sean nulas ($RPD_{13} = RPD_{14} = 0, \forall\epsilon \in \mathrm{E}$). De forma similar, las desviaciones entre la sobrecarga inevitable calculada y las soluciones ofrecidas por el modelo $M3\cup4_\dot{\alpha}I_\eta$ (RPD_{15}) y las soluciones del modelo $M4\cup3_\dot{\alpha}I_\eta$ (RPD_{16}), coinciden en todos los ejemplares, pues ambos modelos obtienen los mismos resultados.

En cambio, los modelos $M3 \cup 4_\eta$ y $M4 \cup 3_\eta$, alcanzan la solución óptima en todos los ejemplares, coincidiendo la sobrecarga inevitable debida a la saturación estática (tabla 6.2) con la sobrecarga debida a la saturación dinámica. Obviamente, para estos modelos, las desviaciones porcentuales son cero (RPD_{13} y RPD_{14}), en todos los ejemplares.

En cuanto a la calidad de las soluciones, la solución de los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, empeora el valor de la sobrecarga inevitable en un $8.9\,\%$ y $24.8\,\%$, en promedio, cuando el factor de actividad sigue una función escalón o triangular, respectivamente y, un $3.3\,\%$ y un $5.0\,\%$, cuando el factor de actividad es constante e igual al valor medio de la función triangular y trapezoidal, respectivamente (ver tabla 6.3 columnas RPD_{15}). Esto pone de manifiesto, la influencia de la secuencia en los resultados, pues a pesar de obtener la mayoría de los óptimos, la situación dinámica se aleja, hasta un $46.6\,\%$[26] de la situación estática, calculada previamente.

Además, los cuatro modelos alcanzan las soluciones óptimas, sin agotar el tiempo máximo de CPU (7200 s), de todos los ejemplares ($|\mathrm{E}| = 23$), exceptuando el ejemplar $\#3$ en el modelo, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ o $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ con función triangular. En este caso, la solución encontrada, por ambos modelos, se aleja de la mejor cota encontrada por el solucionador un $0.012\,\%$, siendo el valor de la sobrecarga igual a $895.4\ s$.

La tabla 6.4 recoge los tiempos, medio, máximo y mínimo, de CPU, empleados por cada modelo y cada función del factor de actividad (ver tiempos para cada ejemplar y cada modelo en el anexo B, tablas B.46 y B.47). En ella podemos apreciar la rapidez de los modelos en encontrar todas las soluciones, exceptuando el único ejemplar ($\#3$) para el que se alcanza el límite de tiempo (7200 s) y no se encuentra el óptimo con los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$ o $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$. Para el resto de casos, el tiempo medio de CPU es del orden de $2.75\ s$ para $M3 \cup 4_\eta$ y $M4 \cup 3_\eta$, del orden de $1.53\ s$ para $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ o $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ y las funciones $\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^Z$ y $\dot{\alpha}^P$ y de $387.04\ s$ para $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$ o $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$, siendo la función triangular la que requiere un mayor tiempo de ejecución.

	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$								$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$							
	$\dot{\alpha}^L$	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\dot{\alpha}^Z$	$\dot{\alpha}^P$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$	$\dot{\alpha}^L$	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\dot{\alpha}^Z$	$\dot{\alpha}^P$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$
CPU_{Min}	2.27	1.70	2.47	1.27	1.19	1.20	1.14	1.03	2.31	1.55	2.46	1.21	1.15	1.18	1.11	1.02
CPU_{Max}	3.74	2.10	6827.79	1.84	1.67	1.38	2.96	1.13	3.34	1.91	6654.47	1.80	1.38	1.37	1.26	1.17
$\overline{CPU}$	2.80	1.86	407.58	1.53	1.38	1.27	1.27	1.06	2.70	1.74	366.51	1.47	1.23	1.25	1.17	1.08

Tabla 6.4: Tiempos, mínimo, máximo y medio de CPU (s), empleados por los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ para resolver los 23 planes de producción del caso NISSAN-9ENG.

[26] Empeoramiento máximo de sobrecarga obtenido al incorporar las restricciones de saturación (valor correspondiente al ratio RPD_{15} para el ejemplar $\#8$).

Una vez comparados los modelos en cuanto a valores de sobrecarga y tiempos de ejecución, a continuación se calculan las pérdidas económicas que supone la limitación de la saturación de los procesadores en los modelos para el *MMSP-W*. Para ello, al igual que en el capítulo 5, se traduce la sobrecarga obtenida a número de motores no terminados y, teniendo en cuenta el Consolidated Operating Profit de la línea ($10\,\%$ sobre el beneficio total de un motor) y el calendario laboral de la planta, se determina la cantidad monetaria anual perdida, en cada uno de los escenarios estudiados.

Pérdidas €/*año*	$W_{3\cup4_\eta} = W_{4\cup3_\eta}$	$W_{3\cup4_\dot{\alpha}I_\eta} = W_{4\cup3_\dot{\alpha}I_\eta}$				
		$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P, \overline{\alpha^Z}, \overline{\alpha^P}$
Mínima	6,064,714.29	2,175,994.29	267,840.00	2,039,824.48	171,964.29	0.00
Máxima	6,872,400.00	2,605,782.86	853,920.00	2,494,967.12	834,364.29	0.00
Media	6,464,649.69	2,411,915.03	509,167.45	2,289,342.24	444,270.19	0.00

Tabla 6.5: Pérdidas económicas anuales (mínima, máxima y media) debidas a la cantidad de motores no completados, dadas las secuencias de los modelos $M3\cup4_\eta$, $M4\cup3_\eta$, $M3\cup4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4\cup3_\dot{\alpha}I_\eta$, con cada factor de actividad ($\dot{\alpha}I$).

A simple vista la tabla 6.5 muestra cómo las pérdidas ocasionadas por el cumplimiento de las saturaciones, máxima y media, permitidas según convenio, se reducen mediante el aumento del factor de ritmo de trabajo. De hecho, como era de esperar, a mayor activación de los procesadores, mayor reducción de las pérdidas de beneficios.

Además, si tenemos en cuenta la posible compensación económica, a los trabajadores, por el sobre-esfuerzo exigido con cada una de las funciones para el factor de actividad, comprobamos que, en caso de que la saturación media permitida sea del 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$), siempre se obtienen beneficios. Esto es, sabiendo que el coste horario en España, en el sector de la automoción, es de $[20\ ,\ 25]$ €/*h*, que el coste adicional por hora de trabajo para cada una de las funciones estudiadas es de $[0.66\ ,\ 0.825]$ €/*h* con la función escalón; de $[1.0\ ,\ 1.25]$ €/*h* con la función triangular; y de $[1.33\ ,\ 1.66]$ €/*h* con la función trapezoidal y/o parabólica; y que la línea contiene 21 estaciones con un procesador cada una, compuesto a su vez por dos operarios, podemos determinar el intervalo en el que se movería el sobre-coste anual de la línea por el aumento del ritmo de trabajo:

- Coste anual de la línea por un aumento medio del factor de actividad del $3.33\,\%$, respecto al factor de actividad normal : $[81{,}860.63\ ,\ 102{,}325.78]$ €/*año-línea*
- Coste anual de la línea por un aumento medio del factor de actividad del $5.00\,\%$, respecto al factor de actividad normal : $[124{,}031.25\ ,\ 155{,}039.06]$ €/*año-línea*
- Coste anual de la línea por un aumento medio del factor de actividad del $6.66\,\%$, respecto al factor de actividad normal : $[165{,}358.46\ ,\ 206{,}718.54]$ €/*año-línea*

Y, por tanto, los beneficios netos que se obtienen por la activación de los procesadores, en cuanto a reducción del número de motores no completados, respecto a la situación obtenida con los modelos $M3 \cup 4_\eta$ y $M4 \cup 3_\eta$, y considerando el rango de sobre-costes por la compensación económica de lo trabajadores, son (ver tabla 6.6):

Beneficio neto	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta = M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$				
(*M€/año-línea*)	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P, \overline{\alpha^Z}, \overline{\alpha^P}$
Mínimo	[3.81 , 3.79]	[5.67 , 5.64]	[3.94 , 3.92]	[5.77 , 5.74]	[5.90 , 5.86]
Máximo	[4.18 , 4.16]	[5.89 , 5.86]	[4.30 , 4.28]	[5.91 , 5.88]	[6.71 , 6.67]
Medio	[3.97 , 3.95]	[5.83 , 5.80]	[4.09 , 4.07]	[5.90 , 5.87]	[6.30 , 6.26]

Tabla 6.6: Beneficios netos anuales (mínimo, máximo y medio), en millones de €, obtenidos al reducir la cantidad de sobrecarga dinámica mediante la activación de los procesadores a lo largo de la jornada laboral con los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, con cada factor de actividad ($\dot{\alpha}I$) y compensando económicamente dicha activación.

Tras comprobar que el aumento del factor de ritmo de trabajo comporta beneficios cuando se limita la saturación media dinámica de los procesadores, sea cual sea el aumento medio que se exija a los operarios, e incluso, cuando se compense a éstos por dicho sobre-esfuerzo, analizamos si también el refuerzo de la línea mediante procesadores auxiliares para reducir la sobrecarga es factible o no.

En efecto, considerando el número, mínimo y máximo, de operarios de refuerzo[27] necesarios para eliminar la sobrecarga de trabajo generada en cada uno de los escenarios analizados (ver tabla B.48 del anexo B), podemos determinar el sobre-coste de esta tercera alternativa para contrarrestar la sobrecarga de la línea.

Así, en base al número de operarios polivalentes necesarios, a lo largo de un día de trabajo con dos turnos, para completar el trabajo requerido a la línea y, en base al coste horario habitual en el sector de la automoción en España [20 €- 25 €], calculamos el rango de costes anuales que supondría este exceso de operarios (ver tabla 6.7):

[27] Considerando que un procesador está compuesto por 2 recursos humanos y que los planes de producción utilizados corresponden a 2 turnos de trabajo.

Coste ($\Delta\mathcal{H}$ ($M3 \cup 4_\alpha I_\eta$=$M4 \cup 3_\alpha I_\eta$))		
	$\dot{\alpha}^L$	$\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$
Coste Mínimo	[59,062.5 , 73,828.1]	[59,062.5 , 73,828.1]
Coste Máximo	[118,125.0 , 147,656.3]	[59,062.5 , 73,828.1]
Coste Medio	[115,557.1 , 144,446.3]	[59,062.5 , 73,828.1]

Tabla 6.7: Costes anuales (mínimo, máximo y medio), debidos al mínimo número de operarios refuerzo ($\Delta\mathcal{H}$) necesarios para eliminar la sobrecarga obtenida con los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha} I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha} I_\eta$ y teniendo en cuenta el coste por hora de trabajo mínimo y máximo en el sector de la automoción en España.

Del mismo modo, considerando el número de operarios especializados, obtenemos una cota superior del rango de costes que supondría utilizar operarios refuerzo para completar el trabajo total requerido (ver tabla 6.8):

Coste ($\widehat{\Delta\mathcal{H}}$ ($M3 \cup 4_\alpha I_\eta$=$M4 \cup 3_\alpha I_\eta$))					
	$\dot{\alpha}^L$	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$
Coste Mínimo	[708.75 , 885.94]	[590.63 , 738.28]	[354.38 , 442.97]	[590.63 , 738.28]	[354.38 , 442.97]
Coste Máximo	[945.00 , 1,181.25]	[590.63 , 738.28]	[590.63 , 738.28]	[590.63 , 738.28]	[590.63 , 738.28]
Coste Medio	[775.52 , 969.40]	[590.63 , 738.28]	[518.72 , 648.40]	[590.63 , 738.28]	[482.77 , 603.46]

Tabla 6.8: Costes (miles de €) anuales (mínimo, máximo y medio), debidos al máximo número de operarios refuerzo ($\widehat{\Delta\mathcal{H}}$) necesarios para eliminar la sobrecarga obtenida con los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha} I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha} I_\eta$.

Como puede observarse, si comparamos los costes generados por la contratación de operarios refuerzo (tablas 6.7 y 6.8) junto con los costes por la compensación económica del sobre-esfuerzo exigido a los trabajadores y las ganancias obtenidas por la reducción total de la sobrecarga, se obtendrían beneficios en todos los casos. En efecto, considerando la peor de la situaciones (número máximo de operarios refuerzo, $\widehat{\Delta\mathcal{H}}$, y máximo coste horario por operario, $25\ €/h$) los beneficios netos que se obtendrían son (ver tabla 6.9):

Beneficio neto	$(M3 \cup 4_\dot{\alpha} I_\eta = M4 \cup 3_\dot{\alpha} I_\eta) + \widehat{\Delta\mathcal{H}}$				
(*M€/año-línea*)	$\dot{\alpha}^L$	$\dot{\alpha}^S$, $\overline{\alpha^S}$	$\dot{\alpha}^T$	$\overline{\alpha^T}$	$\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\alpha^Z}$, $\overline{\alpha^P}$
Mínimo	5.18	5.22	5.47	5.47	5.86
Máximo	5.69	6.03	5.98	5.98	6.67
Medio	5.50	5.62	5.66	5.71	6.26

Tabla 6.9: Beneficios (millones de €) netos anuales (mínimo, máximo y medio), obtenidos al eliminar la sobrecarga dinámica de trabajo, mediante la activación de los trabajadores y la incorporación de operarios refuerzo.

Los resultados nos muestran cómo la opción más rentable es la eliminación del $100\,\%$ de la sobrecarga mediante el aumento del factor de ritmo de trabajo de los operarios según una función trapezoidal o parabólica. En efecto, en este caso, únicamente se tienen los costes derivados de la compensación económica a los trabajadores por el sobre-esfuerzo exigido en determinados momentos de la jornada laboral.

Por otro lado, observamos también que ambas medidas para contrarrestar el efecto de la limitación de la saturación dinámica media reportan mayores beneficios si se combinan simultáneamente, reduciendo, por un lado, la sobrecarga mediante el aumento de la actividad de los trabajadores y, eliminando, por otro lado, la sobrecarga obtenida por medio de operadores refuerzo.

6.7. Conclusiones

La variante para el *MMSP-W*, presentada en este capítulo, considera aspectos no tenidos en cuenta, hasta el momento, en este problema. En concreto, se ha introducido el concepto de la saturación de procesadores de las estaciones de trabajo, considerando así, no sólo aspectos productivos, sino también aspectos relacionados con las condiciones laborales pactadas entre empresa y sindicatos.

Se ha diferenciado entre la saturación estática, máxima (η°_{max}) y media (η°_{med}), dependiente del mix de producción y de los tiempos de proceso de las operaciones; y, también, entre la saturación dinámica, máxima (η_{max}) y media (η_{med}), dependiente del mix de producción, de la secuencia de productos y, por tanto, del tiempo de trabajo completado por los procesadores de las estaciones.

Se han propuesto diferentes alternativas para evitar que la saturación media, ya sea estática o dinámica, supere el valor máximo negociado entre empresa y representantes de los trabajadores ($\eta^{\circ}_{med} \leqslant \eta^{\infty}_{med}$) y para reducir la sobrecarga de trabajo. Estas medidas son: (1) recurrir al departamento de métodos y tiempos para mejorar los tiempos de proceso; (2) aumentar el factor de ritmo de trabajo, respetando en todo momento el valor óptimo para la empresa ($\alpha^{\star} = 1.2$), fijado como valor máximo permitido; (3) reforzar la línea mediante procesadores refuerzo o auxiliares; y (4) realizar rotaciones entre puestos de trabajo consecutivos, con el fin de compensar la sobresaturación del procesador de una estación con la baja-saturación del procesador de otra estación.

Basándonos en la segunda de las propuestas, se han extendido los modelos $M3{\cup}4_\dot{\alpha}I$ y $M4{\cup}3_\dot{\alpha}I$, propuestos en el capítulo 5, mediante la incorporación de dos restricciones, una encargada de limitar la saturación máxima de los procesadores y la otra para limitar la saturación media admisible. Del mismo modo, se destaca que las restricciones añadidas a los nuevos modelos, también son válidas para la extensión de los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$.

Por otro lado, en cuanto a la propuesta (3), se han definido los conceptos necesarios para determinar el número de procesadores refuerzo necesarios, considerando situaciones extremas, en las que los operarios pueden ocuparse de cualquier estación sobrecargada o están asignados a una única estación, y situaciones intermedias, en las que un operario puede ocuparse de la sobrecarga de un conjunto de estaciones consecutivas. Y, teniendo en cuenta la propuesta (4) se han definido los conceptos necesarios para determinar, la saturación media de las estaciones en caso de permitir rotaciones entre estaciones consecutivas.

Definidos todos los conceptos necesarios y presentados los nuevos modelos, en esta ocasión, la experiencia computacional se ha basado en la evaluación del efecto de la incorporación de la limitación de la saturación en la sobrecarga de trabajo y su control mediante la activación del ritmo de trabajo de los procesadores. Para ello, se han extendido, también, los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ (presentados en el capítulo 3), mediante la incorporación de las restricciones de saturación.

Así, tras una serie de cálculos previos, para determinar la saturación estática media y máxima de los procesadores, en función del mix de producción, los tiempos de proceso de las operaciones, y los posibles valores medios del factor de actividad a lo largo de la jornada laboral, se ejecutaron los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ para el conjunto de ejemplares correspondientes al $Bloque - I$ del caso NISSAN-9ENG.

Los resultados obtenidos nos han permitido observar que, el hecho de considerar una saturación media máxima por procesador, provoca que ciertas estaciones puedan estar saturadas, independientemente de la secuencia de producción. Esta saturación estática media, superior a la máxima exigida, de algunos procesadores, supone una sobrecarga elemental por procesador y una sobrecarga inevitable de la línea, en función del mix de producción, que se traduce en trabajo no completado. En concreto, entre las estaciones que presentan esta situación (estaciones 4, 9, 10, 11, 16, 17, 18 y 21) las más conflictivas son las mismas en las que se concentraba la sobrecarga en el capítulo 3 (ver tabla 3.11, página 61), es decir, la 9, 10, 16, 17 y 18, ya que, además, son las que presentan una mayor saturación estática media, en la mayor parte de los casos.

Cabe destacar, que la saturación estática media no siempre viola el máximo establecido. De hecho, a medida que el factor de ritmo de trabajo promedio aumenta, estos valores van disminuyendo, incluso, por debajo de η_{med}^{∞}. Así, cuando la activación media es del $6.66\,\%$ (correspondiente a las funciones trapezoidal y parabólica), ninguna estación contiene un procesador sobre-saturado y, por tanto, en ambos casos, la sobrecarga inevitable de la línea es nula.

Desafortunadamente, obtener una sobrecarga nula no ha sido posible en el resto de casos, pues cuando no se aumenta la actividad o ésta sigue una función escalón o triangular, la sobrecarga inevitable de la línea, ha llegado a máximos de $13{,}363\ s$[28], de $4{,}694.8\ s$[29] y $1{,}545.1\ s$[30], respectivamente.

En cuanto a la saturación estática máxima de los procesadores, ésta no supera el límite establecido en ningún caso, por lo que no se ha necesitado recurrir al departamento de métodos y tiempos.

Realizados los cálculos previos, relativos a la saturación estática, se ejecutaron los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, con todas las funciones para el factor de ritmo de trabajo definidas en el capítulo 5.

Los resultados obtenidos muestran que los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$ ofrecen secuencias que no empeoran la sobrecarga inevitable de la línea, al igual que los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, con las funciones trapezoidal ($\dot{\alpha}^Z$) y parabólica ($\dot{\alpha}^P$) y sus correspondientes funciones homogéneas con valor constante ($\overline{\alpha^Z}$, $\overline{\alpha^P}$), cuyos valores de sobrecarga inevitable, tanto estática como dinámica, es 0.

Sin embargo, esto no ocurre con los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, cuando se emplea una función, del factor de actividad, escalón ($\dot{\alpha}^S$) o triangular ($\dot{\alpha}^T$) o sus correspondientes con valores medios ($\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$). En estos casos, la secuenciación empeora los valores de sobrecarga en un $8.9\,\%$, $24.8\,\%$, $3.3\,\%$ y $5.0\,\%$ de media, en ambos modelos y las cuatro funciones, respectivamente.

Por otro lado, la incorporación de las restricciones de saturación, hace que los modelos se comporten mucho mejor computacionalmente. En efecto, exceptuando el ejemplar $\#3$ en los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$, para el que se alcanza el tiempo límite de CPU sin alcanzar la solución óptima, para el resto de casos se obtienen todas las soluciones óptimas en tiempos de ejecución muy reducidos. En concreto los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$ tardaron $2.80\ s$ y $2.70\ s$, de media, mientras que los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, tardaron menos de $3\ s$ con las funciones $\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$, $\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$ y $407.58\ s$ y $366.51\ s$ con la función $\dot{\alpha}^T$.

Así, vemos que, tal y como ocurría en el capítulo 4 (ver página 95), los modelos con instantes de inicio de las operaciones relativos (modelo $M4 \cup 3$ y sus extensiones), se comportan mejor, en el solucionador Gurobi, que los modelos con instantes absolutos.

[28] Sobrecarga inevitable de la línea para el ejemplar $\#9$.

[29] Sobrecarga inevitable de la línea para el ejemplar $\#9$ con $\overline{\alpha^S}$.

[30] Sobrecarga inevitable de la línea para el ejemplar $\#10$ con $\overline{\alpha^T}$.

Finalmente, esta experiencia computacional nos ha permitido evaluar económicamente el efecto que tiene la limitación de la saturación de los procesadores y su control mediante el aumento de la actividad de los mismos y la incorporación de operarios refuerzo.

Así, considerando únicamente la activación de los procesadores, hemos visto que si limitamos la saturación y mantenemos un factor de actividad normal ($\dot{\alpha}_t = 1, \forall t$), las pérdidas económicas que podemos llegar a tener ascienden a $30{,}544$ €/*día*[31]. Por el contrario, si limitamos la saturación pero suponemos un perfil de actividad de los procesadores trapezoidal o parabólico, las pérdidas son nulas, pues no se obtiene sobrecarga en ninguno de los casos. Mientras que, una situación intermedia, la tenemos cuando el nivel de actividad sigue una función escalón o triangular, en cuyos casos, las mayores pérdidas obtenidas son de $11{,}581.26$ €/*día*[32] y de $3{,}795.24$ €/*día*[33], respectivamente.

Como vemos, la pérdidas económicas derivadas del número de motores no completados, se reducen a medida que se aumenta la actividad de los operarios, por lo tanto, en base a las pérdidas obtenidas al no considerar activación alguna, se han calculado los beneficios netos que se obtendría al solicitar a los trabajadores un mayor esfuerzo, teniendo en cuenta, para ello, el sobre-coste derivado de la compensación económica de dicho sobre-esfuerzo. Esto, nos ha permitido observar cómo, sea cual sea el aumento de la actividad de los operarios, se obtienen beneficios, respecto a la situación obtenida con los modelos $M3 \cup 4_\eta$ y $M4 \cup 3_\eta$, siendo mayores cuanto mayor es la activación de los operarios.

Sin embargo, como ya se ha comentado, el hecho de aumentar la actividad no siempre ha eliminado la sobrecarga de trabajo. Por este motivo y con el fin de evaluar la viabilidad de incorporar operadores refuerzo, se ha calculado el número mínimo y máximo de recursos humanos necesarios para conseguir una sobrecarga nula en todos los casos.

Así, considerando trabajadores polivalentes capaces de desplazarse entre estaciones en un tiempo despreciable y capaces de desarrollar cualquier tarea, hacen falta 4 trabajadores para eliminar la sobrecarga obtenidas con los modelos $M3 \cup 4_\eta$ y $M4 \cup 3_\eta$, 2 para la sobrecarga de los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, cuando el factor de actividad sigue una función escalón, triangular ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\overline{\alpha^S}$ y $\overline{\alpha^T}$) y ninguno para el resto de casos.

[31] Pérdidas económicas debidas a la sobrecarga del ejemplar $\#9$ (peor situación), igual a $13{,}363.0$ s y equivalente a 76.36 motores, suponiendo un coste por motor perdido de 400 €.

[32] Pérdidas económicas debidas a la sobrecarga del ejemplar $\#9$ con los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)_\eta$.

[33] Pérdidas económicas debidas a la sobrecarga del ejemplar $\#10$ con los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$.

Por otro lado, considerando el otro extremo en el que los trabajadores refuerzo están asignados a una única estación, es necesario un máximo de 32[34] operarios refuerzo cuando se trabaja siempre a una actividad normal, 20 cuando se aumenta el factor de actividad un $3.33\,\%$ y un $5\,\%$ de media y ninguno cuando el aumento medio es del $6.66\,\%$.

De esta manera, teniendo en cuenta el coste de un operario refuerzo por hora trabajada, considerando que trabaja a un ritmo normal, el número de horas de trabajo anuales, el número de operarios refuerzo necesarios, y el sobre-coste del sobre-esfuerzo que se les exige a los operarios fijos de las estaciones de trabajo, se han obtenido unos beneficios netos de más de 5 M€ anuales en todos los escenarios evaluados. De hecho, exceptuando el caso de las funciones trapezoidal o parabólica en el que no se requieren operarios refuerzo, los beneficios netos obtenidos tras la combinación de ambas medidas (activación y operarios refuerzo) son mayores que los obtenidos con una sola medida para reducir el efecto de la saturación y además conseguimos completar el $100\,\%$ del trabajo requerido.

[34] 8 estaciones sobre-saturadas, con un procesador compuesto por 2 recursos humanos y durante 2 turnos de trabajo.

— Parte III —

Comentarios y Conclusiones Finales

Capítulo 7

APORTACIONES Y CONCLUSIONES

Durante todo el trabajo de investigación, se ha abordado el Mixed-Model Sequencing Problem con minimización de la sobrecarga de trabajo (*MMSP-W*), y se han considerado nuevos aspectos, no tenidos en cuenta en la literatura, hasta el momento, que proporcionan al problema unas características más reales. En concreto, se han adaptado los modelos de la literatura, con el fin de conseguir modelos equivalentes, modelos que incorporan características propias de ideologías de gestión *JIT*, modelos que consideran tiempos variables de las operaciones en función del ritmo de trabajo de los procesadores y modelos que limitan la ocupación, o saturación de trabajo, de los procesadores.

Las variantes propuestas no han perseguido más que el principal objetivo de esta tesis, adaptar el *MMSP-W* a las situaciones que pueden darse en una línea de montaje, en la vida real, y aplicar estas propuestas a un caso de estudio de la planta de motores de Nissan en España.

A continuación se resumen brevemente las aportaciones realizadas, los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas de las diferentes propuestas de modelos para el problema de secuenciación que nos ocupa.

7.1. Principales Aportaciones y Resultados

Tal y como se indicó al inicio de este documento, el trabajo de investigación desarrollado para la elaboración de esta tesis ha consistido en estudiar cuatro variantes del *MMSP-W*. Todas ellas, fruto de los nichos encontrados en la revisión bibliográfica y de la necesidad de adaptar los modelos de la literatura a situaciones más cercanas a la realidad industrial.

La primera variante estudiada ha sido la integración de los modelos de referencia propuestos por Bautista y Suárez (2009) y Bautista y Cano (2011), los modelos $M3$ y $M4$, respectivamente.

El objetivo de esta integración era obtener modelos equivalentes para la secuenciación de productos mixtos en una línea, teniendo en cuenta los vínculos entre estaciones, la posibilidad de que las estaciones estén compuestas por más de un procesador y un tiempo máximo de trabajo, para todas las estaciones y todos los productos, igual a la ventana temporal. Bajo estas premisas, formulamos los modelos $M3 \cup 4$, con instantes de inicio de las operaciones absolutos, y $M4 \cup 3$, con instantes de inicio de las operaciones relativos. Modelos que se han utilizado como referencia para el estudio del resto de variantes.

Posteriormente, siguiendo los objetivos particulares, marcados para esta tesis, evaluamos los modelos a través de dos experiencias computacionales.

Para la primera experiencia computacional se han utilizado 225 ejemplares de datos de la literatura (Bautista y Cano, 2008). Todos estos planes de producción se corresponden con una demanda total de 16 unidades de producto, dividida en 4 tipos, pero con diferente mezcla de producción y diferentes tiempos de proceso de los tipos de producto en cada una de las 4 estaciones de trabajo donde deben ser tratados.

Por su lado, para la segunda experiencia computacional se han empleado ejemplares de datos de mayor tamaño, a través de un caso de estudio vinculado a la planta de motores de Nissan en Barcelona. Este conjunto de datos (NISSAN-9ENG), compuesto por dos bloques de ejemplares, consta de 23 ejemplares ($Bloque-I$), correspondientes a planes de producción para un día de trabajo con dos turnos y, de otros 23 ejemplares ($Bloque-II$), correspondientes a planes de producción para dos días de trabajo consecutivos. La demanda total de productos para cada bloque de ejemplares es de 270 o 540 motores, respectivamente. Esta demanda, se reparte entre nueve tipos de motores, cuyas cantidades difieren de una instancia a otra y cuyos tiempos de proceso en las 21 estaciones que componen la línea de producción de motores varían entre $89\ s$ y $185\ s$.

En cuanto a los resultados, en la primera experiencia computacional, los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ han alcanzado las soluciones óptimas, para todo el conjunto de datos, en unos tiempos de CPU medios de $32.92\ s$ y $81.70\ s$, respectivamente. Por el contrario, con el conjunto de datos NISSAN-9ENG sólo se han conseguido las soluciones óptimas en 3 ejemplares de datos, cuando se concede un tiempo de ejecución de $1\ h$ ($\#10$, $\#19$ y $\#33$) y en 4, cuando el tiempo límite de CPU es de $2\ h$ ($\#10$, $\#19$, $\#33$ y $\#42$).

En función de dichos resultados, si nos fijamos en los tiempos utilizados para encontrar las soluciones óptimas de los 225 ejemplares de la literatura, el modelo $M3 \cup 4$ ofrece mejores resultados que el modelo $M4 \cup 3$ (32.92 s frente a 81.70 s). Sin embargo, en el caso de Nissan, al alcanzar los modelos, el tiempo límite de CPU, en la mayoría de ejemplares, no podemos determinar qué modelo es mejor, en cuanto a tiempos de ejecución. No obstante, sí que podemos determinarlo en función de los valores de sobrecarga obtenidos con uno u otro modelo. Así, cuando $CPU_{Limit} = 3600\ s$, el modelo $M4 \cup 3$ mejora 39 soluciones respecto a las encontradas con $M3 \cup 4$ (con una mejora media del $8.71\,\%$), empeora 4 (con un empeoramiento medio del $8.99\,\%$) y empata 3. Por su lado, cuando $CPU_{Limit} = 7200\ s$, el modelo $M4 \cup 3$ mejora las soluciones de $M3 \cup 4$ en 35 ejemplares (con una mejora media del $9.90\,\%$), empeora 8 (con un empeoramiento medio del $5.26\,\%$) y empata 3.

Por último, en este primer estudio, hemos analizado la distribución de la sobrecarga por estaciones y unidades de productos, y hemos podido comprobar cómo la sobrecarga de trabajo se concentra en unas determinadas estaciones de trabajo y determinados tipos de motores. En concreto, las estaciones más sobrecargadas han sido la 9, 10, 16, 17 y 18 y los motores más conflictivos los correspondientes a la familia de motores para furgonetas, el p_4 y p_5.

Tras los resultados obtenidos en la primera variante del *MMSP-W*, la segunda variante estudiada ha consistido en incorporar, al *MMSP-W*, el concepto de regularidad. Este concepto, propio de la ideología *JIT*, se ha incorporado al problema por medio de tres enfoques distintos, el trabajo requerido, el trabajo completado y la sobrecarga de trabajo. A su vez, estos enfoques se han concentrado en uno único, el de regularidad de la producción.

La motivación de esta segunda extensión, fue evitar las concentraciones de sobrecarga que se daban con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, en determinadas estaciones de trabajo y en determinados instantes de tiempo de la jornada laboral. Así, tras explicar, una serie de conceptos previos en cuanto a la regularidad, se han formulado un conjunto de modelos.

Por un lado, se han formulado 28 modelos bi-objetivo, cuyos objetivos, además de minimizar la sobrecarga de trabajo en la línea o maximizar el trabajo completado, son: (1) minimizar la discrepancia rectangular, euclídea o cuadrática del trabajo requerido, del trabajo completado o de la sobrecarga o minimizar la sobrecarga máxima por procesador o por instante de tiempo (modelos $M3 \cup 4_WLRV$ y $M4 \cup 3_WLRV$)[1], o (2) minimizar la no regularidad de la producción ($M3 \cup 4_PRV$ y $M4 \cup 3_PRV$)[2].

[1] 26 modelos de los 28.
[2] 6 modelos de los 28.

Por otro lado, también se han definido tres modelos mono-objetivo. Los modelos $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, que regularizan la carga de trabajo y la sobrecarga, obligando, mediante restricciones, que la secuencia mantenga, en la medida de lo posible, el mix de producción. Y el modelo $M4'_RWR$, cuyo objetivo es la minimización de una función de esfuerzo que pondera la sobrecarga total de trabajo y la discrepancia entre las tasas reales e ideales de trabajo requerido.

En esta ocasión, sólo se han evaluado los modelos mono-objetivo. De hecho, se han realizado dos experiencias computacionales, una para los modelos $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$ y otra para el modelo $M4'_RWR$.

Para la primera experiencia, se han utilizado los mismos ejemplares de datos que la variante anterior (225 ejemplares de la literatura y ejemplares del caso NISSAN-9ENG), aunque, en este caso, sólo se han utilizado los 23 ejemplares del $Bloque - I$ de Nissan y un límite de tiempo de ejecución de dos horas ($CPU_{Limit} = 7200\ s$). En cambio, en el segundo experimento, únicamente, se han considerado las 225 instancias de datos de la literatura y 7 valores distintos para el parámetro de ponderación de la función de esfuerzo ($\beta = \{0.0, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0\}$).

En cuanto a los 225 ejemplares de la literatura (Bautista y Cano, 2008), con los modelos $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, se han alcanzado todos los óptimos en unos tiempos medios de CPU de 17.19 s y 11.78 s, respectivamente. Además, si comparamos estos resultados con los obtenidos con los modelos de referencia, el $M3 \cup 4$ y el $M4 \cup 3$, observamos que: (1) en promedio, la sobrecarga total de la línea aumenta un $1.34\,\%$; (2) el aumento de sobrecarga se compensa con una ganancia media de $18.87\,\%$ y $17.78\,\%$ en regularidad de trabajo requerido y de $36.59\,\%$ y $33.24\,\%$ en regularidad de la producción, para cada modelo respectivamente; (3) la regularidad de la sobrecarga dada por $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, empeora, en media, un $3.09\,\%$ y un $0.44\,\%$, respectivamente, debido al aumento del trabajo no completado; (4) el modelo $M3 \cup 4_pmr$ mejora, un $2.34\,\%$ de media, la regularidad del trabajo completado, mientras que $M4 \cup 3_pmr$ la empeora un $3.16\,\%$.

A modo de resumen, en la tabla 7.1 se indica el mejor de los modelos, $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, respecto a cada uno de los enfoques analizados, y la desviación porcentual relativa media calculada para cada uno de los enfoques.

Por su lado, los resultados obtenidos con $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, para las 23 instancias de NISSAN-9ENG, muestran una tendencia similar a la de los 225 ejemplares de la literatura, en cuanto a la mejora o empeoramiento de las soluciones ofrecidas por sus respectivos modelos de referencia ($M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$). Sin embargo, esta similitud cambia a la hora de comparar los nuevos modelos entre sí.

$\|E\| = 225$	$M3 \cup 4$ vs $M3 \cup 4_pmr$ (RPD_1)		$M4 \cup 3$ vs $M4 \cup 3_pmr$ (RPD_2)		$M3 \cup 4_pmr$ vs $M4 \cup 3_pmr$ (RPD_6)	
W	$M3 \cup 4$	$(-1.34\,\%)$	$M4 \cup 3$	$(-1.34\,\%)$	-	$(0.00\,\%)$
$\Delta_Q(X)$	$M3 \cup 4_pmr$	$(36.59\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(33.24\,\%)$	$M3 \cup 4_pmr$	$(-2.44\,\%)$
$\Delta_Q(P)$	$M3 \cup 4_pmr$	$(18.87\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(17.78\,\%)$	$M3 \cup 4_pmr$	$(-4.78\,\%)$
$\Delta_Q(W)$	$M3 \cup 4$	$(-3.09\,\%)$	$M4 \cup 3$	$(-0.44\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(1.53\,\%)$
$\Delta_Q(V)$	$M3 \cup 4_pmr$	$(2.34\,\%)$	$M4 \cup 3$	$(-3.16\,\%)$	$M3 \cup 4_pmr$	$(-10.64\,\%)$
Tiempo de CPU	$M3 \cup 4_pmr$	$(66.44\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(54.42\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(21.41\,\%)$

Tabla 7.1: Modelo con mejor resultado, para las 225 instancias de la literatura, en cuanto a sobrecarga (W), regularidad de la producción ($\Delta_Q(X)$), la regularidad del trabajo requerido ($\Delta_Q(P)$), regularidad de la sobrecarga ($\Delta_Q(W)$), regularidad del trabajo completado ($\Delta_Q(V)$) y tiempos de ejecución; y valores promedio de dichas ganancias o pérdidas.

En concreto, tanto con los modelos con regularidad, como con el modelo $M4 \cup 3$, se alcanzan dos soluciones óptimas (correspondientes a los ejemplares $\#10$ y $\#19$), mientras que el modelo $M3 \cup 4$, en Gurobi, sólo obtiene el óptimo para el ejemplar $\#10$.

Por otro lado, comparando los resultados de los modelos de referencia con los de los nuevos modelos, observamos lo siguiente: (1) la incorporación de la regularidad de la producción empeora la sobrecarga total obtenida, un $4.6\,\%$ ($M3 \cup 4$ frente a $M3 \cup 4_pmr$) y un $5.79\,\%$ de media ($M4 \cup 3$ frente a $M4 \cup 3_pmr$); (2) en contra, la regularidad tanto en producción, como en trabajo requerido, mejoran más del $90\,\%$ en todos los casos y la regularidad media del trabajo completado lo hace en un $20.56\,\%$ y un $33.53\,\%$, cuando se utilizan $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, respectivamente; (3) en cuanto a la regularidad de la sobrecarga, ambos modelos empeoran las soluciones en un $13.71\,\%$ y un $17.53\,\%$ de media, respectivamente; (4) el modelo $M4 \cup 3_pmr$ mejora, en todos los casos, las soluciones ofrecidas por $M3 \cup 4_pmr$. La tabla 7.2, muestra de forma resumida estos resultados.

$\|E\| = 23$	$M3 \cup 4$ vs $M3 \cup 4_pmr$ (RPD_1)		$M4 \cup 3$ vs $M4 \cup 3_pmr$ (RPD_2)		$M3 \cup 4_pmr$ vs $M4 \cup 3_pmr$ (RPD_6)	
W	$M3 \cup 4$	$(-4.60\,\%)$	$M4 \cup 3$	$(-5.79\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(18.66\,\%)$
$\Delta_Q(X)$	$M3 \cup 4_pmr$	$(91.07\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(94.55\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(6.39\,\%)$
$\Delta_Q(P)$	$M3 \cup 4_pmr$	$(90.71\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(92.54\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(6.59\,\%)$
$\Delta_Q(W)$	$M3 \cup 4$	$(-13.71\,\%)$	$M4 \cup 3$	$(-17.53\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(30.73\,\%)$
$\Delta_Q(V)$	$M3 \cup 4_pmr$	$(20.56\,\%)$	$M4 \cup 3$	$(33.53\,\%)$	$M4 \cup 3_pmr$	$(20.96\,\%)$

Tabla 7.2: Modelo con mejor resultado, para las 23 instancias del caso NISSAN-9ENG, en cuanto a la sobrecarga de trabajo (W), la regularidad de la producción ($\Delta_Q(X)$), la regularidad del trabajo requerido ($\Delta_Q(P)$), la regularidad de la sobrecarga ($\Delta_Q(W)$), la regularidad del trabajo completado ($\Delta_Q(V)$) y valores de dichas ganancias o pérdidas.

Tras evaluar los modelos con restricciones sobre el mix de producción, se evaluó el modelo mono-objetivo con ponderación de funciones, $M4'_RMR$, utilizando para ello las 225 instancias de la literatura. Los resultados obtenidos tras el barrido de valores para el parámetro de ponderación β, nos han permitido detectar cómo el tiempo de ejecución del modelo decrece a medida que la función de no-regularidad del trabajo requerido toma mayor peso, es decir, a medida que β tiende a 0. Esto ocurre a excepción de $\beta = 1.0$, situación en la que las variables de regularidad se eliminan, implícitamente, de la función objetivo y el tiempo de ejecución del modelo se reduce a $57\ s$ (ver subfigura (a) de figura 7.1).

De forma similar, en cuanto a lo no-regularidad del trabajo requerido, ésta mejora a medida que el factor de ponderación β da más peso a la función Δ_P. Además, la ganancia que se obtiene en cuanto a regularidad es mayor que la consecuente pérdida en sobrecarga. En efecto, se ha conseguido una disminución media del $44.84\,\%$, a costa de un aumento medio de la sobrecarga del $18.70\,\%$ (ver subfigura (b) de figura 7.1).

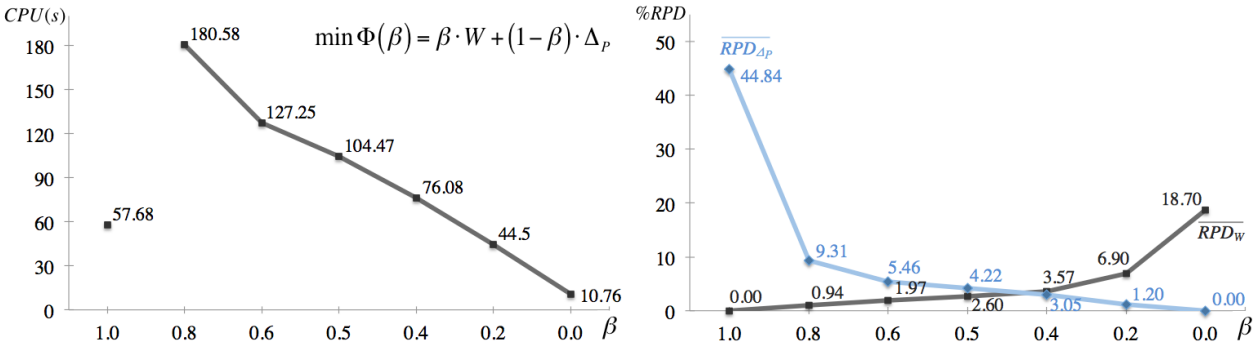


Figura 7.1: (a) Tiempos medios de CPU (s) utilizados por $M4'_RWR$ para distintos valores del coeficiente de ponderación β. (b) Desviaciones porcentuales relativas, entre valores de sobrecarga de trabajo (RPD_W) y de no-regularidad del trabajo requerido (RPD_{Δ_P}) obtenidos con $M4'_RWR$ para distintos valores del coeficiente de ponderación β.

Cabe destacar, también, que esta experiencia computacional nos ha permitido comparar dos solucionadores matemáticos distintos, el CPLEX, utilizado en la primera variante del *MMSP-W*, y el Gurobi, utilizado en esta última. Los resultados nos han permitido observar cómo el modelo $M3 \cup 4$ se comporta peor con Gurobi, empeorando las soluciones una media del $9.96\,\%$, mientras que, con el modelo $M4 \cup 3$, ocurre lo contrario. La mejora media de éste, en Gurobi, ha sido del $11.24\,\%$ respecto a los resultados de $M4 \cup 3_{CPLEX}$. Por último, comparando la mejor opción para cada modelo, observamos que el modelo $M4 \cup 3_{Gurobi}$ mejora los resultados del modelo $M3 \cup 4_{CPLEX}$ en un $12.74\,\%$ de media. Por este motivo, a partir de esta variante del *MMSP-W*, en las experiencias computacionales se ha utilizado el solver Gurobi.

Tras mejorar la regularidad de las secuencias en cuanto a producción y trabajo requerido, a costa de un pequeño aumento de la sobrecarga total de la línea, el objetivo de la tercera variante estudiada ha sido, exclusivamente el de reducir dicha cantidad de trabajo no completado. Para ello, nos hemos basado en la Ley de Yerkes-Dodson, cuya idea estriba en que la eficiencia de los trabajadores aumenta cuando el estrés aumenta, hasta alcanzar un punto de estrés óptimo, a partir del cual el rendimiento disminuye drásticamente. Así, en base a esta idea se han formulado nuevos modelos, en los que los tiempos de proceso de las operaciones pueden acortarse o elongarse en función de un nivel de activad de trabajo predeterminado, para los procesadores, a lo largo de la jornada laboral.

Siguiendo la idea de la zona de ansiedad positiva de la curva de Yerkes-Dodson y, considerando el nivel de estrés en función del tiempo, se definieron cuatro funciones para fijar el factor de ritmo de trabajo a lo largo de la jornada laboral. Las cuatro funciones, escalón, triangular, trapezoidal y parabólica, mantienen una actividad de trabajo normal, al inicio y fin de la jornada laboral, y la incrementan en la franja intermedia, aumentado, como máximo, un $10\,\%$ dicha actividad normal.

Al igual que en las variantes anteriores, después de formular los nuevos modelos, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, y definir las funciones para el factor de ritmo de trabajo, $\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$ y $\dot{\alpha}^P$, se ha realizado una experiencia computacional, basada en el $Bloque - I$ de instancias del caso NISSAN-9ENG. Para ello, se han ejecutado ambos modelos, en el solucionador Gurobi, considerando, además de cada una de las funciones del factor de actividad de trabajo definidas, sus correspondientes funciones lineales con factor de actividad constante ($\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$, $\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$).

Los resultados obtenidos en esta experiencia, nos muestran que cuando los valores del factor dinámico de actividad siguen una función escalón, cuyo aumento medio es del $3.\widehat{33}\,\%$, se encuentran los óptimos en 8 ejemplares, siendo el valor de sobrecarga, en éstos, igual a 0. En el resto de ejemplares, la mejora máxima, mínima y media de la sobrecarga total generada, comparando ambos modelos ($M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$) con sus modelos de referencia ($M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$), es del $98\,\%$, $62\,\%$ y $82\,\%$, respectivamente (ver figura 7.2).

En cambio, cuando el factor de activad sigue los valores de las funciones triangular ($\dot{\alpha}^T$), trapezoidal ($\dot{\alpha}^Z$), parabólica ($\dot{\alpha}^P$) o las funciones homogéneas con valor constante ($\overline{\alpha^S} = 3.\widehat{33}\,\%$, $\overline{\alpha^T} = 5\,\%$ y $\overline{\alpha^Z} = \overline{\alpha^P} = 6.\widehat{66}\,\%$), a lo largo de la jornada laboral, además de obtener todos los óptimos, en unos tiempos de CPU inferiores a $13\ s$ en todos los casos, la sobrecarga de trabajo desaparece por completo ($W = 0$).

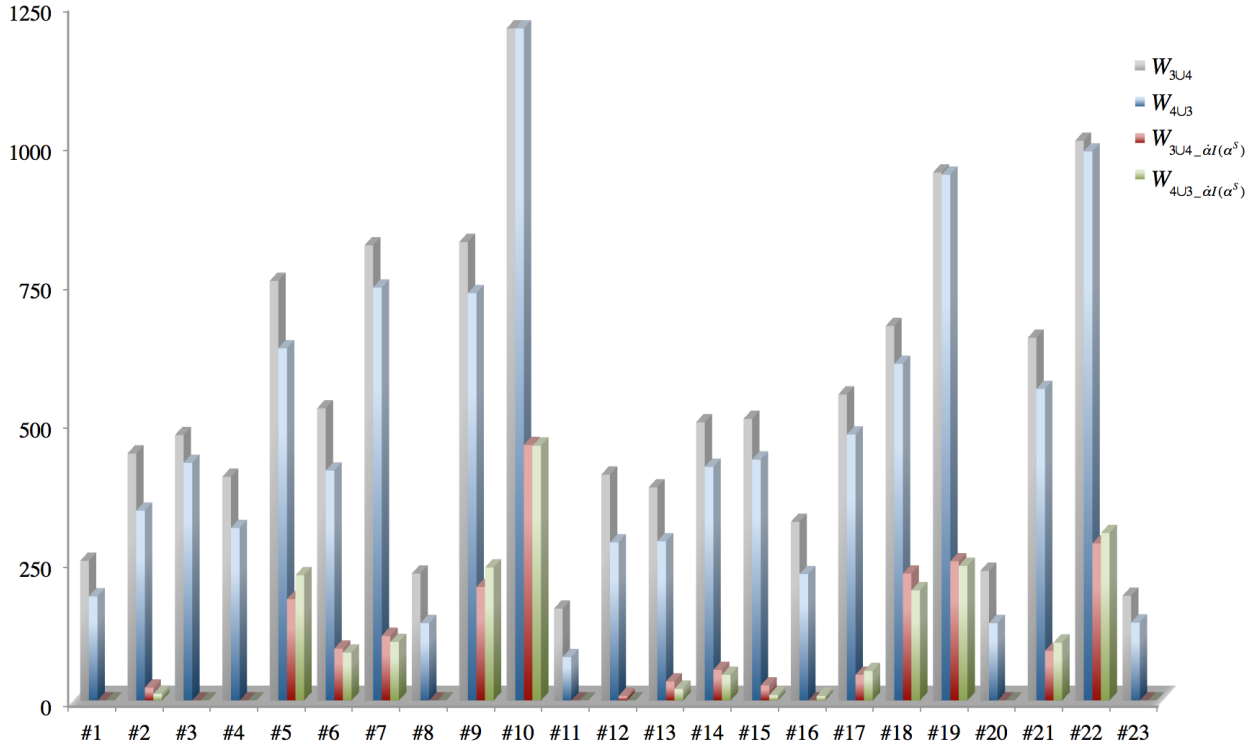


Figura 7.2: Comparativa de los valores de sobrecarga (en segundos) obtenida, para cada ejemplar ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$), por los modelos $M3 \cup 4$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$, $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$.

Debido a que esta propuesta para el *MMSP-W* implica un mayor esfuerzo por parte de los operarios de los procesadores de las estaciones, respetando en todo momento los máximos establecidos según convenio ($\eta^{max} \leqslant \eta^{\star} = 1.2$), se han calculado las ganancias que se podrían obtener con estos modelos, en función del factor del factor de actividad, respecto a la reducción de la sobrecarga de trabajo y, por tanto, respecto a la mayor cantidad de motores terminados (ver tabla 7.3).

	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$		$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$	
	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T, \dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P$	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T, \dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P$
Ganancia máxima	385,200.0 (#10)	621,257.1 (#10)	385,714.3 (#10)	621,257.1 (#10)
Ganancia mínima	84,857.1 (#11)	84,857.1 (#11)	40,114.3 (#11)	40,114.3 (#11)
Ganancia media	231,808.7	278,675.8	192,432.3	239,567.7

Tabla 7.3: Beneficios económicos (€/*año*) máximos, mínimos y medios, que se pueden obtener mediante el aumento del factor de ritmo de trabajo a lo largo de la jornada laboral.

De forma similar, teniendo en cuenta el coste de una hora de trabajo de un operario en el sector de automoción en España, se ha calculado la compensación económica que podría suponer el sobre-esfuerzo exigido a los trabajadores en determinados momentos de su jornada laboral.

Ambos cálculos nos han permitido determinar el beneficio neto que obtendría la compañía en caso de reducir la sobrecarga de trabajo a expensas de un sobre-esfuerzo de los operarios de la línea y, por tanto, a expensas del sobre-coste que supondría la activación de los operarios, en caso de que éste fuera compensado económicamente. Estos resultados (ver figura 7.3) nos muestran cómo para cualquier función del factor de actividad la ganancia media es superior al coste anual del sobre-esfuerzo medio de los operarios de la línea. No obstante, el único caso en el que la ganancia mínima es superior al sobre-coste anual de la línea, se da con el modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ cuando se compensa al operario con el menor coste horario posible ($20\,€/h$).

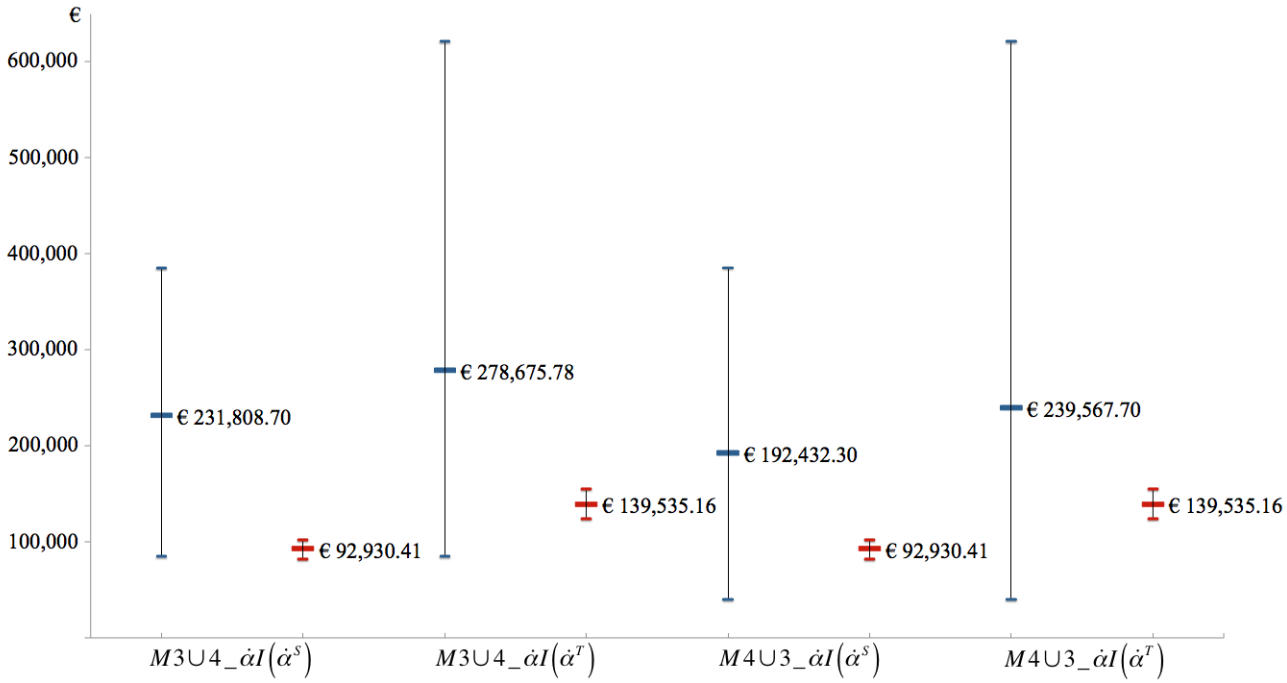


Figura 7.3: Ganancias obtenidas con $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)$, $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)$ (azul), frente a costes por compensación económica del sobre-esfuerzo exigido a los trabajadores (rojo).

Por tanto, tras esta experiencia computacional hemos comprobado que, en función de la actividad de los operarios, es posible reducir la sobrecarga de trabajo y, que esta reducción, puede reportar beneficios a la empresa. Incluso hemos visto cómo, en promedio, estos beneficios hacen frente al máximo coste de la compensación del sobre-esfuerzo requerido a los trabajadores.

Esta tercera variante estudiada del *MMSP-W* se ha realizado teniendo en cuenta una serie de condiciones laborales establecidas, entre compañía y representantes de los trabajadores, por medio de convenios. Estas condiciones han sido la duración efectiva de la jornada laboral, el nivel de actividad considerado como normal para la empresa y el factor de actividad óptimo, considerado como el ritmo de trabajo máximo que los procesadores pueden desarrollar sin perjuicio alguno.

Sin embargo, en ningún momento del estudio, hemos considerado la saturación máxima a la que los procesadores pueden estar sometidos a lo largo de toda, o en algún momento determinado, de la jornada laboral. Por este motivo, se ha estudiado una cuarta variante del problema, en la que considerando, o no, la activación del ritmo de trabajo, hemos restringido la saturación de los procesadores a los valores límites establecidos, por convenio, por las compañías.

Esta última variante ha comenzado con la definición de saturación estática media (η°_{med}) y máxima (η°_{max}) y saturación dinámica media (η_{med}) y máxima (η_{max}), así como con la propuesta de diferentes acciones correctivas para aquellos casos en los que dichas saturaciones superan los valores límite, medio o máximo, establecidos (η^{∞}_{med}, η^{∞}_{max}) y, por tanto, la sobrecarga de trabajo se ve aumentada. Estas acciones han sido: (1) recurrir al departamento de métodos y tiempos para reducir los tiempos de las operaciones; (2) aumentar el nivel de activación de los procesadores; (3) reforzar la línea con procesadores auxiliares; (4) realizar rotaciones entre estaciones consecutivas para compensar sobre-saturaciones de algunas estaciones con estaciones con menor saturación, siempre y cuando lo permita la compañía.

De este modo, teniendo en cuenta los modelos de referencia $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, propuestos en la primera variante, y los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, propuestos en la tercera variante, que incorporan la variación del factor de actividad de los procesadores, es decir, la segunda acción correctiva propuesta, se han formulado cuatro modelos nuevos, mediante la incorporación de restricciones de saturación. Dos en los que la actividad de los procesadores es igual a la actividad normal, durante toda la jornada laboral ($\dot{\alpha}_t = 1 \; \forall t$), el modelo $M3 \cup 4_\eta$ y el $M4 \cup 3_\eta$, y dos en los que, además de limitar la saturación, se aumenta el factor de ritmo de trabajo de acuerdo con las funciones preestablecidas en la variante anterior ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$, $\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$), que son el modelo el $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$.

Así, con los 23 ejemplares de datos de NISSAN-9ENG, se han calculado, las saturaciones estáticas de todos los procesadores de la línea y las sobrecargas elementales o inevitables de los mismos. Estos cálculos previos nos han permitido ratificar cómo la limitación de la saturación provoca que el trabajo no-completado aumente en gran medida, en caso de que no se tome ninguna medida para evitarlo. De hecho, para todos los ejemplares y considerando una saturación estática media del 0.95 y manteniendo el nivel de actividad normal, se han obtenido unas sobrecargas inevitables en torno a $13{,}000$ unidades de tiempo, lo que equivaldría a 66 motores. Sin embargo, al aumentar la actividad media un $6.\widehat{66}\,\%$ ($\dot{\alpha}^Z$ o $\dot{\alpha}^P$), ningún procesador se encuentra saturado y, por tanto, la sobrecarga inevitable es nula en todos los casos.

Posteriormente, ejecutamos los cuatro modelos propuestos en el solucionador Gurobi y obtuvimos los siguientes resultados: se encuentran todas las soluciones óptimas en un tiempo medio de CPU inferior a $2.80\ s$, excepto para el ejemplar $\#3$ con los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$, que se aleja de la mejor cota encontrada por el solucionador un $0.012\,\%$; cuando no consideramos activación de la actividad ($\dot{\alpha}^L = \dot{\alpha}_t = 1\ \forall t$), la sobrecarga real coincide con la inevitable; sin embargo cuando se asume una función escalón, triangular o una función homogénea, con valor constante igual al valor medio de la función escalón o triangular, para el factor de actividad, la sobrecarga real aumenta un promedio de $8.89\,\%$, $24.84\,\%$, $3.33\,\%$ y $5.00\,\%$ el valor de la sobrecarga inevitable calculada, respectivamente.

Aún así, el efecto de la saturación estática en el problema, disminuye la sobrecarga de trabajo un $65.74\,\%$, si se aumenta la actividad un $3.\widehat{33}\,\%$ de media ($\overline{\alpha^S}$), un $93.52\,\%$, si el aumento medio de la actividad es del $5\,\%$ ($\overline{\alpha^T}$) y un $100\,\%$, si el aumento medio es del $6.\widehat{66}\,\%$ ($\overline{\alpha^Z}$ o $\overline{\alpha^P}$). Y, en cuanto a la saturación dinámica, la disminución es del $62.70\,\%$ cuando se considera la función escalón ($\dot{\alpha}^S$), un $92.19\,\%$ si se trata de la función triangular ($\dot{\alpha}^T$) y un $100\,\%$ cuando se fijan los valores de actividad según la función trapezoidal o parabólica ($\dot{\alpha}^Z$ o $\dot{\alpha}^P$) (ver figura 7.4).

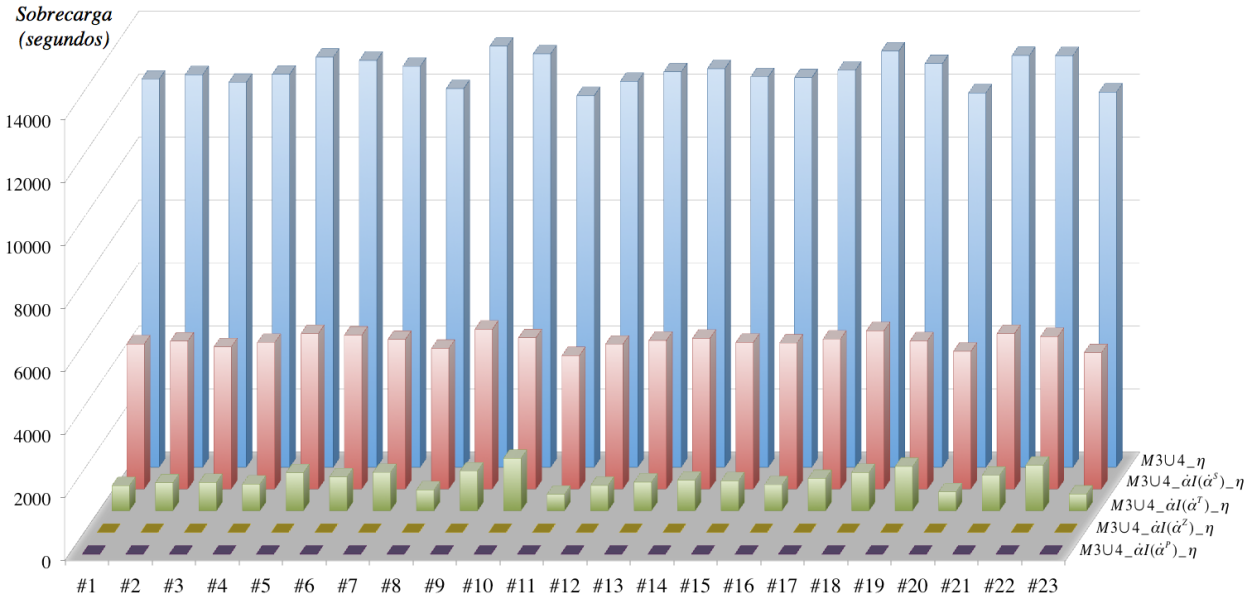


Figura 7.4: Comparativa de los valores de sobrecarga (en segundos) obtenida, para cada ejemplar ($\epsilon = 1, \ldots, 23$), por los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S)_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^Z)_\eta$ y $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^P)_\eta$.

Por tanto, siguiendo con la idea de compensar a los trabajadores por el sobre-esfuerzo que se les solicita con el aumento del factor de ritmo de trabajo a lo largo de su jornada laboral, se han calculado los beneficios anuales que podrían obtenerse por reducir la cantidad de trabajo no-completado, manteniendo las condiciones laborales marcadas por la compañía.

Así, considerando un coste de 400 € para la línea por motor perdido, los beneficios netos anules, respecto a la peor situación, correspondiente a la menor reducción de sobrecarga y la mayor compensación económica a los trabajadores por aumentar su actividad, son (ver figura 7.5):

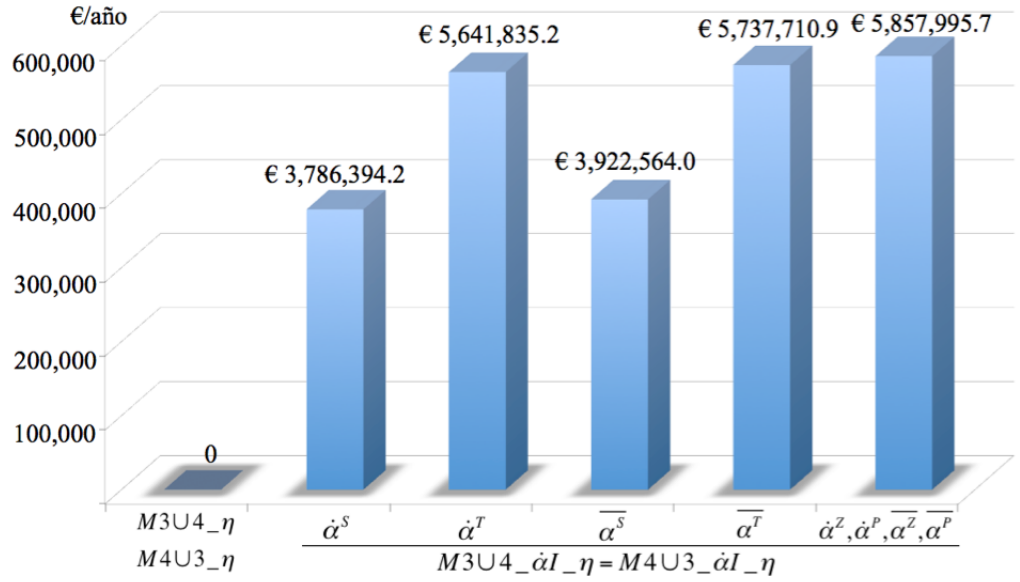


Figura 7.5: Beneficios netos (€/*año*) obtenidos por la reducción de la sobrecarga, cuando se limita la saturación dinámica de los procesadores y se compensa a los trabajadores por el aumento de su ritmo de trabajo a lo largo de su jornada laboral.

Tras evaluar las ganancias que se podrían obtener en caso de limitar la saturación de las estaciones de la línea y aumentar el factor de actividad con el fin de reducir la sobrecarga dinámica generada, compensando, incluso, este aumento del ritmo de trabajo, hemos calculado las cotas del número de operarios refuerzo que serían necesarios para eliminar la sobrecarga. De este modo, contemplando el coste anual de los operarios refuerzo y el coste anual del sobre-esfuerzo, en caso de que lo haya, se han calculado los beneficios netos que obtendría la compañía al eliminar el $100\,\%$ de la sobrecarga (Figura 7.6).

Los resultados muestran que la opción que más beneficios reporta, en caso de limitar la saturación media de la línea a 0.95, es la de aumentar la actividad de los procesadores según una función trapezoidal o parabólica, de forma que no sería necesaria la presencia de operarios refuerzo, pues con estas funciones ya se consigue eliminar la sobrecarga.

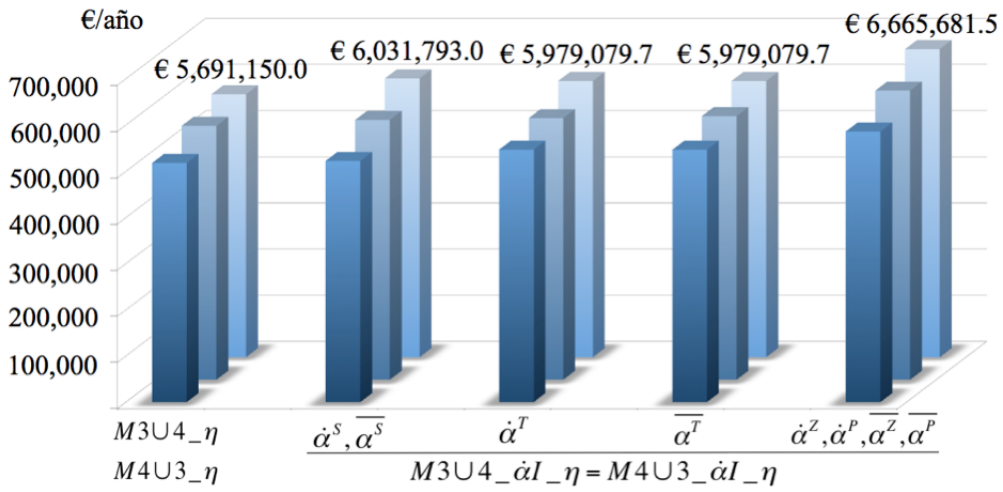


Figura 7.6: Beneficios netos (€/*año*) obtenidos (máximo, medio y mínimo) al reducir la sobrecarga, cuando se limita la saturación de los procesadores, mediante el aumento del factor de actividad y la incorporación de operarios refuerzo.

Por otro lado, se ha visto también que, en caso de utilizar las funciones escalón o triangular para el factor de actividad, es recomendable utilizar también operarios refuerzo para eliminar la sobrecarga restante, ya que de este modo los beneficios obtenidos, aun considerando todos los costes extra, son superiores.

Sin embargo, en caso de recurrir a una única medida para contrarrestar la sobrecarga y no utilizar las funciones trapezoide y/o parabólica, lo mejor, en cuanto a beneficios, sería recurrir a los operarios refuerzo. No obstante, se debe tener en cuenta que el hecho de recurrir a este tipo de operarios supondría ampliar el espacio físico de las estaciones o disponer de un espacio adyacente para finalizar el trabajo no-completado en la línea, lo que podría no ser posible.

Por último, cabe destacar que todo el trabajo desarrollado en esta tesis ha dado lugar a la publicación de artículos, capítulos de libros o comunicaciones a congresos (ver capítulo 9). Si bien, no todas estas comunicaciones han sido publicadas a día de hoy, las correspondientes a las últimas variantes estudiadas están bajo revisión o en proceso de elaboración.

7.2. Conclusiones

Tal y como nos propusimos al inicio de este trabajo de investigación, hemos estudiado diferentes variantes para el *MMSP-W*, incorporando en cada una de ellas aspectos no considerados, hasta el momento, en los trabajos presentes en la literatura. Tras un largo proceso de revisión de la bibliografía, se definieron las cuatro variantes aquí estudiadas, con las que se ha conseguido lo siguiente:

1. Modelos matemáticos equivalentes, capaces de optimizar los dos objetivos, propios de los modelos de la literatura, la maximización del trabajo completado (Yano y Rachamadugu, 1991) y la minimización de la sobrecarga de trabajo o trabajo no-completado (Scholl *et al.*, 1998). Nuestros modelos, además de trabajar con las variables relativas al trabajo completado y con las relativas a la sobrecarga, consideran vínculos entre estaciones, respetando así la consideración de líneas con estaciones en serie y, por tanto, restringiendo el inicio de las operaciones en una determinada estación a la finalización de la operación en la estación anterior o a la liberalización de dicha estación.

   Además, los modelos propuestos establecen que todas las estaciones de trabajo dispongan de un tiempo igual a la ventana temporal para trabajar sobre cualquier unidad de producto, teniendo en cuenta que, mantener una unidad de producto, un tiempo superior al tiempo de ciclo e inferior a la ventana temporal, afectará a la siguiente unidad de producto, pues ésta se mantendrá a la espera y dispondrá de menos tiempo para ser tratada. Por último, estos modelos también consideran la posibilidad de que en las estaciones de trabajo pueda haber más de un procesador homogéneo para realizar las operaciones.

2. Modelos próximos a los principios de la ideología *JIT*, favoreciendo también la regularidad en el consumo de componentes y la regularidad de la sobrecarga, evitando que ésta se concentre en determinados procesadores e instantes de tiempo. Los modelos formulados han sido:

   a) Modelos multi-objetivo que, además de optimizar el trabajo completado o la sobrecarga, minimizan la discrepancia entre: (1) el trabajo real requerido en función de la secuencia y el trabajo ideal requerido, dado un plan de producción y los tiempos de proceso de las operaciones según los diferentes tipos de producto; (2) el trabajo real completado y el trabajo ideal requerido, que coincide con el ideal completado; (3) las sobrecargas reales, generadas por la secuencia, y las sobrecargas ideales correspondientes, que suponemos nulas; y (4) la producción acumulada real y la ideal, del conjunto de tipos de producto, para que se mantenga el mix de producción.

   b) Modelos multi-objetivo que minimizan el trabajo completado o la sobrecarga y la sobrecarga que genera el procesador más sobrecargado o la máxima sobrecarga generada por una unidad de producto en una determinada posición de la secuencia.

   c) Modelos mono-objetivo que, con la idea de regularizar la secuencia según el mix de producción, limitan, mediante restricciones, la posibilidad de que un tipo de producto sea secuenciado o no en función de su presencia en el plan de producción.

d) Un modelo mono-objetivo que pondera la minimización de la sobrecarga con la minimización de la no-regularidad del trabajo requerido, con la idea de que las tasas ideales de producción requerida y las reales sean lo más cercanas posibles.

3. Modelos que permiten reducir la sobrecarga a costa de un sobre-esfuerzo por parte de los procesadores. Este sobre-esfuerzo, fijado a través de funciones predeterminadas para el factor de ritmo de trabajo, considera en todo momento los tiempos establecidos, como normales, por la compañía y los ritmos óptimos y, además, la posibilidad de compensar a los operarios que conforman los procesadores, por medio de las ganancias obtenidas por la consecución de mayor parte del trabajo requerido.

   Claramente, con estos nuevos modelos se consigue aumentar la productividad de la línea y se considera un aspecto fundamental, en entornos reales, que no es más que la variabilidad del ritmo de trabajo de los operarios a lo largo de su jornada laboral.

4. Modelos mono-objetivo que, además de poder reducir la sobrecarga de trabajo por medio del sobre-esfuerzo de los trabajadores, regulan la ocupación de los mismos, mediante el control de la saturación de trabajo en la que se pueden encontrar los operarios. Para ello, se limita la saturación media y máxima a los valores acordados por compañía y sindicatos. De esta manera, además de aumentar la productividad se mantienen o mejoran las condiciones laborales mínimas establecidas para los trabajadores de la línea.

Como vemos, este trabajo ha dado lugar a nuevos modelos matemáticos para el *MMSP-W*, por ello, a modo de resumen, la tabla 7.4 recoge las principales características de cada uno de ellos: (1) el tipo de función objetivo; (2) los instantes de inicio de las operaciones que emplea, absolutos ($s_{k,t}$) o relativos ($\hat{s}_{k,t}$); (3) las variables de proceso, que son: el trabajo completado ($v_{k,t}$), el trabajo completado reducido por el factor de actividad ($\hat{v}_{k,t}$) o la sobrecarga generada ($w_{k,t}$); (4) las estaciones a las que se le permite mantener la última unidad de producto ($t = T$) un tiempo igual a la ventana temporal (l_k); (5) el rango de valores que puede adoptar el número de procesadores de las estaciones de trabajo; (6) la consideración, o no, de vínculos entre estaciones; (7) el mantenimiento, o no, de la regularidad en la secuencia; (8) la variabilidad de los tiempos de proceso, debida a la variación del ritmo de actividad de los procesadores a lo largo de la jornada laboral; y (9) la limitación de la saturación media y máxima de los procesadores de las estaciones de trabajo.

Modelo	*Función objetivo*	*Instantes de Inicio*	*Variables de proceso*	*Ventana temp.*[3]	*Rango de b_k*	*Vínculos estaciones*	*Control de la regularidad*	*Variación factor de actividad*	*Control saturación*
$M1$	$\max V$	$s_{k,t}$	$v_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	No	No	No	No
$M2$	$\min W$	$\hat{s}_{k,t}$	$w_{k,t}$	$c\ \forall k$	$b_k = 1$	No	No	No	No
$M3$	$\max V$	$s_{k,t}$	$v_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	No	No	No
$M4$	$\min W$	$\hat{s}_{k,t}$	$w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	No	No	No
$M4'$	$\min W$	$\hat{s}_{k,t}$	$w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	No	No	No
$M3 \cup 4$	$\max V / \min W$	$s_{k,t}$	$v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	No	No	No
$M4 \cup 3$	$\min W / \max V$	$\hat{s}_{k,t}$	$v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	No	No	No
$M3 \cup 4_WLRV$	$(\max V / \min W) \wedge (\min f(f \in \Im_W))$	$s_{k,t}$	$v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	$\Im_W = \left\{ \begin{array}{c} \Delta_R(P), \Delta_E(P), \Delta_Q(P), \\ \Delta_R(V), \Delta_E(V), \Delta_Q(V), \\ \Delta_R(W), \Delta_E(W), \Delta_Q(W), \\ W_{m_{\max}}, W_{t_{\max}} \end{array} \right\}$	No	No
$M4 \cup 3_WLRV$	$(\max V / \min W) \wedge (\min f(f \in \Im_W))$	$\hat{s}_{k,t}$	$v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si		No	No
$M3 \cup 4_PRV$	$(\max V / \min W) \wedge (\min f(f \in \Im_X))$	$s_{k,t}$	$v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	$\Im_X = \{\Delta_R(X), \Delta_E(X), \Delta_Q(X)\}$	No	No
$M4 \cup 3_PRV$	$(\min W / \max V) \wedge (\min f(f \in \Im_X))$	$\hat{s}_{k,t}$	$v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si		No	No
$M3 \cup 4_pmr$	$\max V / \min W$	$s_{k,t}$	$v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	$\left\{ \begin{array}{c} \sum_{\tau=1}^{t} x_{i,\tau} \geqslant \left\lfloor \frac{d_i}{T} \cdot t \right\rfloor \\ \sum_{\tau=1}^{t} x_{i,\tau} \leqslant \left\lceil \frac{d_i}{T} \cdot t \right\rceil \end{array} \right\}$	No	No
$M4 \cup 3_pmr$	$\min W / \max V$	$\hat{s}_{k,t}$	$v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si		No	No
$M4'_RWR$	$\min \Phi(\beta) = \beta \cdot W + (1-\beta)\Delta_P$	$\hat{s}_{k,t}$	$w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	$\Delta_P = \sum_{k=1}^{\lvert K \rvert} \sum_{t=1}^{T} \left(\delta_{k,t}^{+} + \delta_{k,t}^{-} \right)$	No	No
$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$	$\max V / \min W$	$s_{k,t}$	$\hat{v}_{k,t}, v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	No	$\dot{\alpha}^S, \dot{\alpha}^T, \dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P$	No
$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$	$\min W / \max V$	$\hat{s}_{k,t}$	$\hat{v}_{k,t}, v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	No		No
$M3 \cup 4_\eta$	$\max V / \min W$	$s_{k,t}$	$v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	No	No	$\left\{ \begin{array}{c} \eta_{med} \leqslant \eta_{med}^{\infty} \\ \eta_{max} \leqslant \eta_{max}^{\infty} \end{array} \right\}$
$M4 \cup 3_\eta$	$\min W / \max V$	$\hat{s}_{k,t}$	$v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	No	No	
$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$	$\max V / \min W$	$s_{k,t}$	$\hat{v}_{k,t}, v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	No	$\dot{\alpha}^S, \dot{\alpha}^T, \dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P$	$\left\{ \begin{array}{c} \eta_{med} \leqslant \eta_{med}^{\infty} \\ \eta_{max} \leqslant \eta_{max}^{\infty} \end{array} \right\}$
$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$	$\min W / \max V$	$\hat{s}_{k,t}$	$\hat{v}_{k,t}, v_{k,t}, w_{k,t}$	$l_k\ \forall k$	$b_k \geqslant 1$	Si	No		

Tabla 7.4: Comparativa de los modelos de la literatura ($M1$ y ($M2$), los de referencia ($M3$, $M4$ y $M4'$) y los propuestos en esta tesis ($M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_WLRV$, $M4 \cup 3_WLRV$, $M3 \cup 4_PRV$, $M4 \cup 3_PRV$, $M3 \cup 4_pmr$, $M4 \cup 3_pmr$, $M4'_RWR$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$, $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$).

La evolución de las variantes estudiadas, ha permitido obtener modelos matemáticos que acercan el problema original a situaciones más reales de la industria, dejando de ser, así, un problema meramente teórico. Además, gracias a la aplicación de los modelos mediante un caso de estudio real, correspondiente a la planta de motores de Nissan en Barcelona, hemos conseguido mejoras en cuanto a resultados obtenidos y comportamiento computacional.

En efecto, considerando el número de soluciones óptimas encontradas, para las 23 instancias del $Bloque - I$ del caso NISSAN-9ENG, correspondientes a un día de trabajo, (ver figura 7.7) y las funciones para el factor de actividad que respetan los periodos de adaptación y fatiga propios del inicio y fin de la jornada laboral, los mejores modelos son: (1) el modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$ con las funciones, para factor de actividad, triangular, trapezoide o parabólica; y (2) los modelos $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, cuando no se considera activación del factor de actividad o cuando se consideran las funciones escalón, trapezoidal o parabólica. Todos ellos, han alcanzado la solución óptima para los 23 planes de producción.

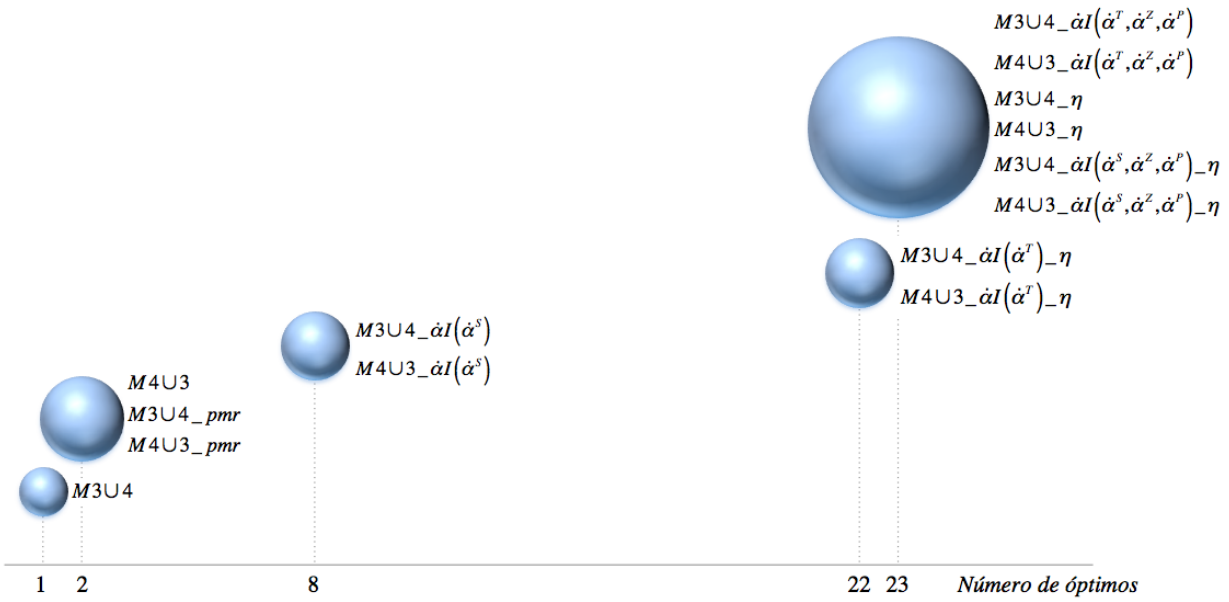


Figura 7.7: Comparativa del número de soluciones óptimas encontradas por los modelos evaluados $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_pmr$, $M4 \cup 3_pmr$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$, $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$).

De forma similar, comparando los tiempos de CPU utilizados por los modelos que alcanzaron todos los óptimos[4] (ver figura 7.8), vemos que cualquiera de los modelos con las funciones trapezoidal o parabólica, son los más rápidos.

[4]Nótese que únicamente se comparan los modelos que consiguieron los 23 óptimos, ya que el resto alcanzaron el tiempo límite concedido ($CPU_{Limit} = 7200\ s$) y el hecho de considerarlos distorsionaría los resultados.

También observamos que los modelos $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$ pasan de alcanzar, en la mayoría de casos, el tiempo límite, a obtener soluciones en unos tiempos medios inferiores a $4.2\ s$, cuando se incorpora la saturación de los procesadores. Esto se debe, a que las restricciones de saturación media limitan mucho más que las condiciones propias de los modelos de referencia y, por tanto, el peso de la sobrecarga inevitable es mucho mayor que el de la sobrecarga debida a la variabilidad de los tiempos de proceso de las operaciones.

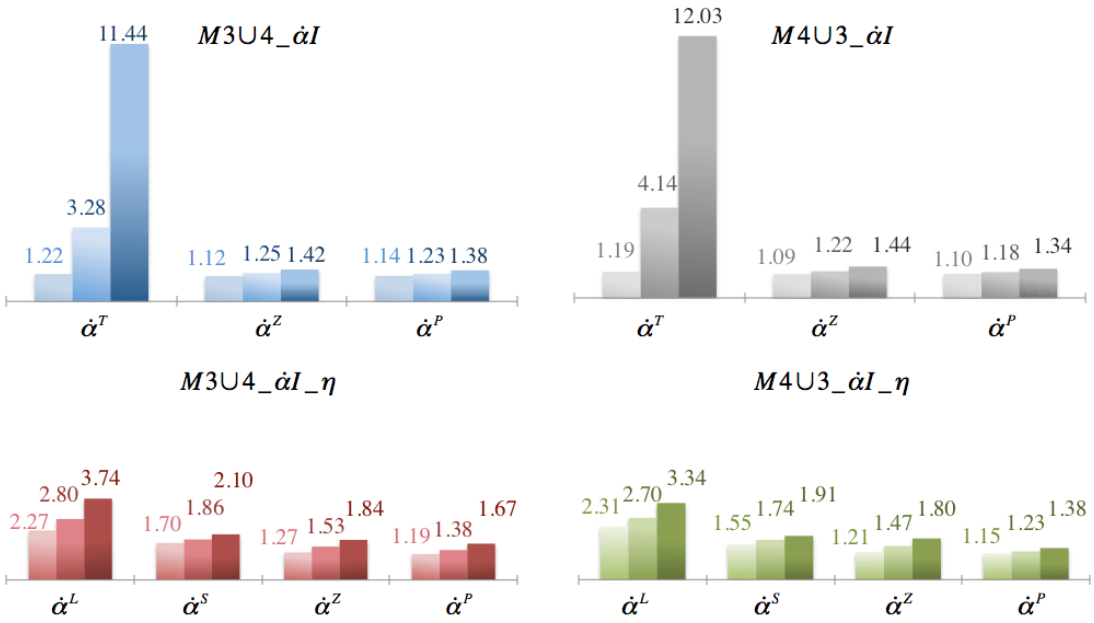
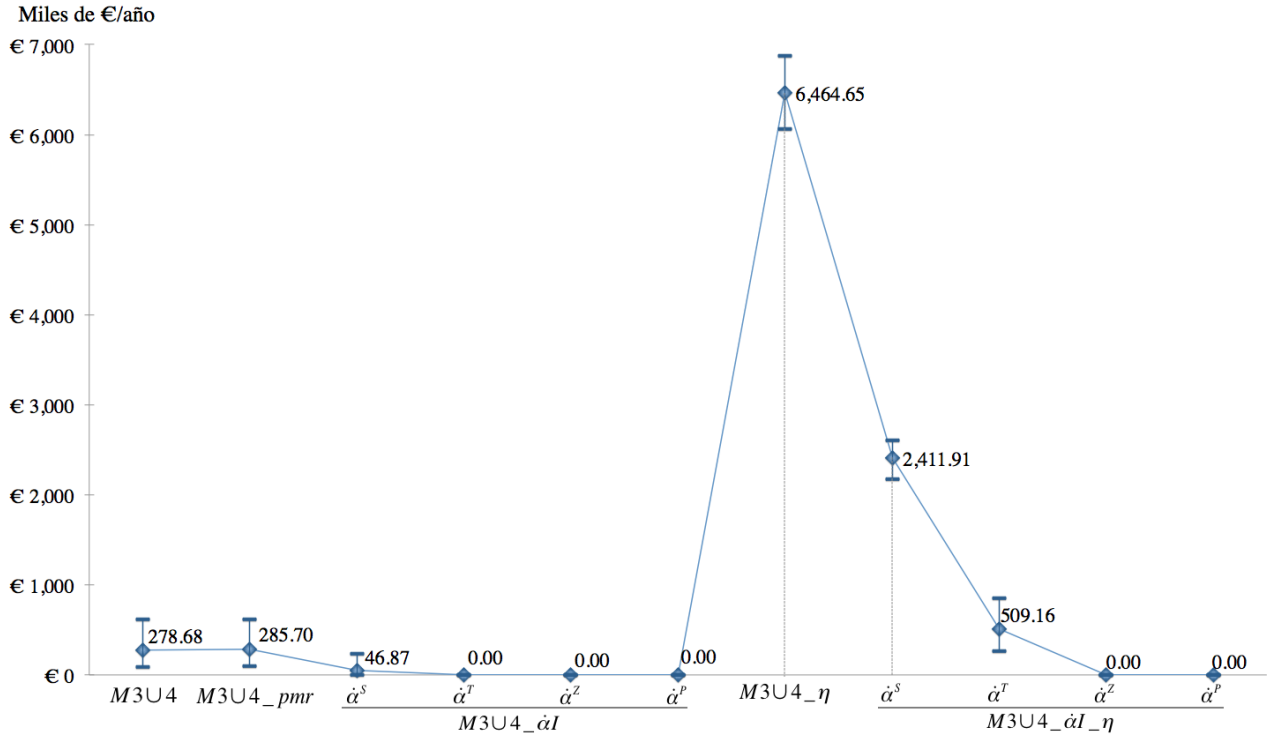


Figura 7.8: Comparativa del tiempo de ejecución (en segundos) utilizados por los modelos evaluados que alcanzaron todos los óptimos, el $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T, \dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P)$, $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T, \dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P)$, $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$ (equivalentes a $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^L)_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^L)_\eta$), $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S, \dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P)_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^S, \dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P)_\eta$).

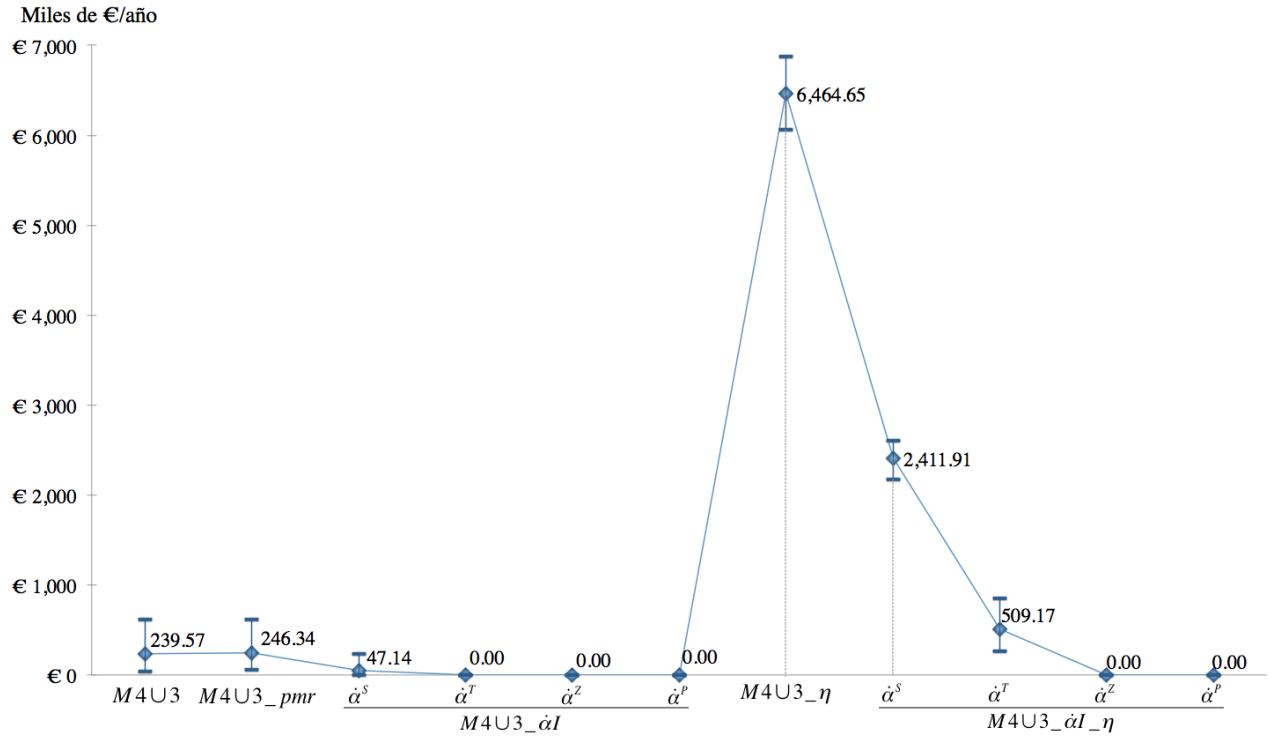
Por otro lado, comparando los resultados de los modelos respecto a las pérdidas que ocasionan, debido a la cantidad de trabajo no-completado (ver tabla 7.5), vemos que los primeros modelos propuestos, el $M3 \cup 4$ y el $M4 \cup 3$, provocan unas pérdidas medias anuales de 696.7 y 598.9 motores, respectivamente. Estos resultados son mucho mejores que los obtenidos con los modelos el $M3 \cup 4_\eta$ y el $M4 \cup 3_\eta$, cuyas pérdidas anuales medias aumentan hasta los 16,161.6 motores, que traducidos a euros equivalen a 6.4 M€$/año$ (ver figura 7.9). Sin embargo, los primeros no contemplan el control de la saturación media de los procesadores.

$M3 \cup 4$	$M4 \cup 3$	$M3 \cup 4_pmr$	$M4 \cup 3_pmr$	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$		$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$		$M3 \cup 4_\eta$	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta = M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$		
				$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T, \dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P$	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T, \dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P$	$M4 \cup 3_\eta$	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\dot{\alpha}^Z, \dot{\alpha}^P$
696.7	598.9	714.2	615.9	117.2	0.0	117.8	0.0	16,161.6	6514.4	2,134.8	0.0

Tabla 7.5: Número medio de motores perdidos anualmente por la sobrecarga obtenida con los modelos estudiados.



(a) Modelos con instantes absolutos.



(b) Modelos con instantes relativos.

Figura 7.9: Comparativa de las pérdidas medias, máximas y mínimas, anuales (miles de €/*año*) provocadas por la sobrecarga obtenida con los modelos evaluados: $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_pmr$, $M4 \cup 3_pmr$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$, $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, $M3 \cup 4_\eta$, $M4 \cup 3_\eta$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$).

Vemos, por tanto, que si se desea respetar las condiciones pactadas entre compañía y sindicatos, respecto a la ocupación de los trabajadores, se hace indispensable la incorporación, a los modelos, de la activación del ritmo de trabajo de los procesadores. De esta manera, con una activación media del ritmo de trabajo del $6.\widehat{66}\,\%$, se consigue finalizar el $100\,\%$ del trabajo requerido, respetando, en todo momento, las condiciones laborales pactadas.

Por otro lado, cabe destacar que, los beneficios que se obtienen por aumentar el factor de actividad durante algunos periodos de la jornada laboral, pueden destinarse a la compensación de los trabajadores de la línea pues, a pesar de mejorar sus condiciones laborales, en cuanto a su ocupación o saturación, y estar dentro de las condiciones, en cuanto a nivel máximo de actividad, pactadas por convenio, estarán realizando un sobre-esfuerzo en los momentos en que deban aumentar su ritmo de trabajo.

De hecho, comparando la situación inicial (correspondiente a las pérdidas dadas por los modelos $M3 \cup 4$ y el $M4 \cup 3$), con la correspondiente con activación del ritmo de trabajo (resultado de los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$ y el $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I(\dot{\alpha}^T)_\eta$), la compañía puede llegar a obtener un beneficio medio de $123{,}636.7$ y $84{,}528.6$ euros anuales, al completar la producción diaria total ($T = 270$ motores), compensando a los trabajadores el sobre-esfuerzo que supone el aumento de la actividad, en base al coste máximo por hora trabajada (25 €$/h$). Incluso, si además se limita la saturación dinámica media de los procesadores, este beneficio puede llegar a ser de 6.26 millones de euros anules si se consideran las funciones de actividad trapezoide y/o parabólica.

De forma similar, la empresa puede completar el $100\,\%$ de su demanda, mediante la incorporación de operarios refuerzo, manteniendo las condiciones de saturación pactadas por convenio. Bajo esta situación, en la que únicamente se recurre a los operarios refuerzo para hacer frente a la sobrecarga de trabajo, el beneficio neto medio anual que podría obtenerse es de 5.5 millones de euros, considerando el caso más extremo, en el que cada estación sobrecargada es asistida por un único operario especializado y teniendo en cuenta el coste laboral de estos operarios.

Por otra parte, cuando se desea que el objetivo del problema esté en sintonía con principios *JIT* y que se eviten las concentraciones de sobrecarga y trabajo, las pérdidas generadas son de 286 y 246 miles de euros. Estos resultados, obtenidos a través de los modelos $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, son, aproximadamente, un $3\,\%$ peores que los obtenidos con $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$. Sin embargo, las ganancias obtenidas, en cuanto a regularidad del trabajo requerido y la producción acumulada, son de más del $90\,\%$.

Por último, el hecho de haber utilizado diferentes planes de producción a la hora de evaluar los modelos, nos ha permitido observar la dependencia de los resultados frente al mix de producción. Por un lado, el análisis de la distribución de la sobrecarga obtenida con los modelos $M3 \cup 4$ y el $M4 \cup 3$, y por el otro, el cálculo de la saturación estática media, nos mostró cómo la sobrecarga y la sobre-saturación se concentraba en 5 de las 21 estaciones de la línea y, significativamente, en los motores para furgones, el p_4 y p_9.

Con todo, hemos comprobado que, si bien, en algunos casos ($M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$) los resultados ofrecidos por los modelos con instantes de inicio relativos ($4 \cup 3$) son mejores que los ofrecidos por los modelos con instantes absolutos ($3 \cup 4$), esta diferencia desaparece al considerar el factor de actividad o la saturación de los procesadores. En efecto, ambos modelos proporcionan resultados prácticamente idénticos cuando éstos incorporan la limitación de la saturación media y máxima de los procesadores de las estaciones de trabajo.

Finalmente, para concluir, cabe remarcar que, tal y como nos propusimos al inicio de este trabajo de investigación, se han desarrollado diferentes variantes para le problema *MMSP-W*, definiendo conceptos no tenidos en cuenta en este problema, formulando nuevos modelos matemáticos, explotándolos mediante un caso de estudio real y evaluándolos. Todo ello, considerando aspectos económicos, sociales y legales.

Capítulo 8

LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo desarrollado a lo largo de esta tesis deja abiertas diversas líneas de investigación. Por ello, en esta sección se comentan algunas de las principales.

Del mismo modo, se comentan algunas futuras líneas de investigación que, a pesar de no tratar el problema de secuenciación en líneas de montaje de productos mixtos, están relacionadas con otros problemas que pueden darse en una línea con estas características.

8.1. Investigaciones Futuras sobre el *MMSP-W*

A lo largo de esta tesis se ha estudiado el *MMSP-W*, desde dos perspectivas. Por un lado, desde la perspectiva meramente productiva y, por otro, desde el punto de vista laboral, en cuanto a condiciones de trabajo para los recursos humanos. Así, tras unificar los modelos de la literatura, obteniendo dos modelos matemáticos equivalentes, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, se propusieron diferentes variantes para el problema.

Teniendo en cuenta características propias de la ideología de gestión *JIT*, se incorporó al *MMSP-W* el concepto de regularidad de trabajo requerido, de trabajo completado y de sobrecarga de trabajo. Estos conceptos dieron lugar a la formulación de un conjunto de modelos matemáticos multi y mono-objetivos. De todos ellos, únicamente se evaluaron los modelos con un sólo objetivo, el $M3 \cup 4_pmr$ y el $M4 \cup 3_pmr$ y un modelo mono-objetivo, el $M4'_RWR$, cuyo objetivo es la minimización de una función de ponderación de dos atributos, la sobrecarga total generada y la discrepancia entre el trabajo requerido y el trabajo completado. Por este motivo, en futuros trabajos sería interesante evaluar el comportamiento de los modelos multi-objetivo, aquí propuestos, los modelos $M3 \cup 4_WLRV$, $M4 \cup 3_WLRV$, $M3 \cup 4_PRV$ y $M4 \cup 3_PRV$.

Con la optimización multi-objetivo el problema de la secuenciación se adaptaría mejor a situaciones reales, ya que en muchas ocasiones, la calidad de las acciones productivas depende de varios criterios y no sólo de uno. En efecto, los nuevos modelos nos permitirán minimizar, simultáneamente, la sobrecarga de trabajo o trabajo no completado y la no-regularidad del trabajo completado, del trabajo requerido o de la misma sobrecarga. O bien, maximizar el trabajo total completado y minimizar, simultáneamente, la no-regularidad del trabajo completado, del trabajo requerido o de la misma sobrecarga. De esta manera, además de intentar cumplir al máximo el plan de producción, dentro de los tiempos establecidos, se intentará equilibrar la carga de los procesadores de trabajo, evitando así, la acumulación de trabajo en determinadas estaciones de trabajo y determinados instantes de la jornada laboral.

Cabe destacar también, que la optimización multi-objetivo no nos proporcionará una única solución, como lo hace la mono-objetivo, sino que nos devolverá un frente de Pareto[1]. Por lo tanto, la decisión de llevar a cabo una opción u otra, dependerá de las necesidades de cada momento.

Por otro lado, otra de las líneas de investigación que deja abierta esta tesis, es la activación de los procesadores de trabajo en función de las necesidades de cada uno de ellos. En este trabajo, se ha fijado, para todos los procesadores, un factor de ritmo de trabajo, a lo largo de la jornada laboral, de acuerdo a una funciones prefijadas, en las que la variación del factor de actividad seguía una forma escalona, triangular, trapezoidal o parabólica. Esta variación de funciones de ritmo de trabajo, nos ha permitido comprobar cómo la sobrecarga depende del nivel de activación. En efecto, con la función escalón no se completaba el $100\,\%$ del trabajo requerido, mientras que para las funciones triangular, trapezoidal y parabólica la sobrecarga de trabajo era nula. Esto último, nos muestra que con un menor esfuerzo se pueden conseguir los mismos resultados, pues la activación media que supone la función triangular es menor que la activación media de las funciones trapezoidal y/o parabólica.

Por este motivo, sería interesante considerar un factor de actividad, de los procesadores, variable en función del trabajo que se le requiera a cada uno de ellos, en cada instante de tiempo. Evidentemente, este factor debería estar limitado tanto inferior como superiormente.

Con esta nueva línea de investigación, lo que se pretende es conseguir la menor activación posible, por parte de los procesadores, necesaria para la consecución de la totalidad del trabajo requerido. De esta manera, se aprovechará al máximo el tiempo de trabajo disponible de los procesadores y, por tanto, se reducirá su tiempo ocioso.

[1]Conjunto de soluciones no dominadas.

Otra ampliación interesante, sería contemplar, dentro del problema de secuenciación, la activación del ritmo de trabajo de los procesadores, con el enfoque propuesto en esta tesis o con el propuesto para futuras investigaciones, y/o la regularidad del trabajo completado, del trabajo requerido y de la sobrecarga de trabajo, en caso de que exista.

Esta última ampliación da lugar a multitud de nuevos problemas de optimización mono y multi-objetivo. Y, además, introduce en el *MMSP-W*, de forma simultánea, propiedades de los problemas de scheduling, junto con aspectos más relacionados con los recursos humanos y la ergonomía.

Teniendo en cuenta la disciplina de la ergonomía, otra variante que puede aparecer del *MMSP-W* es la consideración de los riesgos ergonómicos asociados a las operaciones. La idea es que, además de considerar otros factores, a la hora de secuenciar se tengan en cuenta las cargas físicas y psíquicas de las operaciones, con el fin de que los procesadores estén expuestos al menor riesgo ergonómico posible o respeten un riesgo máximo dado. Esta línea de investigación se sustenta en otros trabajos publicados, sobre el equilibrado de líneas de montaje (Bautista, Batalla y Alfaro, 2012c, 2013c).

Por otra parte, en cuanto a la última de las variantes presentadas en esta tesis, se han dejado, claramente, dos líneas de investigación abiertas. La primera, consiste en extender el *MMSP-W* con la limitación de la saturación media y máxima de los procesadores, considerando la intervención de procesadores refuerzo polivalentes que puedan apoyar a diferentes puestos de trabajo. Y, la segunda línea, consiste, también, en limitar la saturación media pero permitiendo, en este caso, rotaciones entre k_r estaciones consecutivas, de forma que un procesador sobre-saturado se compense con otro con una baja-saturación, en un plazo medio de tiempo.

Tal y como se ha indicado en este trabajo, la segunda opción sólo será posible en caso de que la compañía permita que los procesadores puedan sobrepasar la saturación media en determinados momentos. En caso contrario, esta extensión del modelo sólo podrá ser considerada para mejorar la saturación media de los procesadores[2].

Evidentemente, las variantes presentadas en esta tesis y las propuestas para trabajos futuros, pueden combinarse entre sí. Así, por ejemplo, podemos considerar, en la secuenciación de productos mixtos, tiempos de proceso variables en función de la actividad del trabajador, la limitación de la saturación de los mismos y el equilibrado de su carga de trabajo. De esta forma, obtendremos problemas cada vez más cercanos a los entornos industriales actuales, en los que la calidad laboral de los trabajadores se alinea con uno de los objetivos primordiales de toda empresa, la productividad.

[2]Para reducir la saturación media de los procesadores por debajo del límite establecido, η^{∞}_{med}.

En definitiva, en futuras investigaciones seguiremos con el objetivo de adaptar los modelos del *MMSP-W* a situaciones más reales de entornos productivos.

Cabe destacar también que, otra posible línea de trabajo es considerar, en todas las variantes estudiadas hasta el momento y en las que se estudien en trabajos futuros, la interrupción del trabajo en proceso en los límites establecidos por la finalización del ciclo o la finalización de la ventana temporal y no en cualquier instante comprendido entre ambos límites, como se ha implementado hasta ahora.

Además, dado que a lo largo de toda esta tesis, únicamente se ha utilizado la programación matemática como herramienta de resolución, en futuros trabajos, se evaluará el comportamiento de los modelos propuestos, aquí o en futuras investigaciones, bajo otros procedimientos de resolución, como por ejemplo, la programación dinámica acotada, metaheurísticas en general y, en concreto, algoritmos evolutivos y bioinspirados.

Por otro lado, además de lo anterior, cabe la posibilidad de incorporar, a los modelos y procedimientos, técnicas Fuzzy[3] aplicadas a los procesos de decisión, ante situaciones en las que varíe la demanda y los tiempos de proceso de las operaciones de los distintos tipos de producto.

8.2. Otras Futuras Líneas de Trabajo

Paralelamente a las líneas de investigación que surgen tras realizar esta tesis, seguiremos trabajando en otros problemas relacionados con las líneas de montaje mixtas.

Uno de estos problemas, está estrechamente relacionado con el *MMSP-W*, pues es otro problema de secuenciación. Se trata del *ORV*[4].

La línea de investigación abierta en este sentido, consiste en la incorporación del concepto de regularidad de la producción en el *ORV*. En este caso también disponemos de modelos mono y bi-objetivo formulados, por lo tanto, algunas de las posibles vías de investigación son: (1) pasar a la optimización multi-criterio, (2) evaluar diferentes procedimientos de resolución y/o (3) ampliar las experiencias computacionales con otros ejemplares de datos más complejos.

[3]Conjunto de técnicas de Inteligencia Artificial, basadas en lógica borrosa o difusa, que permiten seleccionar, incorporando el azar, entre dos valores o alternativas en los procesos de toma de decisiones.

[4]Output Rate Variation.

Por otro lado, también se ha trabajado en el equilibrado de líneas de montaje. En este caso, el estudio se basa en la consideración de riesgos ergonómicos, además de otros atributos, como son, el número de estaciones de la línea, el tiempo de ciclo o el área disponible de las estaciones. En concreto, la investigación, en este sentido, se dirige a la definición de un método unificador para evaluar los distintos riesgos ergonómicos presentes en una línea y a la resolución de los modelos propuestos mediante otros procedimientos heurísticos.

También, otra posible línea, es la de incorporar al equilibrado algunos de los conceptos presentados en este trabajo, como es el caso de la saturación de los procesadores asignados a las estaciones de trabajo y el factor de actividad asociado a las tareas.

Obviamente, las técnicas Fuzzy también tienen cabida en estos trabajos.

Vemos, por tanto, que a pesar de trabajar en diferentes líneas de investigación, todas ellas tienen un punto en común, las líneas de montaje de productos mixtos.

Capítulo 9

PUBLICACIONES

Para finalizar, en este capítulo se recogen las publicaciones realizadas hasta el momento. En primer lugar, se presentan todas aquellas publicaciones relacionadas con la investigación realizada a lo largo de esta tesis doctoral, distinguiendo entre artículos publicados en revistas, capítulos de libro y comunicaciones a congresos. Y, en segundo lugar, se presentan el resto de publicaciones que, a pesar de no estar directamente relacionadas con el trabajo aquí presentado, se han realizado a lo largo de los últimos años como profesora ayudante.

9.1. Publicaciones relacionadas con el *MMSP-W*

A continuación se presentan, cronológicamente, los artículos resultantes de esta tesis, indicando la revista en la que han sido publicados y el índice de impacto de la misma. Del mismo modo, se enumeran dos artículos aún no publicados, uno de los cuales está siendo modificado, actualmente, en base a las recomendaciones de los revisores y el otro permanece bajo revisión.

- ***Modeling and solving a variant of the mixed-model sequencing problem with work overload minimisation and regularity constraints. An application in Nissan's Barcelona Plant***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A. y Alfaro, R.*
  - Año: *2012*.
  - Revista (título, volúmen, páginas): *Expert Systems with Applications, vol. 39/12, Elsevier, 11001 - 11010*.
  - Índice de Impacto (SCI/SSCI): *1.854*.
  - Cuartil y área (SCI/SSCI): *Q1 (13/79). Operations research & Management science*.
  - ISSN: *0957-4174*.

- ***Models for MMSP-W considering workstation dependencies: A case study of Nissan's Barcelona plant***

  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A. y Alfaro, R.*
  - Año: *2012*.
  - Revista (título, volúmen, páginas): *European Journal of Operational Research, vol. 223, Elsevier, 669-679*.
  - Índice de Impacto (SCI/SSCI): *2.038*.
  - Cuartil y área (SCI/SSCI): *Q1 (9/79). Operations research & Management science*.
  - ISSN: *0377-2217*.

- ***Modeling and Solving the Mixed-Model Sequencing Problem to Improve Productivity***

  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R.; Batalla, C. y Cano, A.*
  - Revista: *International Journal of Production Economics.*
  - Estado: *en proceso de revisión*.

- ***Incorporating Working Conditions into a Sequencing problem in a Mixed-Products Line***

  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R. y Llovera, S.M.*
  - Estado: *en proceso de revisión*.

En cuanto a los capítulos de libro publicados y aceptados, por orden cronológico, son:

- ***Incorporating Regularity of Required Workload to the MMSP-W with Serial Workstations and Free Interruption of the Operations***

  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A. y Alfaro, R.*
  - Año: *2013*.
  - Libro (título, series, vólumen, páginas): *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services. IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2012, Rhodes, Greece, September 24-26, 2012, Revised Selected Papers, Part I. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 397, 405-412*.
  - Editorial: *Springer Berlin Heidelberg*.
  - ISBN: *978-3-642-40351-4 (Print) / 978-3-642-40352-1 (Online)*.

- ***Modeling and Solving a Variant of MMSP-W Problem with Production Mix Restrictions***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A. y Alfaro, R.*
  - Año: *2014*.
  - Libro (título, series, páginas): *Annals of Industrial Engineering 2012. Industrial Engineering: overcoming the crisis, 235-243* .
  - Editorial: *Springer Berlin Heidelberg*.
  - ISBN: *978-1-4471-5348-1*.

- ***Incorporating the work pace concept into the MMSP-W***
  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R.; Batalla, C. y Cano, A*
  - Año: *2014*.
  - Libro (título, series, vólumen, páginas): *Managing Complexity. Challenges for Industrial Engineering and Operations Management. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering, vol. 2, 247-254*.
  - Editorial: *Springer Berlin Heidelberg*.
  - ISBN: *978-3-319-04704-1*.

Finalmente, las comunicaciones a congresos realizadas y relacionadas con el problema objeto de estudio de esta tesis, el *MMSP-W*, son:

- ***Modelos para el MMSP-W con estaciones en serie, procesadores paralelos, libre interrupción de operaciones y homogeneidad del trabajo requerido***
  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R. y Cano, A.*
  - Año: *2012*.
  - Congreso: *XXXIII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa (SEIO 2012). VII Jornadas de Estadística Pública. Madrid*.
  - Publicación (tipo, páginas): *Libro de actas, 41*.

- ***Incorporando regularidad del trabajo requerido al MMSP con mínima sobrecarga***
  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R. y Cano, A.*
  - Año: *2012*.

- Congreso: *VI International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVI Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2012). Vigo*.
- Publicación (tipo, páginas): *Industrial Engineering: Overcoming the Crisis. Book of Full Papers, 1562-1569*.
- ISBN: *978-84-938642-5-5*.

- ***Modeling and Solving a Variant of MMSP-W Problem with Production Mix Restrictions***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A. y Alfaro, R.*
  - Año: *2012*.
  - Congreso: *VI International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVI Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2012). Vigo*.
  - Publicación (tipo, páginas): *Industrial Engineering: Overcoming the Crisis. Book of Full Papers, 1546-1553*.
  - ISBN: *978-84-938642-5-5*.

- ***Incorporating Regularity of Required Workload to the MMSP-W with Serial Workstations and Free Interruption of the Operations***
  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R. y Cano, A.*
  - Año: *2012*.
  - Congreso: *International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2012). Rodas (Grecia)*.
  - Publicación (tipo): *Proceedings(CD)*.

- ***Hybrid procedure based on Bounded Dynamic Programming and Linear Programming for solving a variant of the MMSP-W***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A.; Alfaro, R. y Batalla, C.*
  - Año: *2013*.
  - Congreso: *IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (MIM 2013). San Petersburgo (Rusia)*.
  - Publicación (tipo, páginas): *Preprints (CD), 1943-1948*..

- ***Solving the Mixed Model Sequencing Problem with Workload Minimization with Product Mix Preservation***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A.; Alfaro, R. y Batalla, C.*
  - Año: *2013*.
  - Congreso: *VII International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVII Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2013). Valladolid*.
  - Publicación (tipo, páginas): *Industrial Engineering and Complexity Management. Book of Proceedings, 409-417*.
  - ISBN: *978-84-616-5410-9*.

- ***Incorporating the Work Pace Concept into the MMSP-W***
  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R.; Batalla, C. y Cano, A.*
  - Año: *2013*.
  - Congreso: *VII International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVII Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2013). Valladolid*.
  - Publicación (tipo, páginas): *Industrial Engineering and Complexity Management. Book of Proceedings, 427-435*.
  - ISBN: *978-84-616-5410-9*.

- ***Impact due to the Saturation Concept in Assembly Lines on the Work Overload***
  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R.; Batalla, C. y Cano, A.*
  - Año: *2014*.
  - Congreso: *XII Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales (ORP 2014). Zaragoza*.
  - Publicación (tipo, páginas): *Abstract-Conference Paper. Archivos de Prevención de riesgos laborales. Especial Congreso 1, Vol. 17, 27*.
  - ISSN: *1138-9672*.

- ***Mixed-Model Sequencing Problem Improving Labour Conditions***
  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R.; Batalla, C. y Llovera, S.M.*
  - Año: *2014*.

- Congreso: *8th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (XVIII Congreso de Ingeniería de Organización). XX International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. International IIE Conference 2014 (CIO 2014). Julio 2014, Málaga*.
- Publicación (tipo, páginas): *The global reach of industrial engineering. Enhancing synergies in a collaborative environment. Book of Abstracts, 86*.
- ISSN: *978-84-617-0923-6*.

- ***Incorporando Condiciones Laborales a Problemas de Secuencias en Líneas de Productos Mixtos***
  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R. y Batalla, C.*
  - Año: *2014*.
  - Congreso: *XXIV Congreso Nacional de ACEDE. Septiembre 2014, Castellón*.
  - Estado comunicación: *Aceptada*.

9.2. Otras Publicaciones

A continuación se detallan otras publicaciones que se han desarrollado, paralelamente a la tesis, y que tratan otros problemas relacionados con las líneas de montaje en entornos *JIT* y *DS*. Al igual que en el punto anterior, se distinguirá entre artículos, capítulos de libro y comunicaciones a congresos.

En este caso, los artículos realizados están en proceso de revisión y son:

- ***Models for Assembly Line Balancing by Temporal, Spacial and Ergonomic Risk Attributes***
  - Autores: *Bautista, J.; Batalla, C; Alfaro, R. y Cano, A.*
  - Estado: *en proceso de revisión*.

En cuanto a los capítulos de libro publicados, tenemos:

- ***Performance of Bounded Dynamic Programming applied to a variant of the MMSP-W problem***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A. y Alfaro, R.*

- Año: *2012*.
- Libro (título, series, vólumen, páginas): *Industrial Engineering: Innovative Networks. 5th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management ÇIO 2011", Cartagena, Spain, September 2011, Proceedings, 413-420*.
- Editorial: *Springer Berlin Heidelberg*.
- ISBN: *978-1-4471-2321-7*.

- ***Incorporating Ergonomics Factors into the TSALBP***
  - Autores: *Bautista, J.; Batalla, C. y Alfaro, R.*
  - Año: *2013*.
  - Libro (título, series, vólumen, páginas): *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services. IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2012, Rhodes, Greece, September 24-26, 2012, Revised Selected Papers, Part I. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 397, 413-420*.
  - Editorial: *Springer Berlin Heidelberg*.
  - ISBN: *978-3-642-40351-4 (Print) / 978-3-642-40352-1 (Online)*.

- ***Impact of the Production Mix Preservation on the ORV Problem***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A.; Alfaro, R. y Batalla, C.*
  - Año: *2013*.
  - Libro (título, series, vólumen, páginas): *Advances in Artificial Intelligence. 15th Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence, CAEPIA 2013, Madrid, September 17-20, 2013, Proceedings. Lecture Notes in Computer Science, vol. 8109, 250-259*.
  - Editorial: *Springer Berlin Heidelberg*.
  - ISBN: *978-3-642-40642-3*.

Por último, otras comunicaciones a congresos realizadas paralelamente a esta tesis, son:

- ***Simulación de la dinámica de un almacén distribuidor de equipos de medida de energía eléctrica destinada al consumo***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A. y Alfaro, R.*

- Año: *2011*.
- Congreso: *V International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XV Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2011). Cartagena*.
- Publicación (tipo, páginas): *Actas, 857-866*.
- ISBN: *978-84-694-7124-1*.

- ***Performance of Bounded Dynamic Programming applied to a variant of the MMSP-W problem***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A. y Alfaro, R.*
  - Año: *2011*.
  - Congreso: *V International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XV Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2011). Cartagena*.
  - Publicación (tipo, páginas): *Proceedings, 339-348*.
  - ISBN: *978-1-4471-2320-0*.

- ***A bounded dynamic programming algorithm for the MMSP-W considering workstation dependencies and unrestricted interruption of the operations***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A. y Alfaro, R.*
  - Año: *2011*.
  - Congreso: *11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2011). Córdoba*.
  - Publicación (tipo): *Proceedings(CD)*.
  - ISBN: *978-1-4577-1675-1*.

- ***Algoritmos GRASP para el MMSP-W con estaciones en serie y libre interrupción de operaciones***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A. y Alfaro, R.*
  - Año: *2012*.
  - Congreso: *VIII Congreso Español sobre Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB 2012). Albacete*.
  - Publicación (tipo, páginas): *Actas, 751-758*.

- ISBN: *978-84-615-6931-1*.

- ***Solving the ORVP with Preservation of the Production Mix using BDP***

  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R. y Cano, A.*
  - Año: *2012*.
  - Congreso: *VI International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XVI Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2012). Vigo*.
  - Publicación (tipo): *Industrial Engineering: Overcoming the Crisis. Book of Full Papers, 1554-1561*.
  - ISBN: *978-84-938642-5-5*.

- ***Incorporating Ergonomics Factors into the TSALBP***

  - Autores: *Bautista, J.; Batalla, C. y Alfaro, R.*
  - Año: *2012*.
  - Congreso: *International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2012). Rodas (Grecia)*.
  - Publicación (tipo): *Proceedings(CD), 869-874*.

- ***Extended Models for TSALBP with Ergonomic Risk Constraints***

  - Autores: *Bautista, J.; Batalla, C.; Alfaro, R. y Cano, A.*
  - Año: *2013*.
  - Congreso: *IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control (MIM 2013). San Petersburgo (Rusia)*.
  - Publicación (tipo, páginas): *Preprints (CD), 869-874*.

- ***Impact of Ergonomic Risk Reduction in the TSALBP-1***

  - Autores: *Bautista, J.; Batalla, C.; Alfaro, R. y Cano, A.*
  - Año: *2013*.
  - Congreso: *VII International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XVII Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2013). Valladolid*.

- Publicación (tipo, páginas): *Industrial Engineering and Complexity Management. Book of Proceedings, 436-444.*
- ISBN: *978-84-616-5410-9.*

- ***Algoritmos GRASP para solucionar el problema Blocking Flow Shop***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A.; Alfaro, R. y Batalla, C.*
  - Año: *2013.*
  - Congreso: *IX Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB 2013). Madrid.*
  - Publicación (tipo, páginas): *Actas, 443-452.*
  - ISBN: *978-84-695-8348-7.*

- ***Impact of the Production Mix Preservation on the ORV Problem***
  - Autores: *Bautista, J.; Cano, A.; Alfaro, R. y Batalla, C.*
  - Año: *2013.*
  - Congreso: *XV Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial (CAEPIA). Madrid.*
  - Publicación (tipo, páginas): *Lecture Notes in Computer Science, vol. 8109, 250-259.*
  - ISBN: *978-3-642-40642-3.*

- ***Modelos para la localización y cubrimiento del servicio de desfibrilación semiautomática en espacios públicos de Barcelona***
  - Autores: *Bautista, J.; Soriano, J.M.; Alfaro, R.; Batalla, C.; Llovera, S.*
  - Año: *2014.*
  - Congreso: *XII Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales (ORP 2014). Zaragoza.*
  - Publicación (tipo, páginas): *Abstract-Conference Paper. Archivos de Prevención de riesgos laborales. Especial Congreso 1, Vol. 17, 40.*
  - ISSN: *1138-9672.*

- ***Unifying metrics of risk assessment methods for application to mixed models assembly line balancing problems***

- Autores: *Bautista, J.; Batalla, C.; Alfaro, R.; Sánchez , P.*
- Año: *2014*.
- Congreso: *XII Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales (ORP 2014). Zaragoza*.
- Publicación (tipo, páginas): *Abstract-Conference Paper. Archivos de Prevención de riesgos laborales. Especial Congreso 1, Vol. 17, 27*.
- ISSN: *1138-9672*.

- ***Ergonomic Risk Minimisation in Assembly Line Balancing***
  - Autores: *Bautista, J.; Batalla, C. y Alfaro, R.*
  - Año: *2014*.
  - Congreso: *8th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (XVIII Congreso de Ingeniería de Organización). XX International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. International IIE Conference 2014 (CIO 2014). Julio 2014, Málaga*.
  - Estado comunicación: *Aceptada*.

- ***Diseño y equilibrado de Líneas de Montaje Minimizando el Riesgo Ergonómico***
  - Autores: *Bautista, J.; Alfaro, R. y Batalla, C.*
  - Año: *2014*.
  - Congreso: *XXIV Congreso Nacional de ACEDE. Septiembre 2014, Castellón*.
  - Estado comunicación: *Aceptada*.

— Parte IV —

Anexos

ANEXOS A

Equilibrado de la Línea de Motores del Caso NISSAN-9ENG

A continuación se recogen los resultados obtenidos tras el equilibrado de la línea de montaje de Nissan, mediante el *TSALBP*.

Específicamente, en la tabla se recogen los tiempos de proceso t_j de las 140 operaciones, necesarias para la fabricación de un motor, el área requerida por cada operación, a_j, el conjunto de precedentes inmediatas de cada una de las operaciones, P_j, y la estación a la que ha sido asignada tras el equilibrado mediante el *TSALPB-1* .

j	*Id.*	t_j	a_j	P_j	*TSALPB-1*
1	50100	60.0	3.0	-	1
2	50110	75.0	2.0	3 , 31	6
3	50120	20.0	0.5	1	2
4	50500	60.0	1.0	3 , 5	3
5	50501	20.0	0.5	1	1
6	50600	60.0	1.5	4 , 5	4
7	50800	45.0	1.0	1	3
8	50900	10.0	0.5	1	2
9	51000	20.0	0.5	1	1
10	51200	30.0	0.5	1	2
11	51400	15.0	0.5	1	2
12	51401	15.0	0.5	11	4
13	51600	15.0	1.0	1	2

Continúa en la página siguiente.

j	*Id.*	t_j	a_j	P_j	*TSALPB-1*
14	51800	10.0	0.5	1 , 13	2
15	52000	8.0	1.0	9 , 10 , 11 , 13 , 14	3
16	52010	8.0	0.5	9 , 10 , 11 , 13 , 14	4
17	52200	80.0	1.0	9 , 10 , 11 , 13 , 14	4
18	52400	40.0	0.5	9 , 10 , 11 , 13 , 14	3
19	52600	5.0	0.5	9 , 10 , 11 , 13 , 14	3
20	52610	5.0	0.5	9 , 10 , 11 , 13 , 14	2
21	52650	5.0	0.5	9 , 10 , 11 , 13 , 14	4
22	52700	7.0	0.5	26 , 27	5
23	52710	7.0	0.5	26 , 27	5
24	52720	30.0	0.5	26 , 27	5
25	52730	30.0	0.5	26 , 27	5
26	52750	5.0	0.5	15 , 16 , 17 , 18 , 19 , 20 , 21	5
27	52760	5.0	0.5	15 , 16 , 17 , 18 , 19 , 20 , 21	5
28	52800	30.0	1.0	22 , 23 , 24 , 25	5
29	52820	10.0	0.5	28	6
30	52900	15.0	1.0	29	6
31	52901	10.0	0.0	6 , 7 , 8 , 30	6
32	53050	15.0	0.5	31	6
33	53100	30.0	1.0	32	7
34	53200	10.0	0.5	32	7
35	53300	5.0	0.5	36	7
36	53301	25.0	1.0	32	7
37	53400	15.0	0.0	32 , 35 ,	7
38	53600	5.0	0.5	33 , 34 , 36 , 37	7
39	53630	5.0	0.5	33 , 34 , 36 , 37	8
40	53650	5.0	0.5	33 , 34 , 36 , 37	7
41	54000	60.0	0.5	38 , 39 , 40	8
42	54100	15.0	1.5	38 , 39 , 40	8
43	54120	15.0	1.5	38 , 39 , 40	8
44	54200	25.0	0.5	41 , 42 , 43	9
45	54210	25.0	0.5	41 , 42 , 43	9
46	54230	5.0	0.5	44 , 45	9
47	54240	35.0	0.5	46	9
48	54250	35.0	0.5	46	9

Continúa en la página siguiente.

j	*Id.*	t_j	a_j	P_j	*TSALPB-1*
49	54260	5.0	0.5	42 , 43	9
50	54270	15.0	0.5	47 , 48 , 49	10
51	54280	25.0	0.0	47 , 48 , 49	9
52	54290	30.0	0.0	47 , 48 , 49	10
53	54300	15.0	0.0	47 , 48 , 49	10
54	54310	15.0	0.0	47 , 48 , 49	10
55	54320	20.0	0.0	47 , 48 , 49	10
56	54330	10.0	0.0	47 , 48 , 49	10
57	54370	10.0	0.5	50 , 51 , 52 , 53 , 54 , 55 , 56	10
58	54500	20.0	0.5	57 , 59 , 60	10
59	54501	5.0	0.0	41	8
60	54520	20.0	0.5	42 , 43	9
61	54700	45.0	1.0	57 , 58	11
62	54720	30.0	0.5	61	11
63	54800	30.0	0.5	57	10
64	54820	10.0	0.5	57	10
65	55050	5.0	0.0	61 , 62 , 63 , 64	11
66	55200	10.0	0.5	61 , 62 , 63 , 64	11
67	55250	15.0	0.5	66	11
68	55300	60.0	1.5	65 , 67	11
69	55350	10.0	0.5	68	12
70	55400	30.0	1.0	67	12
71	55500	10.0	0.5	68	12
72	55540	10.0	0.5	68	12
73	55800	40.0	1.5	71 , 72	12
74	55900	25.0	0.5	68 , 69 , 70 , 73	13
75	56000	10.0	0.5	74	13
76	56020	10.0	1.0	74	13
77	56100	15.0	0.5	75	13
78	56200	15.0	0.5	79	13
79	56220	15.0	0.5	74	13
80	56300	10.0	0.5	76 , 77 , 78	13
81	56400	10.0	1.0	76 , 77 , 78	14
82	56401	10.0	0.0	80 , 81	14
83	56420	20.0	0.5	82	14

Continúa en la página siguiente.

j	*Id.*	t_j	a_j	P_j	*TSALPB-1*
84	56430	10.0	0.0	83	14
85	56440	20.0	0.5	75 , 84	14
86	56500	25.0	0.5	82	14
87	56600	20.0	0.5	82	14
88	56700	15.0	0.3	84	14
89	56750	20.0	0.5	88	15
90	56760	30.0	0.5	88	15
91	56800	20.0	0.5	85 , 86 , 87 , 88	14
92	56880	25.0	0.5	89 , 90 , 91	15
93	56900	10.0	0.5	92	15
94	56920	5.0	0.5	89 , 90 , 91	15
95	56940	20.0	0.5	94	15
96	57000	10.0	0.5	93 , 95 , 99	15
97	57050	5.0	0.5	93 , 95 , 99	15
98	57100	80.0	0.0	92	16
99	57120	30.0	0.0	89 , 90 , 91	15
100	57150	10.0	0.5	98 , 99	16
101	57160	10.0	0.5	98 , 99	16
102	57200	20.0	0.5	100 , 101	16
103	57210	30.0	0.5	100 , 101	16
104	57250	5.0	0.0	102 , 103	17
105	57300	30.0	0.5	106	17
106	57301	25.0	0.5	100 , 101	16
107	57400	5.0	0.0	100 , 101 , 104	17
108	57450	5.0	0.0	100 , 101 , 104	17
109	57500	5.0	0.5	108	17
110	57505	5.0	0.0	108	17
111	57510	10.0	0.0	109 , 11	17
112	57520	10.0	0.0	109 , 11	17
113	57530	15.0	0.5	108	17
114	57540	20.0	0.0	113	17
115	57550	20.0	0.0	113	17
116	57700	45.0	1.0	111 , 112 , 114 , 115	17
117	57900	20.0	0.5	118	18
118	57950	25.0	0.0	116	18

Continúa en la página siguiente.

j	*Id.*	t_j	a_j	P_j	*TSALPB-1*
119	58000	25.0	0.0	116	18
120	58050	20.0	0.5	119	18
121	58200	45.0	1.5	105 , 107 , 117 , 120	18
122	58201	15.0	0.5	121	18
123	58250	10.0	0.5	122	19
124	58300	10.0	0.0	123	19
125	58310	20.0	1.0	124	19
126	58350	30.0	0.5	125	19
127	58351	10.0	0.5	126	20
128	58400	25.0	0.5	117 , 12	18
129	58500	30.0	0.5	126	20
130	58900	30.0	0.8	127 , 128 , 129	20
131	59000	40.0	0.5	117 , 12	19
132	59100	25.0	1.0	131	19
133	59300	25.0	0.5	130	20
134	59320	20.0	0.5	132	19
135	59340	15.0	0.5	134	20
136	59400	20.0	0.5	135	20
137	59500	30.0	0.5	136	20
138	59510	30.0	0.5	136	21
139	59600	15.0	1.0	137 , 138	21
140	59900	120.0	0.0	133 , 139	21

Tabla A.1: Número (j), identificador interno (*Id.*), tiempo de proceso (t_j), área requerida (a_j) y conjunto de precedentes inmediatas (P_j) para cada una de las 140 operaciones correspondientes al montaje de un motor del caso NISSAN-9ENG. Solución del equilibrado de la línea, para el *TSALBP-1* considerando un tiempo de ciclo $c = 180\ s$ y un área máxima de $A = 4\ m$.

ANEXOS B

Resultados Experiencias Computacionales

En este anexo se exponen todos los resultados obtenidos en cada una de las experiencias computacionales desarrolladas y que no han sido expuestos en el documento de forma explícita. Del mismo modo, se presentan aquellos cálculos que han sido necesarios para la evaluación de los resultados, explicando cómo se han obtenido.

Todo ello, se presenta de forma estructurada, diferenciando todos los datos en función de la variante estudiada correspondiente.

B.1. Integración de Modelos para el *MMSP-W*

En esta primera parte del anexo de resultados, se exponen los resultados obtenidos tras la aplicación de los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, con los ejemplares de datos de la literatura (Bautista y Cano, 2008) y con los ejemplares correspondientes al caso NISSAN-9ENG. En concreto, las tablas que a continuación se presentan corresponden a:

Tabla B.1

En esta tabla se recogen los tiempos de CPU, en segundos, que han tardado los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ en obtener las soluciones óptimas de los 225 ejemplares de la literatura (Bautista y Cano, 2008), en el solucionador CPLEX. Cada uno de los ejemplares se identifica por el número de programa de producción ($P_1, \ldots, P_{45}$) y por el número de la estructura de tiempos de proceso a la que pertenecen ($E1, \ldots, E5$).

Tiempos de CPU														
P/E	$3 \cup 4$	$4 \cup 3$	*P/E*	$3 \cup 4$	$4 \cup 3$	*P/E*	$3 \cup 4$	$4 \cup 3$	*P/E*	$3 \cup 4$	$4 \cup 3$	*E/B*	$3 \cup 4$	$4 \cup 3$
1/1	0.08	0.08	***10/1***	2.64	2.48	***19/1***	21.81	18.66	***28/1***	6.97	14.65	***37/1***	32.99	55.56
1/2	0.27	0.55	***10/2***	1.67	4.47	***19/2***	5.56	6.56	***28/2***	10.89	18.64	***37/2***	8.02	3.64
1/3	0.11	0.19	***10/3***	0.14	0.22	***19/3***	8.64	75.28	***28/3***	1.02	4.52	***37/3***	40.92	63.59
1/4	0.03	0.08	***10/4***	0.16	0.17	***19/4***	23.50	36.06	***28/4***	0.91	26.31	***37/4***	33.53	79.78
1/5	0.31	1.31	***10/5***	1.78	2.25	***19/5***	49.49	29.58	***28/5***	13.94	18.50	***37/5***	18.66	13.50
2/1	0.14	0.19	***11/1***	85.75	99.80	***20/1***	6.94	37.00	***29/1***	11.03	34.33	***38/1***	23.20	29.69
2/2	0.08	0.08	***11/2***	7.50	13.41	***20/2***	7.06	13.41	***29/2***	9.25	11.75	***38/2***	1.30	0.27
2/3	0.94	1.05	***11/3***	11.70	108.31	***20/3***	4.47	6.95	***29/3***	0.95	4.70	***38/3***	1.70	7.17
2/4	0.03	0.08	***11/4***	85.19	509.58	***20/4***	11.48	70.67	***29/4***	1.05	30.97	***38/4***	2.89	13.97
2/5	1.17	1.50	***11/5***	3.94	5.06	***20/5***	11.64	11.44	***29/5***	6.97	7.97	***38/5***	9.53	14.64
3/1	0.95	1.09	***12/1***	89.03	117.25	***21/1***	55.42	58.49	***30/1***	9.78	21.70	***39/1***	15.98	32.50
3/2	0.06	0.08	***12/2***	21.14	17.14	***21/2***	44.19	41.77	***30/2***	12.13	15.25	***39/2***	1.94	2.38
3/3	0.09	0.13	***12/3***	73.55	180.28	***21/3***	3.47	39.97	***30/3***	68.31	70.41	***39/3***	4.11	10.27
3/4	0.14	0.16	***12/4***	123.20	1017.09	***21/4***	8.94	111.53	***30/4***	135.06	113.55	***39/4***	3.89	8.75
3/5	0.17	0.25	***12/5***	15.48	43.27	***21/5***	28.69	29.63	***30/5***	44.69	37.50	***39/5***	10.67	48.99
4/1	0.03	0.05	***13/1***	54.67	83.28	***22/1***	0.14	0.09	***31/1***	85.00	158.64	***40/1***	8.91	10.67
4/2	1.09	1.34	***13/2***	22.11	27.03	***22/2***	15.75	12.56	***31/2***	6.42	18.11	***40/2***	4.48	6.45
4/3	0.16	0.25	***13/3***	91.34	53.09	***22/3***	0.52	7.59	***31/3***	27.77	26.64	***40/3***	7.70	19.70
4/4	0.19	0.22	***13/4***	1336.69	1279.78	***22/4***	2.23	14.34	***31/4***	258.34	140.83	***40/4***	80.24	697.72
4/5	0.19	0.20	***13/5***	31.81	56.86	***22/5***	30.28	15.83	***31/5***	9.64	20.84	***40/5***	27.33	43.53
5/1	6.02	7.78	***14/1***	159.69	301.34	***23/1***	12.61	18.83	***32/1***	9.72	4.42	***41/1***	10.31	33.92
5/2	0.41	1.22	***14/2***	91.99	129.74	***23/2***	20.13	19.13	***32/2***	14.06	30.00	***41/2***	9.89	8.66
5/3	0.16	0.28	***14/3***	34.59	115.75	***23/3***	0.73	2.58	***32/3***	23.64	81.50	***41/3***	23.17	14.73
5/4	0.03	0.05	***14/4***	504.38	2329.84	***23/4***	1.70	16.33	***32/4***	27.31	104.34	***41/4***	37.09	66.06
5/5	4.11	4.19	***14/5***	9.09	35.23	***23/5***	11.77	9.55	***32/5***	27.84	55.66	***41/5***	20.88	51.23
6/1	3.84	4.33	***15/1***	63.41	210.13	***24/1***	0.25	0.27	***33/1***	60.55	97.31	***42/1***	26.09	32.30
6/2	4.23	4.70	***15/2***	63.14	33.20	***24/2***	10.67	16.34	***33/2***	7.81	7.64	***42/2***	3.02	6.20
6/3	6.83	8.70	***15/3***	15.45	49.97	***24/3***	5.97	121.03	***33/3***	10.45	12.92	***42/3***	3.36	18.03
6/4	64.73	92.63	***15/4***	56.06	1786.61	***24/4***	9.47	335.77	***33/4***	33.97	27.64	***42/4***	25.84	63.06
6/5	6.30	8.78	***15/5***	19.70	16.81	***24/5***	33.69	30.58	***33/5***	8.98	22.11	***42/5***	47.58	46.11
7/1	2.22	2.52	***16/1***	16.63	36.47	***25/1***	64.47	82.52	***34/1***	3.44	4.34	***43/1***	21.05	30.42
7/2	3.05	5.28	***16/2***	17.84	19.98	***25/2***	23.81	25.06	***34/2***	6.83	11.67	***43/2***	2.89	2.86
7/3	8.77	12.03	***16/3***	5.63	16.91	***25/3***	5.13	13.73	***34/3***	5.59	5.73	***43/3***	6.88	5.15
7/4	66.95	173.89	***16/4***	21.19	184.28	***25/4***	12.48	254.25	***34/4***	41.33	46.48	***43/4***	24.16	37.34
7/5	23.36	32.67	***16/5***	4.61	7.34	***25/5***	5.80	12.67	***34/5***	28.67	19.14	***43/5***	15.66	11.95
8/1	39.42	59.11	***17/1***	123.22	175.09	***26/1***	16.74	16.97	***35/1***	19.16	34.23	***44/1***	23.86	52.30
8/2	3.56	11.22	***17/2***	38.36	44.99	***26/2***	38.72	43.06	***35/2***	17.25	21.09	***44/2***	2.03	3.11
8/3	5.69	11.81	***17/3***	39.86	99.36	***26/3***	58.59	60.47	***35/3***	5.36	4.74	***44/3***	0.80	3.72
8/4	90.17	68.05	***17/4***	544.50	2533.22	***26/4***	61.86	164.92	***35/4***	13.75	30.13	***44/4***	2.47	4.06
8/5	2.91	8.72	***17/5***	7.13	10.47	***26/5***	108.53	126.44	***35/5***	7.98	16.13	***44/5***	8.42	10.30
9/1	3.63	5.30	***18/1***	42.02	38.14	***27/1***	39.36	54.14	***36/1***	7.80	9.92	***45/1***	6.32	21.58
9/2	3.09	6.38	***18/2***	5.14	6.92	***27/2***	52.39	59.63	***36/2***	8.11	8.80	***45/2***	2.27	1.95
9/3	17.33	11.08	***18/3***	7.45	15.45	***27/3***	24.05	39.98	***36/3***	38.83	34.41	***45/3***	3.92	9.50
9/4	92.13	135.94	***18/4***	21.27	35.25	***27/4***	48.27	103.81	***36/4***	65.83	216.19	***45/4***	2.86	19.09
9/5	6.56	12.03	***18/5***	10.39	22.11	***27/5***	17.11	26.84	***36/5***	37.73	74.55	***45/5***	7.42	23.83

Tabla B.1: Tiempos de CPU (s) utilizados por los modelos, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, en CPLEX, para obtener las soluciones óptimas de los 225 ejemplares, representados por el programa de producción y su estructura de tiempos (*P/E*).

Tablas B.2 y B.3

Estas tablas corresponden a los resultados obtenidos con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ para el conjunto de datos del caso NISSAN-9ENG. En efecto, la tabla A.2 recoge los resultados de los ejemplares de datos correspondientes a un día de trabajo con dos turnos y con una demanda total de $T = 270$ motores ($Bloque - I$). Mientras que la tabla A.3 recoge los resultados de los ejemplares con una demanda total de $T = 540$, correspondientes a dos días de trabajo ($Bloque - II$).

Concretamente, los valores que se detallan en estas tablas corresponden a:

V_0 : Cantidad total de trabajo requerido por cada plan de producción, $\epsilon \in$ E, al conjunto de estaciones, que componen la línea de motores.

$W_{3\cup4}$: Sobrecarga total obtenida con el modelo $M3 \cup 4$ cuando se concede un tiempo máximo de ejecución por ejemplar de $3600\ s$ y $7200\ s$, respectivamente.

$\overline{W}_{3\cup4}$: Sobrecarga media del conjunto de ejemplares representativos de una situación del mix de producción, obtenida con el modelo $M3 \cup 4$ cuando se concede un tiempo máximo de ejecución por ejemplar de $7200\ s$.

$W_{4\cup3}$: Sobrecarga total obtenida con el modelo $M4 \cup 3$ cuando se concede un tiempo máximo de ejecución por ejemplar de $3600\ s$ y $7200\ s$, respectivamente.

$\overline{W}_{3\cup4}$: Sobrecarga media del conjunto de ejemplares representativos de una situación del mix de producción, obtenida con el modelo $M4 \cup 3$ cuando se concede un tiempo máximo de ejecución por ejemplar de $7200\ s$.

$RPD_{CPU_{Limit}}$: Desviación porcentual relativa entre la sobrecarga obtenida con el modelo $M3\cup4$ y la obtenida con el modelo $M4\cup3$, para cada ejemplar de datos, cuando a ambos se les concede un tiempo límite de CPU de $3600\ s$ o de $7200\ s$.
Si el valor resultante es positivo, equivale a la disminución de cantidad de trabajo no completado de $M4\cup3$ respecto a $M3\cup4$. En cambio, si es negativo se corresponde con el aumento de sobrecarga de $M4 \cup 3$ respecto a $M3 \cup 4$

$$RPD\big(W, \epsilon, CPU_{Limit}\big) = \frac{W_{3\cup4}(\epsilon, CPU_{Limit}) - W_{4\cup3}(\epsilon, CPU_{Limit})}{W_{3\cup4}(\epsilon, CPU_{Limit})} \cdot 100 \qquad (\epsilon \in \mathrm{E}) \qquad \text{(B.1)}$$

Ejemplares $Bloque-I$	V_0	$W_{3\cup4}$ 3600 s	$W_{3\cup4}$ 7200 s	$\overline{W}_{3\cup4}$	$W_{4\cup3}$ 3600 s	$W_{4\cup3}$ 7200 s	$\overline{W}_{4\cup3}$	$RPD_{3600\ s}$	$RPD_{7200\ s}$
#1	807,420.0	266	255	255	228	228	228	14.29	10.59
#2	807,370.0	411	409		384	384		6.57	6.11
#3	807,260.0	464	449		446	425		3.88	5.35
#4	807,500.0	379	379		381	381		-0.53	-0.53
#5	807,375.0	714	702		667	654		6.58	6.84
#6	807,505.0	547	541	555	490	477	538	10.42	11.83
#7	807,265.0	759	743		743	728		2.11	2.02
#8	807,365.0	199	175		197	197		1.01	-12.57
#9	807,615.0	805	805		794	782		1.37	2.86
#10	807,135.0	1208*	1208*		1208*	1208*		0.00	0.00
#11	807,360.0	155	140		139	139		10.32	0.71
#12	807,360.0	362	314		326	326		9.94	-3.82
#13	807,427.0	353	353		384	384		-8.78	-8.78
#14	807,402.0	460	452	406	442	442	399	3.91	2.21
#15	807,335.0	517	497		459	452		11.22	9.05
#16	807,395.0	319	270		279	279		12.54	-3.33
#17	807,345.0	557	548		511	511		8.26	6.75
#18	807,535.0	700	700		678	678		3.14	3.14
#19	807,185.0	945*	945*		945*	945*		0.00	0.00
#20	807,415.0	209	167	595	194	182	597	7.18	-8.98
#21	807,585.0	635	635		660	660		-3.94	-3.94
#22	807,215.0	991	984		985	985		0.61	-0.10
#23	807,335.0	154	140		153	133		0.65	5.00
							Promedio	4.38	1.32

Tabla B.2: Trabajo total requerido por los 23 ejemplares del $Bloque-I$ del conjunto de datos NISSAN-9ENG. Sobrecarga obtenida por los modelos $M3\cup4$ y $M4\cup3$, para unos tiempos límite de CPU de 3600 s y 7200 s. Sobrecarga media de los ejemplares agrupados por situaciones del mix de producción. Mejora media, en sobrecarga, de la solución de $M4\cup3$, respecto a $M3\cup4$.

Ejemplares $Bloque-I$	V_0	$W_{3\cup4}$ 3600 s	$W_{3\cup4}$ 7200 s	$\overline{W}_{3\cup4}$	$W_{4\cup3}$ 3600 s	$W_{4\cup3}$ 7200 s	$\overline{W}_{4\cup3}$	$RPD_{3600\ s}$	$RPD_{7200\ s}$
#24	1,614,840.0	775	762	762	690	628	628	10.97	17.59
#25	1,614,765.0	1081	965		921	921		14.80	4.56
#26	1,614,520.0	1052	1015		969	969		7.89	4.53
#27	1,615,000.0	1024	960		833	717		18.65	25.31
#28	1,614,775.0	1591	1586		1473	1473		7.42	7.12
#29	1,615,010.0	1308	1266	1263	1605	1134	1158	-22.71	10.43
#30	1,614,530.0	1642	1634		1587	1587		3.35	2.88
#31	1,614,755.0	622	547		556	424		10.61	22.49
#32	1,615,255.0	1760	1752		1624	1624		7.73	7.31
#33	1,614,295.0	2475*	2475*		2475*	2475*		0.00	0.00
#34	1,614,745.0	543	429		309	258		43.09	39.86
#35	1,614,712.0	903	860		902	720		0.11	16.28
#36	1,614,890.0	993	904		923	817		7.05	9.62
#37	1,614,840.0	1228	1113	1001	1036	989	890	15.64	11.14
#38	1,614,662.0	1130	1119		1055	977		6.64	12.69
#39	1,614,815.0	844	814		798	741		5.45	8.97
#40	1,614,715.0	1295	1198		1182	1096		8.73	8.51
#41	1,615,095.0	1622	1554		1466	1437		9.62	7.53
#42	1,614,370.0	1968	1959		1950*	1950*		0.91	0.46
#43	1,614,830.0	623	623	1337	552	403	1242	11.40	35.31
#44	1,615,170.0	1582	1454		1390	1272		12.14	12.52
#45	1,614,455.0	2087	2067		2057	2049		1.44	0.87
#46	1,614,670.0	434	367		338	338		22.12	7.90
							Promedio	8.83	11.91

Tabla B.3: Trabajo total requerido por los 23 ejemplares del $Bloque-II$ del conjunto de datos NISSAN-9ENG. Sobrecarga obtenida por los modelos $M3\cup4$ y $M4\cup3$, para unos tiempos límite de CPU de 3600 s y 7200 s. Sobrecarga media de los ejemplares agrupados por situaciones del mix de producción. Mejora media, en sobrecarga, de la solución de $M4\cup3$, respecto a $M3\cup4$.

B.2. Incorporación del Concepto Regularidad en el *MMSP-W*

A continuación, en este segundo capítulo del Anexo B, se recogen todas las tablas de resultados y cálculos realizados con la segunda variante del *MMSP-W*, estudiada en esta tesis. Inicialmente, se presenta un conjunto de tablas correspondientes a los resultados obtenidos tras evaluar los 225 ejemplares de datos de la literatura (Bautista y Cano, 2008) con los modelos $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$. Más detalladamente, estas tablas son:

Tabla B.4

Recoge las soluciones, en cuanto a sobrecarga (en unidades de tiempo), obtenidas tanto con el modelo $M3 \cup 4_pmr$ como con $M4 \cup 3_pmr$, para cada uno de los ejemplares de la literatura (Bautista y Cano, 2008). Del mismo modo, y con el fin de ver el efecto de la regularidad en la sobrecarga de trabajo, también se presentan las soluciones ofrecidas por los modelos de referencia $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$. Cabe destacar que las soluciones obtenidas tanto con $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$, como con $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$, son óptimas. Por tanto, la sobrecarga de trabajo de la línea coincide para cada par de modelos (modelos de referencia y modelos con regularidad).

Como en la tabla B.1, cada ejemplar se identifica por el número de programa de producción ($P_1, \ldots, P_{45}$) y por el número de la estructura de tiempos de proceso a la que pertenecen ($E1, \ldots, E5$).

Tablas B.5 y B.6

Ambas tablas recogen los tiempos de CPU utilizados por el solucionador Gurobi para resolver cada uno de los ejemplares de la literatura con los modelos con regularidad y sus referentes. En concreto la tabla B.5 presenta los tiempos utilizados por los modelos $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$, para alcanzar los 225 óptimos; y la tabla B.6 los correspondientes a los modelos $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$.

Tablas B.7, B.8, B.9, B.10, B.11, B.12, B.13 y B.14

Estas tablas recogen los valores de no-regularidad de la secuencia ofrecida por los modelos de referencia y sus extensiones, respecto a los diferentes enfoques estudiados. Específicamente, las tablas B.7, B.8, B.9 y B.10 muestran la no regularidad de la producción acumulada ($\Delta_Q(X)$), del trabajo requerido ($\Delta_Q(P)$), de la sobrecarga generada ($\Delta_Q(W)$) y del trabajo completado ($\Delta_Q(V)$), respectivamente, de las secuencias obtenidas con los modelos $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$.

A su vez, las tablas B.11, B.12, B.13 y B.14 muestran los mismos indicadores de no-regularidad pero respecto a las secuencias obtenidas con los modelos $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$.

Al igual que las tablas anteriores, éstas presentan los resultados para cada uno de los ejemplares de datos de la literatura, indicando el programa de producción y las estructura de tiempos de proceso a la que pertenecen (*P/E*).

Tablas B.15, B.16 y B.17

En las tablas B.15, B.16 y B.17 se presentan los indicadores definidos para comparar la calidad de los resultados ofrecidos con los modelos de regularidad y los modelos de referencia.

En concreto la tabla B.15 recoge los indicadores $RPD1$ y $RPD2$ que miden las desviación porcentual de la solución obtenida con los modelos de regularidad, $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$, en relación con la solución ofrecida por sus referentes, el modelo $M3 \cup 4$ y el $M4 \cup 3$, respectivamente. Esta desviación se mide para todos los enfoques de regularidad estudiados. En efecto, estos indicadores nos permiten determinar la mejora (si es positivo) o empeoramiento (si es negativo) de los modelos propuestos frente a los utilizados como referencia, en cuanto a sobrecarga total generada, no-regularidad de la producción acumulada, no-regularidad del trabajo requerido, no-regularidad de la sobrecarga y no-regularidad del trabajo completado.

Las ecuaciones utilizadas para su cálculo, se corresponden a las expuestas en el capítulo 4 (ecuaciones (4.72) y (4.73)), que son:

$$RPD_1(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^{\star}_{3\cup4}(\epsilon)\right) - f\left(S^{\star}_{3\cup4_pmr}(\epsilon)\right)}{f\left(S^{\star}_{3\cup4}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E})$$

$$RPD_2(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^{\star}_{4\cup3}(\epsilon)\right) - f\left(S^{\star}_{4\cup3_pmr}(\epsilon)\right)}{f\left(S^{\star}_{4\cup3}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E})$$

Donde f es una función del conjunto de funciones $\Im_0 = \{W, \Delta_Q(P), \Delta_Q(V), \Delta_Q(W), \Delta_Q(X)\}$ y $S^{\star}_M(\epsilon)$ la mejor solución encontrada para la función f del ejemplar $\epsilon \in \mathrm{E}$, con el modelo M.

Por su lado, las tablas B.16 y B.17 recogen los indicadores $RPD3$ y $RPD6$, y $RPD4$ y $RPD5$, respectivamente. Estos indicadores, calculados por medio de las ecuaciones (4.74), (4.75), (4.76) y (4.77), también se han calculado para cada una de las funciones de no-regularidad evaluadas $\Im_0 = \{W, \Delta_Q(P), \Delta_Q(V), \Delta_Q(W), \Delta_Q(X)\}$ y representan lo siguiente:

RPD_3 : Comparación de las soluciones ofrecidas por los modelos de referencia, $M3\cup4$ y $M4\cup3$.

$$RPD_3(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^{\star}_{3\cup4}(\epsilon)\right) - f\left(S^{\star}_{4\cup3}(\epsilon)\right)}{f\left(S^{\star}_{3\cup4}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E})$$

RPD_4 : Mejora (si es positivo) o empeoramiento (si es negativo) de la solución obtenida con el modelo de referencia $M4 \cup 3$ frente a la solución del modelo $M3 \cup 4_pmr$.

$$RPD_4(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^{\star}_{3\cup4_pmr}(\epsilon)\right) - f\left(S^{\star}_{4\cup3}(\epsilon)\right)}{f\left(S^{\star}_{3\cup4_pmr}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E})$$

RPD_5 : Mejora (si es positivo) o empeoramiento (si es negativo) de la solución obtenida con el modelo $M4 \cup 3_pmr$ respecto a la solución dada por el modelo $M3 \cup 4$.

$$RPD_5(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^{\star}_{3\cup4}(\epsilon)\right) - f\left(S^{\star}_{4\cup3_pmr}(\epsilon)\right)}{f\left(S^{\star}_{3\cup4}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E})$$

RPD_6 : Comparación entre las soluciones ofrecidas por los dos modelos que incorporan regularidad ($M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$).

$$RPD_6(f,\epsilon) = \frac{f\left(S^{\star}_{3\cup4_pmr}(\epsilon)\right) - f\left(S^{\star}_{4\cup3_pmr}(\epsilon)\right)}{f\left(S^{\star}_{3\cup4_pmr}(\epsilon)\right)} \cdot 100 \qquad (f \in \Im_0; \epsilon \in \mathrm{E})$$

	W												
P/E	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$
1/1	40	40	***10/1***	68	68	***19/1***	33	35	***28/1***	46	46	***37/1***	48	48
1/2	230	230	***10/2***	225	225	***19/2***	150	150	***28/2***	175	175	***37/2***	116	118
1/3	369	369	***10/3***	367	367	***19/3***	217	229	***28/3***	265	266	***37/3***	235	237
1/4	710	710	***10/4***	80	80	***19/4***	415	415	***28/4***	166	166	***37/4***	326	326
1/5	211	211	***10/5***	42	47	***19/5***	151	151	***28/5***	64	64	***37/5***	132	132
2/1	100	100	***11/1***	37	40	***20/1***	31	35	***29/1***	48	51	***38/1***	43	46
2/2	282	282	***11/2***	132	137	***20/2***	114	114	***29/2***	158	158	***38/2***	179	192
2/3	339	339	***11/3***	215	224	***20/3***	221	221	***29/3***	283	283	***38/3***	263	263
2/4	638	638	***11/4***	415	415	***20/4***	252	252	***29/4***	166	166	***38/4***	510	511
2/5	276	278	***11/5***	121	124	***20/5***	68	68	***29/5***	56	56	***38/5***	185	190
3/1	81	81	***12/1***	37	40	***21/1***	56	57	***30/1***	55	55	***39/1***	47	48
3/2	270	270	***12/2***	112	113	***21/2***	193	193	***30/2***	178	179	***39/2***	168	181
3/3	421	421	***12/3***	221	223	***21/3***	277	277	***30/3***	214	217	***39/3***	257	257
3/4	80	80	***12/4***	326	326	***21/4***	228	228	***30/4***	314	314	***39/4***	509	509
3/5	166	166	***12/5***	95	95	***21/5***	106	107	***30/5***	155	157	***39/5***	194	194
4/1	143	143	***13/1***	29	33	***22/1***	63	63	***31/1***	52	53	***40/1***	22	24
4/2	324	324	***13/2***	122	122	***22/2***	213	213	***31/2***	153	156	***40/2***	104	104
4/3	313	313	***13/3***	207	209	***22/3***	311	311	***31/3***	245	251	***40/3***	199	199
4/4	80	80	***13/4***	326	326	***22/4***	154	154	***31/4***	314	314	***40/4***	338	338
4/5	212	212	***13/5***	95	95	***22/5***	82	82	***31/5***	148	148	***40/5***	103	108
5/1	46	48	***14/1***	45	49	***23/1***	55	56	***32/1***	53	54	***41/1***	34	34
5/2	200	207	***14/2***	153	154	***23/2***	197	197	***32/2***	187	190	***41/2***	92	97
5/3	345	345	***14/3***	231	237	***23/3***	329	329	***32/3***	235	243	***41/3***	213	213
5/4	674	674	***14/4***	314	314	***23/4***	154	154	***32/4***	403	403	***41/4***	338	338
5/5	222	226	***14/5***	103	106	***23/5***	67	67	***32/5***	176	177	***41/5***	107	109
6/1	46	46	***15/1***	40	44	***24/1***	67	67	***33/1***	53	53	***42/1***	22	24
6/2	100	100	***15/2***	147	147	***24/2***	205	208	***33/2***	174	182	***42/2***	137	137
6/3	227	227	***15/3***	239	239	***24/3***	259	260	***33/3***	243	249	***42/3***	211	211
6/4	338	338	***15/4***	240	240	***24/4***	228	228	***33/4***	403	403	***42/4***	427	427
6/5	136	136	***15/5***	70	70	***24/5***	128	128	***33/5***	171	173	***42/5***	142	142
7/1	14	16	***16/1***	32	36	***25/1***	56	56	***34/1***	25	26	***43/1***	44	44
7/2	151	151	***16/2***	117	117	***25/2***	190	190	***34/2***	141	146	***43/2***	116	119
7/3	185	185	***16/3***	196	196	***25/3***	295	295	***34/3***	208	208	***43/3***	232	232
7/4	338	338	***16/4***	240	240	***25/4***	228	228	***34/4***	252	252	***43/4***	427	427
7/5	143	143	***16/5***	65	65	***25/5***	103	106	***34/5***	91	91	***43/5***	151	152
8/1	61	61	***17/1***	37	40	***26/1***	63	63	***35/1***	41	42	***44/1***	34	36
8/2	199	201	***17/2***	133	133	***26/2***	206	206	***35/2***	117	117	***44/2***	163	163
8/3	279	279	***17/3***	219	221	***26/3***	243	245	***35/3***	235	235	***44/3***	271	271
8/4	302	302	***17/4***	320	320	***26/4***	302	302	***35/4***	252	252	***44/4***	522	523
8/5	177	177	***17/5***	84	84	***26/5***	152	153	***35/5***	86	86	***44/5***	169	169
9/1	81	81	***18/1***	45	46	***27/1***	58	60	***36/1***	29	29	***45/1***	43	44
9/2	218	218	***18/2***	136	143	***27/2***	200	200	***36/2***	152	153	***45/2***	149	152
9/3	232	235	***18/3***	229	231	***27/3***	261	261	***36/3***	196	199	***45/3***	265	265
9/4	302	302	***18/4***	415	415	***27/4***	302	302	***36/4***	326	326	***45/4***	521	521
9/5	175	177	***18/5***	158	160	***27/5***	137	144	***36/5***	146	146	***45/5***	182	182

Tabla B.4: Soluciones óptimas (W) obtenidas con los modelos $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ (o $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$) para cada plan de producción *P/E* (*Programa de producción/Estructura de tiempos de proceso*).

Tiempos de CPU												
P/E	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$
1/1	1.72	1.24	***10/1***	6.07	2.09	***19/1***	41.08	16.56	***28/1***	13.36	2.66	***37/1***	150.46	15.04
1/2	4.42	1.59	***10/2***	4.09	1.80	***19/2***	13.69	1.73	***28/2***	19.85	6.34	***37/2***	16.89	5.93
1/3	1.99	1.18	***10/3***	7.55	7.36	***19/3***	21.63	14.52	***28/3***	15.05	10.87	***37/3***	71.68	24.83
1/4	1.18	0.88	***10/4***	2.77	4.32	***19/4***	56.27	20.10	***28/4***	19.65	9.85	***37/4***	433.19	121.64
1/5	2.73	1.74	***10/5***	1.80	1.21	***19/5***	64.12	19.07	***28/5***	26.02	2.56	***37/5***	35.92	8.36
2/1	4.00	1.25	***11/1***	192.54	37.25	***20/1***	22.81	11.25	***29/1***	22.63	16.61	***38/1***	36.47	12.91
2/2	0.19	0.27	***11/2***	17.94	6.94	***20/2***	27.55	11.59	***29/2***	17.91	2.92	***38/2***	3.77	10.32
2/3	2.12	1.39	***11/3***	140.65	19.79	***20/3***	20.71	7.85	***29/3***	5.96	8.29	***38/3***	21.68	7.86
2/4	1.00	0.57	***11/4***	236.49	37.38	***20/4***	76.09	12.96	***29/4***	33.15	8.49	***38/4***	132.58	19.34
2/5	3.25	2.32	***11/5***	13.40	13.61	***20/5***	31.40	13.40	***29/5***	16.61	9.95	***38/5***	21.78	10.83
3/1	4.66	1.25	***12/1***	226.16	33.56	***21/1***	40.37	10.93	***30/1***	19.93	6.99	***39/1***	35.93	14.68
3/2	2.03	1.40	***12/2***	49.03	13.53	***21/2***	56.87	16.25	***30/2***	21.30	12.52	***39/2***	12.64	11.81
3/3	2.14	0.84	***12/3***	287.78	24.19	***21/3***	19.08	10.38	***30/3***	127.46	24.74	***39/3***	10.60	10.61
3/4	0.54	0.49	***12/4***	681.60	124.06	***21/4***	89.46	12.62	***30/4***	182.04	134.73	***39/4***	82.22	18.72
3/5	4.22	1.53	***12/5***	74.74	22.99	***21/5***	129.22	23.28	***30/5***	54.05	14.97	***39/5***	47.37	17.53
4/1	2.00	0.89	***13/1***	201.57	27.97	***22/1***	6.32	1.34	***31/1***	257.74	19.97	***40/1***	14.29	11.52
4/2	2.00	1.22	***13/2***	45.06	12.74	***22/2***	21.06	8.05	***31/2***	25.78	10.90	***40/2***	13.60	4.75
4/3	4.14	1.09	***13/3***	198.92	34.10	***22/3***	7.08	15.66	***31/3***	86.88	23.58	***40/3***	60.99	16.84
4/4	1.06	0.86	***13/4***	2004.24	137.00	***22/4***	15.46	16.58	***31/4***	940.79	103.55	***40/4***	187.91	31.06
4/5	2.35	1.45	***13/5***	127.41	24.33	***22/5***	22.92	4.78	***31/5***	42.11	7.95	***40/5***	73.55	20.38
5/1	18.89	9.31	***14/1***	564.72	58.91	***23/1***	37.63	7.78	***32/1***	9.72	7.23	***41/1***	14.35	8.73
5/2	7.57	1.85	***14/2***	109.55	18.88	***23/2***	25.78	8.79	***32/2***	19.38	9.82	***41/2***	16.47	11.12
5/3	17.02	8.31	***14/3***	232.31	30.11	***23/3***	55.29	8.90	***32/3***	131.04	29.48	***41/3***	76.37	17.72
5/4	2.32	2.16	***14/4***	882.89	167.87	***23/4***	27.78	7.81	***32/4***	269.32	36.78	***41/4***	147.81	27.27
5/5	19.14	10.60	***14/5***	50.59	14.74	***23/5***	19.71	9.85	***32/5***	49.89	15.48	***41/5***	37.98	15.33
6/1	8.38	5.77	***15/1***	189.14	21.56	***24/1***	6.89	1.10	***33/1***	148.30	23.98	***42/1***	35.56	10.84
6/2	6.56	2.36	***15/2***	69.56	18.75	***24/2***	29.29	9.68	***33/2***	26.15	12.81	***42/2***	11.60	2.46
6/3	99.79	12.79	***15/3***	32.28	14.95	***24/3***	48.59	24.25	***33/3***	73.30	20.81	***42/3***	22.34	6.94
6/4	177.08	19.92	***15/4***	274.60	37.68	***24/4***	131.68	30.92	***33/4***	123.84	41.91	***42/4***	65.42	45.23
6/5	14.20	8.52	***15/5***	59.48	15.98	***24/5***	57.01	11.54	***33/5***	81.09	22.28	***42/5***	70.86	12.34
7/1	7.35	2.25	***16/1***	40.87	9.07	***25/1***	177.52	20.25	***34/1***	11.35	9.05	***43/1***	109.50	11.30
7/2	13.27	4.96	***16/2***	31.57	8.73	***25/2***	40.21	13.00	***34/2***	22.58	10.17	***43/2***	14.22	1.95
7/3	23.96	11.04	***16/3***	19.85	8.94	***25/3***	12.22	10.56	***34/3***	15.59	9.49	***43/3***	35.68	9.92
7/4	350.60	21.49	***16/4***	83.82	11.53	***25/4***	161.90	16.25	***34/4***	81.08	22.30	***43/4***	93.47	43.87
7/5	48.94	10.02	***16/5***	21.22	7.63	***25/5***	16.98	19.63	***34/5***	27.58	10.68	***43/5***	52.82	13.29
8/1	109.23	14.29	***17/1***	359.07	22.41	***26/1***	38.65	4.65	***35/1***	32.43	14.24	***44/1***	69.01	16.04
8/2	14.09	5.27	***17/2***	95.40	13.77	***26/2***	53.16	13.99	***35/2***	33.53	12.26	***44/2***	9.86	1.92
8/3	76.85	9.95	***17/3***	219.24	31.61	***26/3***	84.76	15.05	***35/3***	13.21	7.55	***44/3***	14.22	6.95
8/4	45.99	15.40	***17/4***	755.70	29.86	***26/4***	280.38	31.74	***35/4***	66.48	12.96	***44/4***	151.39	23.18
8/5	18.48	6.11	***17/5***	34.05	6.44	***26/5***	160.51	24.72	***35/5***	57.06	11.48	***44/5***	17.37	9.08
9/1	6.98	2.25	***18/1***	114.17	21.26	***27/1***	110.06	21.46	***36/1***	13.90	6.80	***45/1***	35.92	9.22
9/2	10.38	2.53	***18/2***	27.43	4.05	***27/2***	57.42	19.75	***36/2***	14.81	9.76	***45/2***	9.39	1.84
9/3	33.60	5.92	***18/3***	40.03	16.90	***27/3***	116.16	19.54	***36/3***	150.36	22.15	***45/3***	9.90	7.85
9/4	233.25	19.58	***18/4***	191.83	69.48	***27/4***	230.88	37.79	***36/4***	1468.36	138.67	***45/4***	107.87	15.17
9/5	17.69	11.30	***18/5***	94.61	13.08	***27/5***	44.77	15.76	***36/5***	94.42	18.48	***45/5***	46.31	7.13

Tabla B.5: Tiempos de CPU (s) utilizados por los modelos $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ para obtener las soluciones óptimas de los 225 ejemplares, mediante el solucionador Gurobi.

Tiempos de CPU															
P/E	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$
1/1	1.12	0.78	***10/1***	2.91	2.08	***19/1***	21.55	13.14	***28/1***	10.72	1.27	***37/1***	78.17	12.09
1/2	2.00	0.98	***10/2***	4.62	0.78	***19/2***	13.30	1.96	***28/2***	20.84	1.63	***37/2***	11.99	8.19
1/3	1.14	0.82	***10/3***	9.92	3.51	***19/3***	25.36	15.12	***28/3***	41.62	1.70	***37/3***	134.44	19.09
1/4	0.97	0.65	***10/4***	0.32	1.17	***19/4***	172.90	62.32	***28/4***	5.09	2.13	***37/4***	13.65	24.68
1/5	2.77	0.76	***10/5***	5.12	1.45	***19/5***	48.03	11.16	***28/5***	21.92	2.86	***37/5***	21.16	4.50
2/1	2.01	0.96	***11/1***	156.99	18.73	***20/1***	13.61	14.13	***29/1***	14.93	3.71	***38/1***	23.45	12.10
2/2	0.04	0.03	***11/2***	16.63	9.20	***20/2***	24.69	4.35	***29/2***	14.70	1.60	***38/2***	5.02	4.22
2/3	2.28	0.98	***11/3***	36.92	24.79	***20/3***	20.13	13.22	***29/3***	5.10	1.74	***38/3***	12.38	3.04
2/4	0.95	0.72	***11/4***	2224.98	110.53	***20/4***	8.25	10.71	***29/4***	5.00	6.94	***38/4***	44.15	16.56
2/5	2.98	1.39	***11/5***	15.05	12.70	***20/5***	29.30	10.70	***29/5***	11.78	6.16	***38/5***	16.05	11.60
3/1	1.92	0.79	***12/1***	222.84	21.46	***21/1***	28.96	4.19	***30/1***	17.22	6.11	***39/1***	24.03	12.69
3/2	1.22	0.71	***12/2***	40.23	12.42	***21/2***	46.48	9.66	***30/2***	25.28	10.51	***39/2***	6.04	7.74
3/3	1.89	0.81	***12/3***	219.53	40.41	***21/3***	12.79	10.80	***30/3***	128.32	18.49	***39/3***	6.77	5.18
3/4	0.32	0.35	***12/4***	44.12	16.50	***21/4***	7.76	8.37	***30/4***	872.44	40.83	***39/4***	66.98	31.97
3/5	3.10	0.99	***12/5***	48.44	23.13	***21/5***	77.11	16.15	***30/5***	35.77	12.90	***39/5***	30.08	12.22
4/1	1.26	0.65	***13/1***	111.04	15.43	***22/1***	2.16	0.63	***31/1***	132.14	14.34	***40/1***	11.10	7.77
4/2	1.68	0.66	***13/2***	49.24	14.60	***22/2***	16.96	12.77	***31/2***	13.59	8.26	***40/2***	18.79	3.80
4/3	1.91	0.93	***13/3***	164.62	34.91	***22/3***	5.10	1.99	***31/3***	61.65	14.23	***40/3***	45.40	10.22
4/4	0.37	0.37	***13/4***	216.40	41.31	***22/4***	4.52	8.28	***31/4***	118.78	32.72	***40/4***	30.86	17.71
4/5	2.10	1.08	***13/5***	62.91	13.51	***22/5***	23.35	6.86	***31/5***	22.08	6.33	***40/5***	45.64	19.41
5/1	13.61	7.40	***14/1***	288.35	28.33	***23/1***	19.20	3.43	***32/1***	8.94	10.94	***41/1***	12.79	6.38
5/2	2.90	0.87	***14/2***	105.20	10.94	***23/2***	16.34	19.11	***32/2***	20.95	9.66	***41/2***	22.14	12.92
5/3	14.93	4.32	***14/3***	184.14	32.82	***23/3***	8.96	9.24	***32/3***	47.89	22.19	***41/3***	25.79	9.50
5/4	0.94	2.13	***14/4***	265.35	44.54	***23/4***	9.05	1.79	***32/4***	218.95	51.23	***41/4***	28.21	10.55
5/5	13.08	6.44	***14/5***	30.96	13.00	***23/5***	23.04	8.38	***32/5***	64.78	17.52	***41/5***	32.83	11.56
6/1	9.75	4.13	***15/1***	121.64	15.33	***24/1***	2.68	0.82	***33/1***	108.37	13.89	***42/1***	21.22	14.74
6/2	8.96	1.53	***15/2***	50.77	11.95	***24/2***	18.15	7.06	***33/2***	17.36	11.68	***42/2***	11.67	1.75
6/3	31.11	9.70	***15/3***	19.97	12.27	***24/3***	16.27	13.15	***33/3***	31.83	19.61	***42/3***	20.08	9.14
6/4	9.46	10.99	***15/4***	13.95	14.50	***24/4***	8.17	7.34	***33/4***	885.38	31.72	***42/4***	199.92	65.71
6/5	55.31	6.47	***15/5***	47.11	9.86	***24/5***	19.37	9.95	***33/5***	38.88	14.47	***42/5***	33.61	14.22
7/1	3.06	1.82	***16/1***	33.93	8.65	***25/1***	105.71	19.69	***34/1***	9.44	1.27	***43/1***	103.84	11.99
7/2	10.02	2.43	***16/2***	21.91	6.48	***25/2***	32.83	8.97	***34/2***	24.21	3.11	***43/2***	6.87	1.98
7/3	17.26	8.64	***16/3***	16.15	8.22	***25/3***	11.36	6.38	***34/3***	16.66	7.57	***43/3***	19.28	9.08
7/4	137.83	15.80	***16/4***	8.24	6.56	***25/4***	5.16	8.26	***34/4***	8.91	9.54	***43/4***	180.28	44.35
7/5	35.51	6.43	***16/5***	11.30	2.44	***25/5***	16.21	13.04	***34/5***	28.44	5.70	***43/5***	28.46	11.86
8/1	52.73	13.06	***17/1***	331.56	13.49	***26/1***	26.82	9.65	***35/1***	26.22	7.32	***44/1***	40.17	10.15
8/2	13.60	1.58	***17/2***	55.23	8.49	***26/2***	54.16	8.89	***35/2***	25.48	3.22	***44/2***	7.14	1.12
8/3	38.09	10.84	***17/3***	284.66	19.94	***26/3***	30.79	16.90	***35/3***	12.72	11.25	***44/3***	6.36	3.95
8/4	29.45	13.43	***17/4***	32.74	28.29	***26/4***	88.59	32.54	***35/4***	6.56	7.52	***44/4***	54.53	7.97
8/5	16.02	4.35	***17/5***	20.34	6.11	***26/5***	92.71	22.28	***35/5***	21.62	7.20	***44/5***	17.27	8.28
9/1	9.18	1.64	***18/1***	79.05	11.01	***27/1***	80.12	17.70	***36/1***	11.57	5.75	***45/1***	24.11	10.83
9/2	8.01	2.35	***18/2***	9.32	2.53	***27/2***	49.09	12.67	***36/2***	16.95	11.62	***45/2***	9.74	1.48
9/3	29.21	9.78	***18/3***	17.69	9.99	***27/3***	27.05	14.52	***36/3***	100.25	19.93	***45/3***	21.05	7.08
9/4	177.95	17.01	***18/4***	201.13	55.45	***27/4***	73.82	24.28	***36/4***	167.02	34.99	***45/4***	65.26	15.13
9/5	11.50	6.04	***18/5***	15.29	9.36	***27/5***	39.78	17.32	***36/5***	157.10	16.49	***45/5***	17.31	12.01

Tabla B.6: Tiempos de CPU (s) utilizados por los modelos $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ para obtener las soluciones óptimas de los 225 ejemplares, mediante el solucionador Gurobi.

$M3 \cup 4$ vs $M3 \cup 4_pmr$ $\{\Delta_Q(X)\}$															
P/E	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$
1/1	8.13	10.13	***10/1***	8.38	9.38	***19/1***	41.63	11.63	***28/1***	16.88	13.63	***37/1***	15.63	8.63
1/2	14.63	10.63	***10/2***	11.88	9.63	***19/2***	10.13	10.13	***28/2***	12.88	14.13	***37/2***	13.63	9.13
1/3	12.63	8.63	***10/3***	121.88	10.13	***19/3***	15.13	10.13	***28/3***	20.63	12.38	***37/3***	21.63	12.13
1/4	14.13	12.13	***10/4***	62.63	10.63	***19/4***	15.63	9.13	***28/4***	26.88	12.13	***37/4***	13.38	12.88
1/5	15.13	9.13	***10/5***	20.63	11.88	***19/5***	10.13	9.63	***28/5***	10.13	9.88	***37/5***	7.13	11.13
2/1	9.63	8.13	***11/1***	50.88	8.38	***20/1***	33.63	8.63	***29/1***	25.63	8.63	***38/1***	21.63	7.88
2/2	11.13	9.63	***11/2***	15.13	10.88	***20/2***	12.63	12.63	***29/2***	8.38	9.13	***38/2***	18.13	9.13
2/3	14.13	9.13	***11/3***	13.38	11.13	***20/3***	13.13	13.13	***29/3***	62.63	11.13	***38/3***	13.38	7.63
2/4	11.63	9.13	***11/4***	25.38	11.13	***20/4***	25.63	10.13	***29/4***	17.88	8.13	***38/4***	44.38	9.38
2/5	17.63	9.13	***11/5***	11.63	7.63	***20/5***	12.63	12.63	***29/5***	15.88	15.38	***38/5***	13.88	10.38
3/1	12.63	10.13	***12/1***	47.38	10.38	***21/1***	19.13	8.63	***30/1***	26.13	12.38	***39/1***	17.63	8.13
3/2	9.13	8.63	***12/2***	15.13	11.63	***21/2***	10.13	10.13	***30/2***	17.13	9.13	***39/2***	19.13	10.63
3/3	16.13	10.63	***12/3***	35.88	11.38	***21/3***	16.63	10.13	***30/3***	37.63	9.88	***39/3***	9.88	12.63
3/4	23.13	12.13	***12/4***	21.38	10.38	***21/4***	50.63	9.13	***30/4***	30.38	13.38	***39/4***	12.13	9.38
3/5	23.63	9.13	***12/5***	10.63	8.63	***21/5***	22.13	8.63	***30/5***	13.38	8.38	***39/5***	11.63	9.38
4/1	12.13	9.63	***13/1***	79.63	11.13	***22/1***	12.38	7.63	***31/1***	17.63	10.13	***40/1***	23.88	12.38
4/2	17.63	9.63	***13/2***	7.88	9.88	***22/2***	12.13	12.13	***31/2***	17.13	12.13	***40/2***	12.63	12.63
4/3	17.63	10.13	***13/3***	22.13	11.38	***22/3***	31.13	9.63	***31/3***	17.88	11.88	***40/3***	14.88	12.88
4/4	20.13	10.63	***13/4***	32.13	10.63	***22/4***	17.88	11.38	***31/4***	18.63	9.13	***40/4***	17.63	10.88
4/5	9.13	11.13	***13/5***	10.88	10.88	***22/5***	9.13	9.13	***31/5***	7.88	7.88	***40/5***	15.63	13.13
5/1	16.13	11.63	***14/1***	55.13	10.13	***23/1***	17.63	8.13	***32/1***	14.88	7.38	***41/1***	21.63	12.88
5/2	13.13	8.63	***14/2***	12.38	10.38	***23/2***	12.13	10.88	***32/2***	35.63	9.88	***41/2***	11.13	8.88
5/3	15.63	8.88	***14/3***	16.88	8.38	***23/3***	53.38	8.63	***32/3***	19.38	11.38	***41/3***	12.38	12.13
5/4	10.38	8.13	***14/4***	27.63	9.13	***23/4***	80.88	8.88	***32/4***	29.88	8.13	***41/4***	15.63	14.13
5/5	34.63	8.63	***14/5***	17.13	8.38	***23/5***	18.38	10.13	***32/5***	22.63	8.13	***41/5***	26.38	10.63
6/1	11.88	11.63	***15/1***	63.38	26.13	***24/1***	14.13	9.88	***33/1***	16.63	15.13	***42/1***	52.13	14.38
6/2	8.63	8.63	***15/2***	10.38	8.88	***24/2***	29.88	10.88	***33/2***	45.13	10.88	***42/2***	7.63	7.63
6/3	15.38	15.38	***15/3***	15.63	11.63	***24/3***	12.63	8.63	***33/3***	19.63	12.38	***42/3***	12.38	9.63
6/4	22.13	8.88	***15/4***	58.38	10.88	***24/4***	29.38	12.63	***33/4***	32.13	15.13	***42/4***	40.38	8.13
6/5	11.13	8.63	***15/5***	29.63	9.63	***24/5***	28.13	7.63	***33/5***	12.63	9.13	***42/5***	10.38	7.63
7/1	20.63	12.88	***16/1***	61.21	9.93	***25/1***	25.38	10.88	***34/1***	45.88	10.63	***43/1***	19.13	11.88
7/2	12.88	8.13	***16/2***	8.93	8.93	***25/2***	10.38	10.38	***34/2***	19.38	7.63	***43/2***	20.13	10.38
7/3	11.88	12.38	***16/3***	15.07	8.36	***25/3***	21.38	10.13	***34/3***	13.63	13.13	***43/3***	18.13	8.63
7/4	22.13	10.13	***16/4***	11.50	8.93	***25/4***	11.63	16.13	***34/4***	12.13	12.13	***43/4***	23.13	12.88
7/5	13.38	7.88	***16/5***	7.50	7.50	***25/5***	14.13	12.63	***34/5***	10.88	10.88	***43/5***	10.13	8.63
8/1	16.13	14.63	***17/1***	92.00	10.00	***26/1***	12.38	10.38	***35/1***	46.38	8.38	***44/1***	31.13	9.63
8/2	19.13	12.38	***17/2***	10.00	10.00	***26/2***	9.88	8.38	***35/2***	6.63	7.63	***44/2***	15.63	8.13
8/3	33.88	12.38	***17/3***	20.00	10.00	***26/3***	27.88	11.88	***35/3***	13.13	12.88	***44/3***	14.38	9.88
8/4	13.13	12.38	***17/4***	14.00	10.00	***26/4***	21.63	10.13	***35/4***	36.13	15.38	***44/4***	22.13	10.88
8/5	17.38	9.38	***17/5***	10.00	10.00	***26/5***	16.63	8.88	***35/5***	8.63	8.63	***44/5***	10.13	10.13
9/1	20.13	10.13	***18/1***	26.63	8.63	***27/1***	39.13	8.63	***36/1***	14.63	8.38	***45/1***	30.38	9.63
9/2	13.38	8.63	***18/2***	33.63	9.13	***27/2***	11.13	10.63	***36/2***	18.63	9.88	***45/2***	30.88	10.13
9/3	24.13	9.13	***18/3***	17.13	13.13	***27/3***	32.13	9.38	***36/3***	21.13	10.63	***45/3***	10.88	8.38
9/4	10.13	11.63	***18/4***	34.63	12.63	***27/4***	11.88	8.63	***36/4***	47.13	12.13	***45/4***	11.13	9.38
9/5	13.63	9.13	***18/5***	17.13	8.63	***27/5***	17.13	8.38	***36/5***	19.88	11.88	***45/5***	16.13	9.63

Tabla B.7: Valores de no-regularidad del mix de producción, $\Delta_Q(X)$ (distancia cuadrática), de las secuencias ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ para cada plan de producción *P/E* (*Programa de producción/Estructura de tiempos de proceso*).

$M3 \cup 4$ vs $M3 \cup 4_pmr$ $\{\Delta_Q(P)\}$															
P/E	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$
1/1	919.50	739.50	***10/1***	687.38	809.13	***19/1***	2062.50	1127.50	***28/1***	1005.00	883.00	***37/1***	1178.00	748.00
1/2	11695.70	7563.47	***10/2***	12215.80	5912.22	***19/2***	6038.72	6038.72	***28/2***	8103.47	7144.47	***37/2***	9526.09	6344.09
1/3	9889.59	5979.34	***10/3***	12278.00	9421.47	***19/3***	5056.59	14078.70	***28/3***	7513.47	4944.72	***37/3***	16505.20	9760.72
1/4	8189.47	7978.47	***10/4***	18232.00	5669.22	***19/4***	10950.30	9469.97	***28/4***	11672.70	8866.22	***37/4***	7066.72	6901.84
1/5	5692.12	4503.75	***10/5***	14980.60	7423.88	***19/5***	5800.25	7061.75	***28/5***	5934.62	5594.88	***37/5***	3861.50	7441.88
2/1	454.50	819.00	***11/1***	3092.38	822.13	***20/1***	1285.50	824.00	***29/1***	1115.62	710.38	***38/1***	1249.38	805.13
2/2	7042.84	5499.22	***11/2***	8540.84	7981.34	***20/2***	10787.50	10787.50	***29/2***	6148.09	6268.09	***38/2***	11174.50	7987.84
2/3	5572.22	4698.34	***11/3***	6114.09	5184.34	***20/3***	9932.84	7506.97	***29/3***	14858.70	5534.47	***38/3***	5924.59	5622.34
2/4	5458.72	5307.59	***11/4***	10683.10	8207.72	***20/4***	12619.10	7360.09	***29/4***	16813.60	5665.09	***38/4***	9803.97	6616.09
2/5	7864.62	4641.25	***11/5***	6647.62	4379.62	***20/5***	8866.75	8866.75	***29/5***	7058.38	9279.62	***38/5***	6926.62	6239.38
3/1	630.50	1477.50	***12/1***	1922.62	1044.62	***21/1***	1725.50	681.50	***30/1***	2283.00	979.00	***39/1***	757.00	681.00
3/2	6787.34	6859.59	***12/2***	8811.59	8614.34	***21/2***	7750.09	6834.09	***30/2***	9402.97	6284.09	***39/2***	9513.22	7063.47
3/3	7830.22	7276.84	***12/3***	16563.60	5656.22	***21/3***	9547.59	5225.97	***30/3***	8266.97	4507.59	***39/3***	7167.47	5250.34
3/4	16087.80	12393.50	***12/4***	10714.50	7584.97	***21/4***	12727.10	7803.72	***30/4***	6268.34	8366.84	***39/4***	7531.59	10010.50
3/5	15374.00	5707.75	***12/5***	6161.25	5006.00	***21/5***	14843.50	5622.50	***30/5***	6940.50	4890.88	***39/5***	5696.12	4784.88
4/1	1802.50	1282.50	***13/1***	2579.00	1139.00	***22/1***	916.88	677.13	***31/1***	1278.38	551.13	***40/1***	1960.12	1067.12
4/2	14381.20	5947.72	***13/2***	5273.34	6225.72	***22/2***	8098.22	8098.22	***31/2***	11284.80	7895.09	***40/2***	6774.84	6774.84
4/3	8993.09	4032.47	***13/3***	21558.80	14054.00	***22/3***	6464.34	7128.09	***31/3***	12163.60	9621.22	***40/3***	4958.34	4780.34
4/4	10836.10	6833.34	***13/4***	7886.09	6347.09	***22/4***	25846.20	13625.80	***31/4***	8835.22	7415.47	***40/4***	9758.47	6428.72
4/5	5196.50	7695.38	***13/5***	6537.88	6537.88	***22/5***	5563.00	5563.00	***31/5***	4816.38	4816.38	***40/5***	8494.50	8673.75
5/1	1729.88	777.38	***14/1***	3470.00	1060.00	***23/1***	692.00	666.00	***32/1***	888.88	729.38	***41/1***	1618.00	985.00
5/2	9712.59	6533.84	***14/2***	7950.47	6886.34	***23/2***	8526.59	7355.72	***32/2***	15985.20	6198.09	***41/2***	6934.09	5750.09
5/3	7698.59	9495.84	***14/3***	14261.10	8133.09	***23/3***	12347.60	6496.22	***32/3***	5046.34	11800.60	***41/3***	5616.34	5102.09
5/4	5281.59	7298.09	***14/4***	7595.84	7170.59	***23/4***	60635.70	11598.00	***32/4***	11339.30	8605.34	***41/4***	7094.34	7652.34
5/5	12498.50	4592.00	***14/5***	9645.88	4612.75	***23/5***	11686.40	6056.62	***32/5***	13642.50	4645.88	***41/5***	11742.50	7320.38
6/1	1010.62	895.88	***15/1***	1588.88	781.38	***24/1***	1042.12	885.38	***33/1***	929.13	1532.88	***42/1***	4380.88	1476.62
6/2	5888.22	5888.22	***15/2***	7452.59	5747.72	***24/2***	14044.80	5711.09	***33/2***	25631.60	7596.22	***42/2***	4758.22	4758.22
6/3	5048.84	5048.84	***15/3***	10930.10	7934.59	***24/3***	6391.22	6798.72	***33/3***	8648.47	5697.34	***42/3***	5381.97	5347.59
6/4	10857.80	7270.34	***15/4***	14871.00	10823.00	***24/4***	14302.10	10273.50	***33/4***	12270.10	18638.00	***42/4***	14737.80	6891.47
6/5	5881.50	4634.25	***15/5***	19265.60	6599.62	***24/5***	15222.60	4816.38	***33/5***	6024.00	4682.75	***42/5***	5782.75	4656.50
7/1	1429.00	1574.50	***16/1***	1881.25	1047.25	***25/1***	1055.62	863.13	***34/1***	1316.38	717.13	***43/1***	1207.88	1096.12
7/2	7930.72	5764.97	***16/2***	5868.00	5868.00	***25/2***	7169.34	7169.34	***34/2***	10332.70	5398.84	***43/2***	10760.00	7610.47
7/3	5387.84	4448.34	***16/3***	8661.11	6865.54	***25/3***	11019.60	7852.09	***34/3***	10398.10	16311.30	***43/3***	6366.22	6922.09
7/4	6700.22	6608.34	***16/4***	6592.65	8876.65	***25/4***	10873.70	6405.47	***34/4***	10316.10	12198.80	***43/4***	20823.10	8478.72
7/5	8492.75	5417.25	***16/5***	4979.74	4979.74	***25/5***	7728.62	6368.25	***34/5***	6471.38	6471.38	***43/5***	4613.38	5275.00
8/1	736.00	2033.00	***17/1***	2684.00	895.00	***26/1***	817.00	923.00	***35/1***	1511.62	744.63	***44/1***	2340.00	794.00
8/2	13574.80	7666.47	***17/2***	6733.50	6581.50	***26/2***	6525.97	5281.84	***35/2***	4840.34	5521.84	***44/2***	14941.50	6395.34
8/3	23094.10	8678.34	***17/3***	15114.00	11721.50	***26/3***	15722.10	10013.30	***35/3***	6984.59	11078.20	***44/3***	6680.59	6453.09
8/4	6851.09	6873.09	***17/4***	8898.00	7146.50	***26/4***	9484.84	6947.84	***35/4***	20262.60	7110.97	***44/4***	12018.60	6699.34
8/5	7945.38	4788.25	***17/5***	6416.00	6416.00	***26/5***	10118.50	5038.88	***35/5***	5274.38	5077.88	***44/5***	6208.62	6208.62
9/1	1806.12	1671.38	***18/1***	984.50	602.50	***27/1***	2270.62	1100.62	***36/1***	1150.88	748.63	***45/1***	1030.62	795.63
9/2	6917.09	5507.09	***18/2***	19276.10	5916.47	***27/2***	7653.59	6305.22	***36/2***	8480.09	6278.72	***45/2***	16438.00	7260.59
9/3	12709.20	4408.34	***18/3***	5974.59	5944.84	***27/3***	9690.59	7477.34	***36/3***	12053.00	5355.72	***45/3***	8432.84	9983.22
9/4	6422.59	7148.72	***18/4***	9286.22	10470.80	***27/4***	7307.59	6385.34	***36/4***	6384.34	8205.59	***45/4***	9992.84	10395.70
9/5	6781.50	6835.50	***18/5***	7870.62	5012.25	***27/5***	9065.25	4827.12	***36/5***	15037.10	7253.88	***45/5***	7200.75	5213.00

Tabla B.8: Valores de no-regularidad del trabajo requerido, $\Delta_Q(P)$ (distancia cuadrática), de las secuencias ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ para cada plan de producción *P/E* (*Programa de producción/Estructura de tiempos de proceso*).

$M3 \cup 4$ vs $M3 \cup 4_pmr$ $\{\Delta_Q(W)\}$														
P/E	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$
1/1	9832	11219	***10/1***	29160	29789	***19/1***	8091	6793	***28/1***	11657	13649	***37/1***	14666	14076
1/2	299029	370789	***10/2***	291052	370685	***19/2***	118518	111759	***28/2***	181169	162371	***37/2***	76473	87372
1/3	855254	846075	***10/3***	777348	755363	***19/3***	299415	305390	***28/3***	407134	387781	***37/3***	324006	328250
1/4	3005970	2930000	***10/4***	32286	44090	***19/4***	904325	995217	***28/4***	132019	182989	***37/4***	674208	566900
1/5	299807	283284	***10/5***	8507	12505	***19/5***	126718	142702	***28/5***	30133	25926	***37/5***	90828	118591
2/1	55248	61102	***11/1***	12055	9898	***20/1***	6339	7285	***29/1***	13298	16169	***38/1***	12151	12188
2/2	443475	463519	***11/2***	117187	115881	***20/2***	74941	83961	***29/2***	152464	147860	***38/2***	198549	241267
2/3	783910	682130	***11/3***	277071	290754	***20/3***	294133	287481	***29/3***	416158	435010	***38/3***	419610	414237
2/4	2451180	2370000	***11/4***	1073950	948325	***20/4***	434344	398569	***29/4***	131932	169780	***38/4***	1422470	1520000
2/5	487909	476822	***11/5***	109676	90095	***20/5***	25062	23951	***29/5***	18873	16505	***38/5***	190021	240757
3/1	37625	39909	***12/1***	11145	10568	***21/1***	19516	18802	***30/1***	23044	16980	***39/1***	15875	13330
3/2	451851	443935	***12/2***	85350	83226	***21/2***	211811	213577	***30/2***	150681	170493	***39/2***	199219	205487
3/3	989662	1190000	***12/3***	286870	285791	***21/3***	458199	448868	***30/3***	255788	274811	***39/3***	372471	392391
3/4	32286	20090	***12/4***	646989	662157	***21/4***	322448	325628	***30/4***	546669	522477	***39/4***	1506410	1530000
3/5	205765	156231	***12/5***	55386	52128	***21/5***	56588	72840	***30/5***	132753	123837	***39/5***	262921	232838
4/1	111832	137874	***13/1***	8940	5983	***22/1***	22906	25121	***31/1***	16119	16604	***40/1***	2222	3475
4/2	735945	650582	***13/2***	87275	91793	***22/2***	268160	266354	***31/2***	125052	150107	***40/2***	72351	73363
4/3	603228	519561	***13/3***	259892	259592	***22/3***	576030	527096	***31/3***	350621	367191	***40/3***	225840	225454
4/4	32286	45245	***13/4***	550989	642117	***22/4***	81214	188056	***31/4***	624357	562725	***40/4***	634080	691557
4/5	255166	240964	***13/5***	63981	61347	***22/5***	37885	37528	***31/5***	126959	131631	***40/5***	71083	67742
5/1	15604	14157	***14/1***	17080	15717	***23/1***	22503	18675	***32/1***	16309	17861	***41/1***	5659	6904
5/2	239465	253648	***14/2***	134344	147870	***23/2***	219929	220121	***32/2***	150417	206287	***41/2***	54445	56766
5/3	688012	769750	***14/3***	321355	334827	***23/3***	620074	645773	***32/3***	317827	340497	***41/3***	267687	259668
5/4	2683700	2730000	***14/4***	546348	532341	***23/4***	92609	130012	***32/4***	837097	927969	***41/4***	667076	661548
5/5	265819	320067	***14/5***	50999	65527	***23/5***	20567	24291	***32/5***	145157	185548	***41/5***	87988	87825
6/1	13574	13072	***15/1***	15155	11677	***24/1***	21844	30517	***33/1***	19436	18475	***42/1***	5043	2883
6/2	57757	59639	***15/2***	136212	136467	***24/2***	208642	268672	***33/2***	216417	208071	***42/2***	123970	120450
6/3	297576	293836	***15/3***	339041	335520	***24/3***	368602	362481	***33/3***	344025	365180	***42/3***	266290	274378
6/4	603572	611397	***15/4***	261124	338632	***24/4***	258703	266879	***33/4***	1041860	1050000	***42/4***	1216630	1030000
6/5	115762	99750	***15/5***	23867	30695	***24/5***	67781	99099	***33/5***	166225	165216	***42/5***	114998	130865
7/1	1809	1447	***16/1***	9040	7741	***25/1***	23640	18702	***34/1***	6747	4398	***43/1***	14024	10545
7/2	148021	125419	***16/2***	84083	77301	***25/2***	207631	206613	***34/2***	97891	139737	***43/2***	101535	102669
7/3	204783	197576	***16/3***	199392	200840	***25/3***	487022	503557	***34/3***	265642	266338	***43/3***	336854	319862
7/4	606381	648213	***16/4***	282881	272534	***25/4***	306497	296540	***34/4***	397946	433894	***43/4***	1197460	1130000
7/5	114588	126403	***16/5***	24177	23853	***25/5***	51331	73942	***34/5***	56575	62554	***43/5***	132875	148912
8/1	25583	22645	***17/1***	13780	10230	***26/1***	28161	26762	***35/1***	11540	11189	***44/1***	9355	8280
8/2	231669	233849	***17/2***	96316	119268	***26/2***	256725	242383	***35/2***	87748	86453	***44/2***	138599	168105
8/3	465391	434848	***17/3***	289103	297623	***26/3***	349620	350789	***35/3***	321731	328953	***44/3***	441882	437473
8/4	498932	523608	***17/4***	558792	552392	***26/4***	536373	560949	***35/4***	315427	373092	***44/4***	1459680	1620000
8/5	148545	186322	***17/5***	42410	39388	***26/5***	120314	147096	***35/5***	47182	51257	***44/5***	165361	160068
9/1	51840	44982	***18/1***	14980	13458	***27/1***	25702	21736	***36/1***	5594	5445	***45/1***	13844	11238
9/2	318567	249049	***18/2***	143352	121877	***27/2***	263049	236063	***36/2***	154497	128952	***45/2***	182332	148668
9/3	315590	319085	***18/3***	306224	303943	***27/3***	373077	393751	***36/3***	229215	234834	***45/3***	397902	404553
9/4	482181	536373	***18/4***	1040540	1070000	***27/4***	498453	503045	***36/4***	603716	673176	***45/4***	1454590	1490000
9/5	157481	191296	***18/5***	164041	160780	***27/5***	121777	130855	***36/5***	134611	123825	***45/5***	236879	227378

Tabla B.9: Valores de no-regularidad de la sobrecarga de trabajo, $\Delta_Q(W)$ (distancia cuadrática), dada por las secuencias ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ para cada plan de producción *P/E* (*Programa de producción/Estructura de tiempos de proceso*).

$M3 \cup 4$ vs $M3 \cup 4_pmr$ $\{\Delta_Q(V)\}$															
P/E	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$	*P/E*	$3 \cup 4$	$3 \cup 4_pmr$
1/1	7044.0	7203.0	***10/1***	24295.6	23891.4	***19/1***	3509.0	3860.0	***28/1***	11931.0	9936.5	***37/1***	7076.5	7010.0
1/2	321386.0	314836.0	***10/2***	160948.0	157772.0	***19/2***	60197.0	57413.1	***28/2***	64491.7	64933.2	***37/2***	54032.1	56877.2
1/3	421479.0	420257.0	***10/3***	360836.0	365594.0	***19/3***	116942.0	132170.0	***28/3***	144594.0	145494.0	***37/3***	101735.0	97722.7
1/4	787417.0	782734.0	***10/4***	35688.5	14769.8	***19/4***	289321.0	272159.0	***28/4***	90174.5	33751.3	***37/4***	184978.0	189548.0
1/5	196604.0	192173.0	***10/5***	16628.6	13015.6	***19/5***	51975.2	49871.5	***28/5***	19304.0	17820.1	***37/5***	56050.0	55761.6
2/1	27407.5	30464.0	***11/1***	3176.9	3158.1	***20/1***	2742.0	3031.0	***29/1***	7621.6	8826.9	***38/1***	3694.6	5275.1
2/2	205399.0	203396.0	***11/2***	46651.2	54346.3	***20/2***	29874.1	33616.7	***29/2***	76538.6	76144.3	***38/2***	72689.0	84804.0
2/3	304969.0	292320.0	***11/3***	109985.0	102008.0	***20/3***	91096.3	91666.2	***29/3***	160430.0	174736.0	***38/3***	189620.0	187008.0
2/4	630080.0	639995.0	***11/4***	244565.0	291221.0	***20/4***	92683.3	102139.0	***29/4***	74073.8	47840.5	***38/4***	415987.0	387163.0
2/5	285797.0	290972.0	***11/5***	28677.0	28828.0	***20/5***	20645.9	19726.9	***29/5***	14370.8	16435.8	***38/5***	72480.2	72046.6
3/1	20260.5	19008.5	***12/1***	3519.9	3267.9	***21/1***	10870.5	9546.5	***30/1***	8623.0	8047.5	***39/1***	5868.5	6591.0
3/2	294746.0	283692.0	***12/2***	36759.5	34326.2	***21/2***	127639.0	125215.0	***30/2***	76725.7	78947.6	***39/2***	81947.5	77664.3
3/3	479810.0	496004.0	***12/3***	108194.0	82883.8	***21/3***	146503.0	131533.0	***30/3***	84374.8	79519.5	***39/3***	144595.0	152342.0
3/4	30830.1	26306.2	***12/4***	140758.0	171914.0	***21/4***	114301.0	93347.8	***30/4***	163052.0	176928.0	***39/4***	393903.0	394301.0
3/5	152323.0	149748.0	***12/5***	25123.8	22065.0	***21/5***	46833.2	30511.8	***30/5***	67293.9	58075.9	***39/5***	96622.1	99184.6
4/1	66451.0	68602.0	***13/1***	2513.0	2109.5	***22/1***	17091.6	16726.6	***31/1***	5908.6	5934.9	***40/1***	3289.6	2707.1
4/2	301251.0	307210.0	***13/2***	28845.0	29281.8	***22/2***	104946.0	103815.0	***31/2***	123432.0	119296.0	***40/2***	27402.0	29380.7
4/3	252681.0	249535.0	***13/3***	95280.7	88407.0	***22/3***	219622.0	224261.0	***31/3***	106039.0	100079.0	***40/3***	86003.0	72458.3
4/4	24168.5	17716.6	***13/4***	187894.0	178459.0	***22/4***	87817.5	44152.1	***31/4***	189767.0	179800.0	***40/4***	215308.0	198226.0
4/5	241975.0	256245.0	***13/5***	20300.6	18876.5	***22/5***	28063.5	27779.5	***31/5***	56636.5	58602.6	***40/5***	32779.4	37184.4
5/1	7850.4	7323.6	***14/1***	4610.0	3778.5	***23/1***	11343.0	12407.0	***32/1***	6753.6	7337.9	***41/1***	6299.5	4652.5
5/2	137218.0	136886.0	***14/2***	86642.5	80749.0	***23/2***	130561.0	129211.0	***32/2***	87662.0	84160.5	***41/2***	22144.8	24404.8
5/3	337214.0	352186.0	***14/3***	105456.0	92275.7	***23/3***	246022.0	250871.0	***32/3***	117241.0	119824.0	***41/3***	83508.3	87776.6
5/4	686157.0	693580.0	***14/4***	202672.0	182982.0	***23/4***	111967.0	58372.7	***32/4***	290785.0	258932.0	***41/4***	257570.0	199748.0
5/5	136285.0	135156.0	***14/5***	26146.6	23836.4	***23/5***	19911.9	13727.4	***32/5***	74129.9	68242.2	***41/5***	32736.4	26297.9
6/1	10602.1	10579.4	***15/1***	3488.1	5750.9	***24/1***	13575.9	14542.9	***33/1***	6336.1	5946.6	***42/1***	3126.4	2047.6
6/2	30500.3	31413.1	***15/2***	50224.5	51795.0	***24/2***	93985.7	106152.0	***33/2***	118052.0	126208.0	***42/2***	54212.0	51390.6
6/3	103231.0	92727.3	***15/3***	102812.0	99273.0	***24/3***	121847.0	113568.0	***33/3***	107751.0	98307.0	***42/3***	108318.0	109700.0
6/4	211698.0	285109.0	***15/4***	145899.0	104313.0	***24/4***	93843.6	108714.0	***33/4***	243588.0	233724.0	***42/4***	279970.0	296058.0
6/5	60607.6	59866.6	***15/5***	28443.8	16829.0	***24/5***	61785.0	55613.9	***33/5***	79654.8	81281.0	***42/5***	61507.4	59787.6
7/1	2062.0	2088.0	***16/1***	2357.7	2423.1	***25/1***	6217.1	6830.1	***34/1***	2913.1	3126.9	***43/1***	6154.1	6259.6
7/2	55827.2	49864.1	***16/2***	35012.6	32505.0	***25/2***	156795.0	155308.0	***34/2***	45138.3	43523.3	***43/2***	47599.0	47518.0
7/3	80582.7	70455.3	***16/3***	64557.7	63556.4	***25/3***	155288.0	162722.0	***34/3***	85367.0	86692.6	***43/3***	111920.0	107320.0
7/4	205305.0	187402.0	***16/4***	93080.6	103121.0	***25/4***	103383.0	118236.0	***34/4***	118749.0	92704.2	***43/4***	287493.0	288300.0
7/5	63233.6	58595.1	***16/5***	12187.9	12083.9	***25/5***	27968.0	30932.8	***34/5***	23649.9	26780.9	***43/5***	50896.6	61053.9
8/1	6321.5	7603.5	***17/1***	2612.0	3165.0	***26/1***	8954.5	8632.5	***35/1***	5167.4	5144.1	***44/1***	2904.5	2859.0
8/2	215348.0	217030.0	***17/2***	41515.5	50248.0	***26/2***	125907.0	127863.0	***35/2***	38045.1	39129.5	***44/2***	90098.2	85863.7
8/3	148250.0	128663.0	***17/3***	98083.0	88252.5	***26/3***	98247.5	101583.0	***35/3***	106384.0	98017.8	***44/3***	199939.0	199601.0
8/4	166711.0	154730.0	***17/4***	188259.0	193180.0	***26/4***	136103.0	132140.0	***35/4***	159799.0	96582.1	***44/4***	432484.0	406022.0
8/5	85853.5	90231.2	***17/5***	21007.0	19753.0	***26/5***	65162.9	67766.1	***35/5***	29777.5	28159.9	***44/5***	77246.8	71717.4
9/1	18145.9	17469.4	***18/1***	4827.0	4808.0	***27/1***	7730.6	8225.1	***36/1***	2146.6	2797.9	***45/1***	4627.1	5245.6
9/2	131329.0	122476.0	***18/2***	67012.7	64671.1	***27/2***	163320.0	163730.0	***36/2***	61626.0	59882.7	***45/2***	87074.3	82135.8
9/3	93781.0	90860.0	***18/3***	98071.7	102788.0	***27/3***	105424.0	110687.0	***36/3***	87794.0	76072.0	***45/3***	167517.0	166964.0
9/4	187323.0	149421.0	***18/4***	234896.0	261656.0	***27/4***	169558.0	172295.0	***36/4***	181956.0	131822.0	***45/4***	457009.0	430976.0
9/5	79808.6	95861.0	***18/5***	58225.5	54876.0	***27/5***	54973.5	51444.6	***36/5***	67449.8	57802.9	***45/5***	69826.8	77588.1

Tabla B.10: Valores de no-regularidad del trabajo completado, $\Delta_Q(V)$ (distancia cuadrática), dadas las secuencias ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ para cada plan de producción *P/E* (*Programa de producción/Estructura de tiempos de proceso*).

$M4 \cup 3$ vs $M4 \cup 3_pmr$ $\{\Delta_Q(X)\}$															
P/E	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$
1/1	11.13	8.63	***10/1***	15.63	8.38	***19/1***	41.63	11.63	***28/1***	50.38	13.63	***37/1***	11.13	8.63
1/2	11.13	9.13	***10/2***	11.88	10.13	***19/2***	10.13	10.13	***28/2***	17.13	14.13	***37/2***	13.63	9.13
1/3	9.63	8.63	***10/3***	16.88	9.63	***19/3***	53.63	8.63	***28/3***	22.13	12.38	***37/3***	35.88	13.13
1/4	9.63	9.63	***10/4***	43.38	12.38	***19/4***	16.13	12.63	***28/4***	46.38	13.88	***37/4***	15.13	13.38
1/5	11.13	9.13	***10/5***	20.63	11.88	***19/5***	9.63	10.13	***28/5***	9.88	10.38	***37/5***	9.38	11.13
2/1	8.63	10.13	***11/1***	50.13	8.38	***20/1***	53.63	8.63	***29/1***	25.63	9.13	***38/1***	21.63	8.13
2/2	11.13	9.63	***11/2***	15.13	9.13	***20/2***	10.13	12.63	***29/2***	8.13	9.13	***38/2***	27.63	9.13
2/3	14.13	9.63	***11/3***	21.63	10.38	***20/3***	21.13	13.13	***29/3***	11.63	11.38	***38/3***	7.88	7.88
2/4	11.13	9.63	***11/4***	15.63	10.38	***20/4***	18.13	9.63	***29/4***	22.63	14.63	***38/4***	24.13	9.38
2/5	14.13	9.63	***11/5***	11.63	7.63	***20/5***	12.63	12.63	***29/5***	8.13	13.88	***38/5***	13.88	8.38
3/1	9.13	10.13	***12/1***	32.13	10.38	***21/1***	14.13	10.13	***30/1***	15.13	13.13	***39/1***	17.63	8.13
3/2	11.13	9.13	***12/2***	15.13	11.63	***21/2***	10.13	10.13	***30/2***	15.38	10.38	***39/2***	19.13	10.63
3/3	10.63	11.13	***12/3***	37.38	10.88	***21/3***	33.63	9.13	***30/3***	30.88	8.63	***39/3***	17.13	12.63
3/4	14.13	15.63	***12/4***	32.88	10.38	***21/4***	53.13	13.13	***30/4***	25.38	8.38	***39/4***	30.38	12.38
3/5	13.13	9.13	***12/5***	10.63	10.63	***21/5***	21.63	10.13	***30/5***	20.88	12.63	***39/5***	11.63	9.38
4/1	14.63	9.13	***13/1***	79.63	11.63	***22/1***	6.88	8.13	***31/1***	11.63	11.38	***40/1***	22.13	12.63
4/2	11.13	9.63	***13/2***	13.63	9.88	***22/2***	20.13	10.63	***31/2***	18.63	12.13	***40/2***	12.63	12.63
4/3	12.63	10.13	***13/3***	24.38	12.63	***22/3***	8.13	9.38	***31/3***	17.88	11.88	***40/3***	20.63	13.13
4/4	24.63	12.63	***13/4***	15.38	11.13	***22/4***	13.13	11.88	***31/4***	8.88	9.13	***40/4***	18.88	13.88
4/5	26.13	9.13	***13/5***	10.88	10.88	***22/5***	9.38	10.13	***31/5***	6.38	6.38	***40/5***	17.88	13.13
5/1	15.38	9.38	***14/1***	53.13	10.13	***23/1***	17.63	8.13	***32/1***	25.88	7.13	***41/1***	15.13	12.88
5/2	18.13	8.63	***14/2***	12.38	11.13	***23/2***	11.38	10.88	***32/2***	30.63	10.13	***41/2***	11.13	6.88
5/3	9.13	10.13	***14/3***	17.38	10.13	***23/3***	17.13	9.88	***32/3***	10.88	11.38	***41/3***	12.38	12.38
5/4	10.38	8.13	***14/4***	23.88	8.88	***23/4***	15.38	11.63	***32/4***	26.38	13.63	***41/4***	17.88	13.63
5/5	34.63	8.63	***14/5***	17.13	8.38	***23/5***	22.88	9.38	***32/5***	26.63	11.63	***41/5***	26.38	10.63
6/1	17.88	11.88	***15/1***	78.38	7.63	***24/1***	10.38	8.13	***33/1***	15.13	13.63	***42/1***	52.13	14.88
6/2	8.63	8.63	***15/2***	15.38	8.88	***24/2***	23.88	10.88	***33/2***	45.13	10.88	***42/2***	6.63	6.63
6/3	15.38	15.38	***15/3***	21.63	10.88	***24/3***	26.38	8.13	***33/3***	19.38	15.13	***42/3***	19.63	9.63
6/4	17.63	11.88	***15/4***	16.88	12.38	***24/4***	19.63	9.38	***33/4***	14.13	14.13	***42/4***	38.63	12.38
6/5	15.13	9.63	***15/5***	15.63	9.63	***24/5***	11.88	9.88	***33/5***	12.63	9.13	***42/5***	15.13	7.63
7/1	19.13	14.63	***16/1***	61.21	9.93	***25/1***	26.88	10.88	***34/1***	45.88	10.63	***43/1***	26.88	10.13
7/2	8.13	8.13	***16/2***	8.93	8.93	***25/2***	13.63	10.13	***34/2***	19.38	7.63	***43/2***	25.63	10.38
7/3	13.13	13.13	***16/3***	17.79	8.36	***25/3***	27.38	9.13	***34/3***	12.88	13.38	***43/3***	16.88	9.38
7/4	15.38	14.63	***16/4***	16.50	9.21	***25/4***	19.13	12.13	***34/4***	30.63	12.38	***43/4***	14.38	15.13
7/5	11.88	7.88	***16/5***	16.64	7.50	***25/5***	16.13	9.63	***34/5***	7.63	10.88	***43/5***	10.13	7.13
8/1	12.38	11.63	***17/1***	90.00	10.00	***26/1***	10.88	7.88	***35/1***	19.13	8.38	***44/1***	48.38	8.13
8/2	17.88	12.38	***17/2***	10.00	10.00	***26/2***	14.63	9.38	***35/2***	14.63	7.63	***44/2***	6.88	8.13
8/3	13.13	12.38	***17/3***	26.00	10.00	***26/3***	20.13	9.38	***35/3***	16.63	12.88	***44/3***	11.13	9.63
8/4	19.38	12.38	***17/4***	20.00	10.00	***26/4***	41.38	11.88	***35/4***	13.13	10.38	***44/4***	47.88	12.63
8/5	11.88	8.88	***17/5***	10.00	10.00	***26/5***	19.13	11.63	***35/5***	7.38	12.63	***44/5***	10.13	10.13
9/1	9.88	10.13	***18/1***	24.13	8.63	***27/1***	39.13	8.63	***36/1***	12.63	9.63	***45/1***	49.38	12.13
9/2	9.38	9.38	***18/2***	33.63	9.13	***27/2***	13.13	10.63	***36/2***	10.63	9.88	***45/2***	30.88	10.13
9/3	27.63	9.13	***18/3***	25.13	13.13	***27/3***	12.63	9.38	***36/3***	18.13	11.13	***45/3***	26.88	11.88
9/4	9.63	10.13	***18/4***	16.63	8.63	***27/4***	16.38	12.38	***36/4***	12.88	7.63	***45/4***	17.88	12.13
9/5	13.63	8.63	***18/5***	17.13	8.63	***27/5***	17.13	8.38	***36/5***	9.63	10.63	***45/5***	16.13	9.63

Tabla B.11: Valores de no-regularidad del mix de producción, $\Delta_Q(X)$ (distancia cuadrática), de las secuencias ofrecidas por $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ para cada plan de producción *P/E* (*Programa de producción/Estructura de tiempos de proceso*).

$M4 \cup 3$ vs $M4 \cup 3_pmr$ $\{\Delta_Q(P)\}$															
P/E	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$
1/1	917.50	1120.50	***10/1***	892.13	687.38	***19/1***	2062.50	1191.00	***28/1***	1485.00	883.00	***37/1***	877.00	748.00
1/2	6329.59	5984.72	***10/2***	12215.80	8670.97	***19/2***	6038.72	6038.72	***28/2***	9402.22	7144.47	***37/2***	9526.09	6344.09
1/3	10092.80	5787.09	***10/3***	10165.00	5080.72	***19/3***	9528.34	6583.47	***28/3***	6496.59	4944.72	***37/3***	14023.10	8619.72
1/4	8597.84	8110.34	***10/4***	19900.10	19466.10	***19/4***	8693.72	6423.34	***28/4***	48592.00	7787.09	***37/4***	6786.97	6904.72
1/5	4903.75	4489.50	***10/5***	14980.60	7423.88	***19/5***	7061.75	5800.25	***28/5***	6434.88	5512.38	***37/5***	4405.62	7441.88
2/1	972.50	1569.50	***11/1***	3463.88	822.13	***20/1***	1523.00	755.50	***29/1***	1115.62	734.13	***38/1***	1249.38	768.63
2/2	7042.84	5059.97	***11/2***	8540.84	6496.09	***20/2***	8934.59	10787.50	***29/2***	6669.09	6268.09	***38/2***	14856.30	7987.84
2/3	6517.84	4025.47	***11/3***	6173.97	5292.97	***20/3***	6863.72	10924.30	***29/3***	6759.84	5253.22	***38/3***	5348.97	5348.97
2/4	4975.72	7766.34	***11/4***	14177.60	11955.60	***20/4***	10337.30	13157.60	***29/4***	42150.10	5610.84	***38/4***	11942.30	6534.09
2/5	6872.50	4704.62	***11/5***	6647.62	4379.62	***20/5***	8866.75	8866.75	***29/5***	4950.25	8568.88	***38/5***	6926.62	4665.88
3/1	503.00	485.50	***12/1***	1465.12	1044.62	***21/1***	967.50	937.50	***30/1***	1650.00	1023.00	***39/1***	757.00	681.00
3/2	8953.34	6460.22	***12/2***	8811.59	8614.34	***21/2***	6401.84	7750.09	***30/2***	8775.59	6626.34	***39/2***	9513.22	7063.47
3/3	7711.84	10832.70	***12/3***	14067.10	9332.22	***21/3***	8308.84	6969.47	***30/3***	6232.72	4932.72	***39/3***	7400.72	5250.34
3/4	15374.00	15806.70	***12/4***	8302.22	6650.34	***21/4***	27711.00	9435.22	***30/4***	6379.84	6488.47	***39/4***	8180.97	9584.22
3/5	8982.00	5563.88	***12/5***	6161.25	6161.25	***21/5***	12841.50	6571.50	***30/5***	12455.80	8714.12	***39/5***	5696.12	4784.88
4/1	2536.50	959.50	***13/1***	2534.00	792.00	***22/1***	684.63	875.38	***31/1***	726.38	560.13	***40/1***	1588.38	1003.88
4/2	5840.59	5947.72	***13/2***	9714.47	6225.72	***22/2***	11208.10	6264.59	***31/2***	10541.10	7895.09	***40/2***	6774.84	6774.84
4/3	5247.22	4032.47	***13/3***	16340.30	5643.22	***22/3***	4091.72	6263.97	***31/3***	12163.60	9621.22	***40/3***	7999.09	6025.59
4/4	12929.20	9446.72	***13/4***	7147.72	7582.59	***22/4***	10691.10	9773.72	***31/4***	7337.34	8128.59	***40/4***	6778.84	8312.34
4/5	24709.90	5709.88	***13/5***	6537.88	6537.88	***22/5***	5598.62	6812.75	***31/5***	3757.12	3757.12	***40/5***	10175.90	8673.75
5/1	1517.38	588.88	***14/1***	3221.00	1088.00	***23/1***	692.00	666.00	***32/1***	1049.88	640.63	***41/1***	1167.00	985.00
5/2	11081.10	6356.47	***14/2***	7950.47	7171.72	***23/2***	8535.47	7355.72	***32/2***	13703.70	6573.97	***41/2***	6934.09	5028.72
5/3	8701.59	11503.60	***14/3***	12107.60	9290.72	***23/3***	5228.47	6436.34	***32/3***	5160.72	11800.60	***41/3***	5616.34	5616.34
5/4	8026.22	7094.97	***14/4***	8086.84	7068.09	***23/4***	11558.00	14407.80	***32/4***	8942.72	18514.10	***41/4***	9487.59	7668.72
5/5	12498.50	4299.12	***14/5***	9645.88	4612.75	***23/5***	14025.90	6335.38	***32/5***	21117.20	6734.88	***41/5***	11742.50	7320.38
6/1	1577.62	818.13	***15/1***	2178.88	757.63	***24/1***	869.63	788.13	***33/1***	1532.88	1057.12	***42/1***	4380.88	1396.88
6/2	5848.34	5888.22	***15/2***	9622.34	5747.72	***24/2***	12496.30	5711.09	***33/2***	25631.60	7596.22	***42/2***	4542.97	4542.97
6/3	5048.84	5048.84	***15/3***	7965.97	8244.97	***24/3***	9310.59	5518.22	***33/3***	10692.00	5811.72	***42/3***	8020.47	5347.59
6/4	8280.34	6797.84	***15/4***	7113.72	12166.30	***24/4***	8639.09	5745.72	***33/4***	23209.70	23859.70	***42/4***	14963.70	11217.00
6/5	9674.25	5547.00	***15/5***	10423.60	6357.62	***24/5***	8699.75	6657.75	***33/5***	6024.00	4682.75	***42/5***	7272.12	4656.50
7/1	1577.00	1567.00	***16/1***	1881.25	1047.25	***25/1***	1147.62	863.13	***34/1***	1316.38	717.13	***43/1***	2410.62	997.13
7/2	5764.97	5764.97	***16/2***	5868.00	5868.00	***25/2***	8318.22	6561.09	***34/2***	10332.70	5398.84	***43/2***	12536.30	7610.47
7/3	6129.09	6129.09	***16/3***	11193.70	6865.54	***25/3***	8315.09	6640.72	***34/3***	7500.72	7200.47	***43/3***	9368.84	6386.47
7/4	8106.97	7567.97	***16/4***	18649.60	6122.78	***25/4***	8752.47	24313.70	***34/4***	14849.30	7199.34	***43/4***	7537.97	24080.70
7/5	6314.25	5020.88	***16/5***	10844.00	4979.74	***25/5***	8250.88	5443.88	***34/5***	5163.62	6471.38	***43/5***	4613.38	4275.88
8/1	1323.50	1520.00	***17/1***	2680.00	895.00	***26/1***	1063.00	742.00	***35/1***	866.38	744.63	***44/1***	4800.00	804.00
8/2	11829.20	7666.47	***17/2***	6733.50	6733.50	***26/2***	7277.09	6332.72	***35/2***	10151.20	5521.84	***44/2***	4785.47	6331.97
8/3	10069.80	8678.34	***17/3***	11635.50	9310.00	***26/3***	15850.20	10281.70	***35/3***	10264.30	11078.20	***44/3***	7694.72	6601.97
8/4	7791.72	6914.09	***17/4***	8982.00	7338.00	***26/4***	14796.70	6766.59	***35/4***	14297.70	7447.84	***44/4***	12135.50	11323.20
8/5	6094.88	4741.88	***17/5***	6416.00	6416.00	***26/5***	10198.80	7832.25	***35/5***	4400.25	7448.00	***44/5***	5514.62	6208.62
9/1	986.88	812.13	***18/1***	915.50	602.50	***27/1***	2270.62	867.13	***36/1***	1262.62	1101.12	***45/1***	1759.88	1097.88
9/2	6071.84	5752.84	***18/2***	19276.10	5916.47	***27/2***	8229.84	6305.22	***36/2***	6789.59	6278.72	***45/2***	16438.00	7260.59
9/3	13421.30	4408.34	***18/3***	8107.84	5281.22	***27/3***	9979.34	7477.34	***36/3***	7020.34	4575.59	***45/3***	9250.34	5205.22
9/4	7284.09	6726.09	***18/4***	16959.00	7176.84	***27/4***	6592.59	6534.09	***36/4***	6615.22	6920.22	***45/4***	9825.84	10719.50
9/5	6781.50	5535.50	***18/5***	7870.62	4630.38	***27/5***	9065.25	4827.12	***36/5***	5422.25	6094.75	***45/5***	7200.75	5213.00

Tabla B.12: Valores de no-regularidad del trabajo requerido, $\Delta_Q(P)$ (distancia cuadrática), dadas las secuencias ofrecidas por $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ para cada plan de producción *P/E* (*Programa de producción/Estructura de tiempos de proceso*).

$M3 \cup 4$ vs $M3 \cup 4_pmr$ $\{\Delta_Q(W)\}$														
P/E	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$
1/1	10020	10257	***10/1***	35852	28504	***19/1***	8107	6334	***28/1***	20232	14119	***37/1***	14031	13945
1/2	329585	338263	***10/2***	289264	375848	***19/2***	113437	114414	***28/2***	148600	155668	***37/2***	77410	86190
1/3	811979	862207	***10/3***	771076	804052	***19/3***	246861	319483	***28/3***	389544	385922	***37/3***	317716	321042
1/4	2796050	2844560	***10/4***	26935	15983	***19/4***	931346	989757	***28/4***	90953	139308	***37/4***	583652	575133
1/5	285102	262646	***10/5***	8497	12183	***19/5***	149426	127512	***28/5***	29596	27277	***37/5***	89748	124688
2/1	54427	55881	***11/1***	11834	9761	***20/1***	8344	7891	***29/1***	13589	15699	***38/1***	12444	13090
2/2	447769	461826	***11/2***	115836	117465	***20/2***	77668	81465	***29/2***	158808	153458	***38/2***	230600	242155
2/3	641508	719711	***11/3***	268877	288995	***20/3***	273551	288384	***29/3***	464605	436839	***38/3***	408026	403413
2/4	2444520	2271830	***11/4***	999801	922373	***20/4***	403120	433148	***29/4***	90953	161833	***38/4***	1385270	1527580
2/5	472032	477601	***11/5***	111681	93444	***20/5***	25295	26250	***29/5***	20058	18045	***38/5***	185782	227761
3/1	39359	38915	***12/1***	7385	10425	***21/1***	21073	18866	***30/1***	20472	17611	***39/1***	15952	13403
3/2	483748	410761	***12/2***	84196	82446	***21/2***	199446	209641	***30/2***	155255	189729	***39/2***	196746	212913
3/3	1130580	1161050	***12/3***	273521	295643	***21/3***	424958	412158	***30/3***	256431	277886	***39/3***	404299	390439
3/4	26935	26935	***12/4***	574296	641157	***21/4***	424122	254596	***30/4***	584997	540413	***39/4***	1578760	1642890
3/5	145559	159680	***12/5***	55245	56525	***21/5***	52749	75894	***30/5***	171856	158300	***39/5***	258191	234867
4/1	163357	120871	***13/1***	9017	5603	***22/1***	25108	24649	***31/1***	16650	16035	***40/1***	3445	3587
4/2	582417	617412	***13/2***	73864	90771	***22/2***	261036	265608	***31/2***	149638	145948	***40/2***	70495	71462
4/3	577778	555483	***13/3***	256752	252878	***22/3***	537950	518892	***31/3***	350256	363979	***40/3***	244793	239682
4/4	26935	22828	***13/4***	625532	662157	***22/4***	175665	120944	***31/4***	530316	522956	***40/4***	633813	657285
4/5	336990	307323	***13/5***	64219	65918	***22/5***	41428	46641	***31/5***	107116	110584	***40/5***	74575	68617
5/1	15135	13351	***14/1***	16791	14558	***23/1***	22692	19069	***32/1***	20236	18095	***41/1***	6162	6540
5/2	285413	250232	***14/2***	128512	141067	***23/2***	230837	220572	***32/2***	152275	204600	***41/2***	52808	56933
5/3	682646	665767	***14/3***	314120	333044	***23/3***	615298	603514	***32/3***	341514	339162	***41/3***	264814	266109
5/4	2585070	2447270	***14/4***	554028	584288	***23/4***	130015	115913	***32/4***	880176	786450	***41/4***	609548	632088
5/5	260016	316129	***14/5***	50627	66316	***23/5***	20225	29235	***32/5***	160284	186533	***41/5***	89145	91555
6/1	11549	13122	***15/1***	15136	12093	***24/1***	28390	26310	***33/1***	17992	18908	***42/1***	5043	2519
6/2	63778	65175	***15/2***	118819	133074	***24/2***	226664	264034	***33/2***	211608	199666	***42/2***	107595	105650
6/3	295221	296191	***15/3***	321292	338680	***24/3***	382209	373410	***33/3***	339792	360338	***42/3***	240147	270909
6/4	604941	633813	***15/4***	335343	292659	***24/4***	297402	311496	***33/4***	1081790	766876	***42/4***	902404	971450
6/5	119519	119227	***15/5***	27110	31948	***24/5***	112979	104331	***33/5***	165609	168559	***42/5***	141799	129254
7/1	1900	1465	***16/1***	9054	7557	***25/1***	23185	18630	***34/1***	6725	4451	***43/1***	12504	11103
7/2	123751	121909	***16/2***	75578	72259	***25/2***	244753	230013	***34/2***	97738	139607	***43/2***	97230	102036
7/3	204255	206582	***16/3***	199662	201609	***25/3***	507951	462250	***34/3***	251286	247536	***43/3***	333071	317056
7/4	682196	690597	***16/4***	379575	289743	***25/4***	310687	223514	***34/4***	385289	347349	***43/4***	1072700	1204010
7/5	153937	121376	***16/5***	19795	23176	***25/5***	51139	70802	***34/5***	57121	57506	***43/5***	141172	128301
8/1	23853	22782	***17/1***	13677	9490	***26/1***	26775	23564	***35/1***	9144	10909	***44/1***	10704	7481
8/2	225949	224372	***17/2***	96289	93292	***26/2***	217000	288020	***35/2***	78219	83593	***44/2***	151268	179394
8/3	462627	434530	***17/3***	275408	285382	***26/3***	348046	360978	***35/3***	332927	328060	***44/3***	424693	415256
8/4	499892	523608	***17/4***	582900	599361	***26/4***	564573	499824	***35/4***	318666	342798	***44/4***	1516380	1496850
8/5	176135	187693	***17/5***	41078	39227	***26/5***	116347	133142	***35/5***	51713	51107	***44/5***	194199	156951
9/1	43902	45586	***18/1***	11370	13530	***27/1***	25209	23313	***36/1***	4080	5202	***45/1***	13613	11159
9/2	262835	268208	***18/2***	141727	120162	***27/2***	235560	226159	***36/2***	125566	134682	***45/2***	179725	146205
9/3	318611	321552	***18/3***	302863	307536	***27/3***	413439	390222	***36/3***	224697	236528	***45/3***	443726	408109
9/4	480812	522648	***18/4***	995970	1036660	***27/4***	556437	522648	***36/4***	577709	574260	***45/4***	1517260	1490730
9/5	162202	177631	***18/5***	160110	136834	***27/5***	119265	131907	***36/5***	116289	115039	***45/5***	231129	223259

Tabla B.13: Valores de no-regularidad de la sobrecarga de trabajo, $\Delta_Q(W)$ (distancia cuadrática), dadas las secuencias ofrecidas por $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ para cada plan de producción *P/E* (*Programa de producción/Estructura de tiempos de proceso*).

$M4 \cup 3$ vs $M4 \cup 3_pmr$ $\{\Delta_Q(V)\}$															
P/E	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$	*P/E*	$4 \cup 3$	$4 \cup 3_pmr$
1/1	9236.5	8980.5	***10/1***	23821.6	24381.9	***19/1***	2777.0	3504.5	***28/1***	10795.0	11344.0	***37/1***	8121.5	8570.0
1/2	333385.0	322931.0	***10/2***	159430.0	159152.0	***19/2***	57771.5	61495.3	***28/2***	65436.5	67177.2	***37/2***	54546.3	57994.8
1/3	418660.0	414926.0	***10/3***	372999.0	371652.0	***19/3***	118195.0	125600.0	***28/3***	140095.0	156455.0	***37/3***	108893.0	97169.6
1/4	783785.0	791337.0	***10/4***	33817.1	37232.1	***19/4***	273583.0	292136.0	***28/4***	129964.0	75929.7	***37/4***	333678.0	212560.0
1/5	200835.0	201347.0	***10/5***	16473.2	14033.9	***19/5***	53271.9	53549.0	***28/5***	18609.2	19855.9	***37/5***	54433.6	58121.6
2/1	30589.5	29530.0	***11/1***	3343.6	3234.9	***20/1***	2850.5	2892.5	***29/1***	7864.9	10159.1	***38/1***	3789.4	5275.6
2/2	206739.0	207894.0	***11/2***	46407.8	48875.7	***20/2***	29633.2	33230.1	***29/2***	83687.7	79703.7	***38/2***	75900.2	85596.2
2/3	305628.0	325772.0	***11/3***	98542.8	98074.8	***20/3***	83541.6	89200.0	***29/3***	176599.0	182699.0	***38/3***	185590.0	183436.0
2/4	630008.0	645042.0	***11/4***	265408.0	307123.0	***20/4***	136295.0	135805.0	***29/4***	114674.0	78186.3	***38/4***	411365.0	389339.0
2/5	289820.0	293893.0	***11/5***	29277.2	30323.4	***20/5***	21885.0	34799.8	***29/5***	14978.6	15721.0	***38/5***	79784.1	76159.2
3/1	19297.5	19817.0	***12/1***	4325.1	3353.6	***21/1***	10027.0	9834.0	***30/1***	9136.0	8737.0	***39/1***	5941.0	7746.5
3/2	295977.0	286107.0	***12/2***	34170.0	34345.2	***21/2***	117763.0	133835.0	***30/2***	84017.1	85612.5	***39/2***	81450.3	83147.2
3/3	476331.0	492186.0	***12/3***	104374.0	90478.0	***21/3***	149259.0	141787.0	***30/3***	81760.8	80128.0	***39/3***	151548.0	146815.0
3/4	33855.0	32613.7	***12/4***	207115.0	231990.0	***21/4***	157853.0	136568.0	***30/4***	189512.0	166368.0	***39/4***	399304.0	375504.0
3/5	152782.0	145237.0	***12/5***	31390.9	31646.5	***21/5***	43522.5	33298.6	***30/5***	66226.6	69366.2	***39/5***	95758.7	100415.0
4/1	68894.5	70633.5	***13/1***	1976.5	2255.5	***22/1***	17925.1	17108.4	***31/1***	8146.4	7082.1	***40/1***	2463.1	2990.6
4/2	293261.0	291724.0	***13/2***	27375.5	31132.0	***22/2***	102736.0	106560.0	***31/2***	132667.0	115729.0	***40/2***	31248.0	31608.8
4/3	290776.0	273255.0	***13/3***	98604.6	72849.2	***22/3***	222523.0	213562.0	***31/3***	107855.0	101506.0	***40/3***	104332.0	98668.6
4/4	31494.2	25832.2	***13/4***	171809.0	205019.0	***22/4***	31259.7	88470.7	***31/4***	192878.0	221583.0	***40/4***	219583.0	208837.0
4/5	263711.0	260500.0	***13/5***	20758.8	20737.9	***22/5***	27225.6	28401.0	***31/5***	55442.1	58279.4	***40/5***	35962.0	37511.5
5/1	7931.9	8856.6	***14/1***	4056.0	5179.0	***23/1***	11343.5	12449.5	***32/1***	6654.6	8711.9	***41/1***	6179.5	5984.5
5/2	140713.0	137932.0	***14/2***	89488.0	83603.7	***23/2***	144317.0	131292.0	***32/2***	75958.1	81529.1	***41/2***	22367.8	28337.5
5/3	344735.0	352609.0	***14/3***	97213.6	89796.6	***23/3***	245909.0	242151.0	***32/3***	136176.0	124874.0	***41/3***	100152.0	120248.0
5/4	685070.0	682826.0	***14/4***	235743.0	168651.0	***23/4***	50762.7	93290.3	***32/4***	284103.0	308676.0	***41/4***	251328.0	240068.0
5/5	132657.0	134988.0	***14/5***	26118.5	24304.8	***23/5***	23110.1	14581.1	***32/5***	76543.6	71810.5	***41/5***	39544.6	42490.2
6/1	12974.9	10974.1	***15/1***	4185.6	7147.1	***24/1***	15241.4	14898.9	***33/1***	6831.1	6544.1	***42/1***	3250.4	2085.9
6/2	33930.1	34083.0	***15/2***	54365.0	59333.5	***24/2***	98475.5	104964.0	***33/2***	121569.0	127186.0	***42/2***	56648.2	55690.5
6/3	103575.0	137999.0	***15/3***	102547.0	101348.0	***24/3***	113717.0	118971.0	***33/3***	114622.0	93763.3	***42/3***	112422.0	100282.0
6/4	224642.0	275342.0	***15/4***	127519.0	197072.0	***24/4***	124512.0	97154.5	***33/4***	231182.0	371890.0	***42/4***	348764.0	322753.0
6/5	70487.9	61237.9	***15/5***	20750.0	15247.5	***24/5***	60613.2	53854.2	***33/5***	79760.4	86096.6	***42/5***	56547.1	58896.9
7/1	2538.5	1715.5	***16/1***	2518.7	2331.7	***25/1***	5698.4	6377.4	***34/1***	3457.1	3235.1	***43/1***	6676.6	6140.1
7/2	58356.0	57576.2	***16/2***	33166.9	33780.1	***25/2***	165678.0	164018.0	***34/2***	43460.0	48588.8	***43/2***	50906.1	49655.0
7/3	81496.3	87467.1	***16/3***	65849.8	62151.4	***25/3***	157838.0	167910.0	***34/3***	85995.5	79778.1	***43/3***	119773.0	93010.5
7/4	238724.0	217048.0	***16/4***	95239.3	100210.0	***25/4***	80197.5	151476.0	***34/4***	146849.0	152914.0	***43/4***	341227.0	297387.0
7/5	58480.4	56440.9	***16/5***	18326.2	11802.9	***25/5***	30158.0	31230.2	***34/5***	26453.1	23756.6	***43/5***	65070.8	61109.0
8/1	7889.5	7460.0	***17/1***	3143.0	2659.0	***26/1***	8860.5	9791.5	***35/1***	5474.4	5693.6	***44/1***	4473.0	3042.0
8/2	205913.0	220640.0	***17/2***	43836.0	40256.5	***26/2***	137965.0	125679.0	***35/2***	34639.2	37800.5	***44/2***	79776.7	88529.8
8/3	120270.0	122071.0	***17/3***	92636.0	87126.5	***26/3***	105291.0	100545.0	***35/3***	117569.0	118608.0	***44/3***	195965.0	187923.0
8/4	177048.0	323613.0	***17/4***	174196.0	178216.0	***26/4***	115468.0	183432.0	***35/4***	168413.0	236886.0	***44/4***	433207.0	460688.0
8/5	89393.5	94128.9	***17/5***	20342.0	19651.5	***26/5***	67019.1	68793.8	***35/5***	37570.2	35709.1	***44/5***	70555.6	73741.6
9/1	18361.1	17921.1	***18/1***	6468.0	5304.5	***27/1***	7580.1	7969.9	***36/1***	3511.4	4121.6	***45/1***	5757.1	7916.6
9/2	123110.0	127558.0	***18/2***	66270.8	71426.2	***27/2***	172584.0	167845.0	***36/2***	62047.0	63887.6	***45/2***	87679.2	84798.8
9/3	87786.2	88846.8	***18/3***	116664.0	103227.0	***27/3***	111288.0	106949.0	***36/3***	80648.0	77406.3	***45/3***	160068.0	158339.0
9/4	166506.0	169347.0	***18/4***	287809.0	270040.0	***27/4***	147701.0	224507.0	***36/4***	208926.0	230111.0	***45/4***	440994.0	450877.0
9/5	102899.0	103423.0	***18/5***	58615.9	50079.8	***27/5***	56502.2	50281.8	***36/5***	57862.6	57733.5	***45/5***	68159.2	76100.9

Tabla B.14: Valores de no-regularidad del trabajo completado, $\Delta_Q(V)$ (distancia cuadrática), dadas las secuencias ofrecidas por $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ para cada plan de producción *P/E* (*Programa de producción/Estructura de tiempos de proceso*).

P/E	RPD_1					RPD_2				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
1/1	0.00	-24.62	19.58	-14.11	-2.26	0.00	22.47	-22.13	-2.37	2.77
1/2	0.00	27.35	35.33	-24.00	2.04	0.00	17.98	5.45	-2.63	3.14
1/3	0.00	31.68	39.54	1.07	0.29	0.00	10.39	42.66	-6.19	0.89
1/4	0.00	14.16	2.58	2.53	0.59	0.00	0.00	5.67	-1.73	-0.96
1/5	0.00	39.67	20.88	5.51	2.25	0.00	17.98	8.45	7.88	-0.25
2/1	0.00	15.58	-80.20	-10.60	-11.15	0.00	-17.39	-61.39	-2.67	3.46
2/2	0.00	13.48	21.92	-4.52	0.98	0.00	13.48	28.15	-3.14	-0.56
2/3	0.00	35.40	15.68	12.98	4.15	0.00	31.86	38.24	-12.19	-6.59
2/4	0.00	21.51	2.77	3.31	-1.57	0.00	13.48	-56.08	7.06	-2.39
2/5	-0.72	48.23	40.99	2.27	-1.81	-0.72	31.86	31.54	-1.18	-1.41
3/1	0.00	19.80	-134.34	-6.07	6.18	0.00	-10.96	3.48	1.13	-2.69
3/2	0.00	5.48	-1.06	1.75	3.75	0.00	17.98	27.85	15.09	3.33
3/3	0.00	34.11	7.07	-20.24	-3.38	0.00	-4.71	-40.47	-2.70	-3.33
3/4	0.00	47.57	22.96	37.77	14.67	0.00	-10.62	-2.81	0.00	3.67
3/5	0.00	61.38	62.87	24.07	1.69	0.00	30.48	38.06	-9.70	4.94
4/1	0.00	20.62	28.85	-23.29	-3.24	0.00	37.61	62.17	26.01	-2.52
4/2	0.00	45.39	58.64	11.60	-1.98	0.00	13.48	-1.83	-6.01	0.52
4/3	0.00	42.55	55.16	13.87	1.25	0.00	19.80	23.15	3.86	6.03
4/4	0.00	47.20	36.94	-40.14	26.70	0.00	48.73	26.93	15.25	17.98
4/5	0.00	-21.92	-48.09	5.57	-5.90	0.00	65.07	76.89	8.80	1.22
5/1	-4.35	27.91	55.06	9.27	6.71	-4.35	39.02	61.19	11.79	-11.66
5/2	-3.50	34.29	32.73	-5.92	0.24	-3.50	52.41	42.64	12.33	1.98
5/3	0.00	43.20	-23.35	-11.88	-4.44	0.00	-10.96	-32.20	2.47	-2.28
5/4	0.00	21.69	-38.18	-1.73	-1.08	0.00	21.69	11.60	5.33	0.33
5/5	-1.80	75.09	63.26	-20.41	0.83	-1.80	75.09	65.60	-21.58	-1.76
6/1	0.00	2.11	11.35	3.70	0.21	0.00	33.57	48.14	-13.62	15.42
6/2	0.00	0.00	0.00	-3.26	-2.99	0.00	0.00	-0.68	-2.19	-0.45
6/3	0.00	0.00	0.00	1.26	10.17	0.00	0.00	0.00	-0.33	-33.24
6/4	0.00	59.89	33.04	-1.30	-34.68	0.00	32.62	17.90	-4.77	-22.57
6/5	0.00	22.47	21.21	13.83	1.22	0.00	36.36	42.66	0.24	13.12
7/1	-14.29	37.58	-10.18	20.01	-1.26	-14.29	23.53	0.63	22.89	32.42
7/2	0.00	36.89	27.31	15.27	10.68	0.00	0.00	0.00	1.49	1.34
7/3	0.00	-4.21	17.44	3.52	12.57	0.00	0.00	0.00	-1.14	-7.33
7/4	0.00	54.24	1.37	-6.90	8.72	0.00	4.88	6.65	-1.23	9.08
7/5	0.00	41.12	36.21	-10.31	7.34	0.00	33.68	20.48	21.15	3.49
8/1	0.00	9.30	-176.22	11.48	-20.28	0.00	6.06	-14.85	4.49	5.44

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_1					RPD_2				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
8/2	-1.01	35.29	43.52	-0.94	-0.78	-1.01	30.77	35.19	0.70	-7.15
8/3	0.00	63.47	62.42	6.56	13.21	0.00	5.71	13.82	6.07	-1.50
8/4	0.00	5.71	-0.32	-4.95	7.19	0.00	36.13	11.26	-4.74	-82.78
8/5	0.00	46.04	39.74	-25.43	-5.10	0.00	25.26	22.20	-6.56	-5.30
9/1	0.00	49.69	7.46	13.23	3.73	0.00	-2.53	17.71	-3.84	2.40
9/2	0.00	35.51	20.38	21.82	6.74	0.00	0.00	5.25	-2.04	-3.61
9/3	-1.29	62.18	65.31	-1.11	3.11	-1.29	66.97	67.15	-0.92	-1.21
9/4	0.00	-14.81	-11.31	-11.24	20.23	0.00	-5.19	7.66	-8.70	-1.71
9/5	-1.14	33.03	-0.80	-21.47	-20.11	-1.14	36.70	18.37	-9.51	-0.51
10/1	0.00	-11.94	-17.71	-2.16	1.66	0.00	46.40	22.95	20.50	-2.35
10/2	0.00	18.95	51.60	-27.36	1.97	0.00	14.74	29.02	-29.93	0.17
10/3	0.00	91.69	23.27	2.83	-1.32	0.00	42.96	50.02	-4.28	0.36
10/4	0.00	83.03	68.91	-36.56	58.61	0.00	71.47	2.18	40.66	-10.10
10/5	-11.90	42.42	50.44	-47.00	21.73	-11.90	42.42	50.44	-43.38	14.81
11/1	-8.11	83.54	73.41	17.89	0.59	-8.11	83.29	76.27	17.52	3.25
11/2	-3.79	28.10	6.55	1.11	-16.49	-3.79	39.67	23.94	-1.41	-5.32
11/3	-4.19	16.82	15.21	-4.94	7.25	-4.19	52.02	14.27	-7.48	0.47
11/4	0.00	56.16	23.17	11.70	-19.08	0.00	33.60	15.67	7.74	-15.72
11/5	-2.48	34.41	34.12	17.85	-0.53	-2.48	34.41	34.12	16.33	-3.57
12/1	-8.11	78.10	45.67	5.18	7.16	-8.11	67.70	28.70	-41.16	22.46
12/2	-0.89	23.14	2.24	2.49	6.62	-0.89	23.14	2.24	2.08	-0.51
12/3	-0.90	68.29	65.85	0.38	23.39	-0.90	70.90	33.66	-8.09	13.31
12/4	0.00	51.46	29.21	-2.34	-22.13	0.00	68.44	19.90	-11.64	-12.01
12/5	0.00	18.82	18.75	5.88	12.17	0.00	0.00	0.00	-2.32	-0.81
13/1	-13.79	86.03	55.84	33.08	16.06	-13.79	85.40	68.75	37.86	-14.12
13/2	0.00	-25.40	-18.06	-5.18	-1.51	0.00	27.52	35.91	-22.89	-13.72
13/3	-0.97	48.59	34.81	0.12	7.21	-0.97	48.21	65.46	1.51	26.12
13/4	0.00	66.93	19.52	-16.54	5.02	0.00	27.64	-6.08	-5.86	-19.33
13/5	0.00	0.00	0.00	4.12	7.02	0.00	0.00	0.00	-2.65	0.10
14/1	-8.89	81.63	69.45	7.98	18.04	-8.89	80.94	66.22	13.30	-27.69
14/2	-0.65	16.16	13.38	-10.07	6.80	-0.65	10.10	9.80	-9.77	6.58
14/3	-2.60	50.37	42.97	-4.19	12.50	-2.60	41.73	23.27	-6.02	7.63
14/4	0.00	66.97	5.60	2.56	9.72	0.00	62.83	12.60	-5.46	28.46
14/5	-2.91	51.09	52.18	-28.49	8.84	-2.91	51.09	52.18	-30.99	6.94
15/1	-10.00	58.78	50.82	22.95	-64.87	-10.00	90.27	65.23	20.10	-70.75
15/2	0.00	14.46	22.88	-0.19	-3.13	0.00	42.28	40.27	-12.00	-9.14

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_1					RPD_2				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
15/3	0.00	25.60	27.41	1.04	3.44	0.00	49.71	-3.50	-5.41	1.17
15/4	0.00	81.37	27.22	-29.68	28.50	0.00	26.67	-71.03	12.73	-54.54
15/5	0.00	67.51	65.74	-28.61	40.83	0.00	38.40	39.01	-17.85	26.52
16/1	-12.50	83.78	44.33	14.37	-2.78	-12.50	83.78	44.33	16.53	7.42
16/2	0.00	0.00	0.00	8.07	7.16	0.00	0.00	0.00	4.39	-1.85
16/3	0.00	44.55	20.73	-0.73	1.55	0.00	53.01	38.67	-0.98	5.62
16/4	0.00	22.36	-34.64	3.66	-10.79	0.00	44.16	67.17	23.67	-5.22
16/5	0.00	0.00	0.00	1.34	0.85	0.00	54.94	54.08	-17.08	35.60
17/1	-8.11	89.13	66.65	25.76	-21.17	-8.11	88.89	66.60	30.61	15.40
17/2	0.00	0.00	2.26	-23.83	-21.03	0.00	0.00	0.00	3.11	8.17
17/3	-0.91	50.00	22.45	-2.95	10.02	-0.91	61.54	19.99	-3.62	5.95
17/4	0.00	28.57	19.68	1.15	-2.61	0.00	50.00	18.30	-2.82	-2.31
17/5	0.00	0.00	0.00	7.13	5.97	0.00	0.00	0.00	4.51	3.39
18/1	-2.22	67.61	38.80	10.16	0.39	-2.22	64.25	34.19	-19.00	17.99
18/2	-5.15	72.86	69.31	14.98	3.49	-5.15	72.86	69.31	15.22	-7.78
18/3	-0.87	23.36	0.50	0.74	-4.81	-0.87	47.76	34.86	-1.54	11.52
18/4	0.00	63.54	-12.76	-2.83	-11.39	0.00	48.12	57.68	-4.09	6.17
18/5	-1.27	49.64	36.32	1.99	5.75	-1.27	49.64	41.17	14.54	14.56
19/1	-6.06	72.07	45.33	16.04	-10.00	-6.06	72.07	42.25	21.87	-26.20
19/2	0.00	0.00	0.00	5.70	4.62	0.00	0.00	0.00	-0.86	-6.45
19/3	-5.53	33.06	-178.42	-2.00	-13.02	-5.53	83.92	30.91	-29.42	-6.27
19/4	0.00	41.60	13.52	-10.05	5.93	0.00	21.71	26.12	-6.27	-6.78
19/5	0.00	4.94	-21.75	-12.61	4.05	0.00	-5.19	17.86	14.67	-0.52
20/1	-12.90	74.35	35.90	-14.92	-10.54	-12.90	83.92	50.39	5.43	-1.47
20/2	0.00	0.00	0.00	-12.04	-12.53	0.00	-24.69	-20.74	-4.89	-12.14
20/3	0.00	0.00	24.42	2.26	-0.63	0.00	37.87	-59.16	-5.42	-6.77
20/4	0.00	60.49	41.68	8.24	-10.20	0.00	46.90	-27.28	-7.45	0.36
20/5	0.00	0.00	0.00	4.43	4.45	0.00	0.00	0.00	-3.78	-59.01
21/1	-1.79	54.90	60.50	3.66	12.18	-1.79	28.32	3.10	10.47	1.92
21/2	0.00	0.00	11.82	-0.83	1.90	0.00	0.00	-21.06	-5.11	-13.65
21/3	0.00	39.10	45.26	2.04	10.22	0.00	72.86	16.12	3.01	5.01
21/4	0.00	81.98	38.68	-0.99	18.33	0.00	75.29	65.95	39.97	13.48
21/5	-0.94	61.02	62.12	-28.72	34.85	-0.94	53.18	48.83	-43.88	23.49
22/1	0.00	38.38	26.15	-9.67	2.14	0.00	-18.18	-27.86	1.83	4.56
22/2	0.00	0.00	0.00	0.67	1.08	0.00	47.20	44.11	-1.75	-3.72
22/3	0.00	69.08	-10.27	8.50	-2.11	0.00	-15.38	-53.09	3.54	4.03

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_1					RPD_2				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
22/4	0.00	36.36	47.28	-131.56	49.72	0.00	9.52	8.58	31.15	-183.02
22/5	0.00	0.00	0.00	0.94	1.01	0.00	-8.00	-21.69	-12.58	-4.32
23/1	-1.82	53.90	3.76	17.01	-9.38	-1.82	53.90	3.76	15.97	-9.75
23/2	0.00	10.31	13.73	-0.09	1.03	0.00	4.40	13.82	4.45	9.03
23/3	0.00	83.84	47.39	-4.14	-1.97	0.00	42.34	-23.10	1.92	1.53
23/4	0.00	89.03	80.87	-40.39	47.87	0.00	24.39	-24.66	10.85	-83.78
23/5	0.00	44.90	48.17	-18.11	31.06	0.00	59.02	54.83	-44.55	36.91
24/1	0.00	30.09	15.04	-39.70	-7.12	0.00	21.69	9.37	7.33	2.25
24/2	-1.46	63.60	59.34	-28.77	-12.94	-1.46	54.45	54.30	-16.49	-6.59
24/3	-0.39	31.68	-6.38	1.66	6.79	-0.39	69.19	40.73	2.30	-4.62
24/4	0.00	57.02	28.17	-3.16	-15.85	0.00	52.23	33.49	-4.74	21.97
24/5	0.00	72.89	68.36	-46.20	9.99	0.00	16.84	23.47	7.65	11.15
25/1	0.00	57.14	18.24	20.89	-9.86	0.00	59.53	24.79	19.65	-11.92
25/2	0.00	0.00	0.00	0.49	0.95	0.00	25.69	21.12	6.02	1.00
25/3	0.00	52.63	28.74	-3.40	-4.79	0.00	66.67	20.14	9.00	-6.38
25/4	0.00	-38.71	41.09	3.25	-14.37	0.00	36.60	-177.79	28.06	-88.88
25/5	-2.91	10.62	17.60	-44.05	-10.60	-2.91	40.31	34.02	-38.45	-3.56
26/1	0.00	16.16	-12.97	4.97	3.60	0.00	27.59	30.20	11.99	-10.51
26/2	0.00	15.19	19.06	5.59	-1.55	0.00	35.90	12.98	-32.73	8.91
26/3	-0.82	57.40	36.31	-0.33	-3.39	-0.82	53.42	35.13	-3.72	4.51
26/4	0.00	53.18	26.75	-4.58	2.91	0.00	71.30	54.27	11.47	-58.86
26/5	-0.66	46.62	50.20	-22.26	-3.99	-0.66	39.22	23.20	-14.44	-2.65
27/1	-3.45	77.96	51.53	15.43	-6.40	-3.45	77.96	61.81	7.52	-5.14
27/2	0.00	4.49	17.62	10.26	-0.25	0.00	19.05	23.39	3.99	2.75
27/3	0.00	70.82	22.84	-5.54	-4.99	0.00	25.74	25.07	5.62	3.90
27/4	0.00	27.37	12.62	-0.92	-1.61	0.00	24.43	0.89	6.07	-52.00
27/5	-5.11	51.09	46.75	-7.45	6.42	-5.11	51.09	46.75	-10.60	11.01
28/1	0.00	19.26	12.14	-17.09	16.72	0.00	72.95	40.54	30.21	-5.09
28/2	0.00	-9.71	11.83	10.38	-0.68	0.00	17.52	24.01	-4.76	-2.66
28/3	-0.38	40.00	34.19	4.75	-0.62	-0.38	44.07	23.89	0.93	-11.68
28/4	0.00	54.88	24.04	-38.61	62.57	0.00	70.08	83.97	-53.16	41.58
28/5	0.00	2.47	5.72	13.96	7.69	0.00	-5.06	14.34	7.84	-6.70
29/1	-6.25	66.34	36.32	-21.59	-15.81	-6.25	64.39	34.20	-15.53	-29.17
29/2	0.00	-8.96	-1.95	3.02	0.52	0.00	-12.31	6.01	3.37	4.76
29/3	0.00	82.24	62.75	-4.53	-8.92	0.00	2.15	22.29	5.98	-3.45
29/4	0.00	54.55	66.31	-28.69	35.42	0.00	35.36	86.69	-77.93	31.82

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_1					RPD_2				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
29/5	0.00	3.15	-31.47	12.55	-14.37	0.00	-70.77	-73.10	10.04	-4.96
30/1	0.00	52.63	57.12	26.31	6.67	0.00	13.22	38.00	13.98	4.37
30/2	-0.56	46.72	33.17	-13.15	-2.90	-0.56	32.52	24.49	-22.20	-1.90
30/3	-1.40	73.75	45.47	-7.44	5.75	-1.40	72.06	20.86	-8.37	2.00
30/4	0.00	55.97	-33.48	4.43	-8.51	0.00	67.00	-1.70	7.62	12.21
30/5	-1.29	37.38	29.53	6.72	13.70	-1.29	39.52	30.04	7.89	-4.74
31/1	-1.92	42.55	56.89	-3.01	-0.44	-1.92	2.15	22.89	3.69	13.06
31/2	-1.96	29.20	30.04	-20.04	3.35	-1.96	34.90	25.10	2.47	12.77
31/3	-2.45	33.57	20.90	-4.73	5.62	-2.45	33.57	20.90	-3.92	5.89
31/4	0.00	51.01	16.07	9.87	5.25	0.00	-2.82	-10.78	1.39	-14.88
31/5	0.00	0.00	0.00	-3.68	-3.47	0.00	0.00	0.00	-3.24	-5.12
32/1	-1.89	50.42	17.94	-9.52	-8.65	-1.89	72.46	38.98	10.58	-30.91
32/2	-1.60	72.28	61.23	-37.14	3.99	-1.60	66.94	52.03	-34.36	-7.33
32/3	-3.40	41.29	-133.84	-7.13	-2.20	-3.40	-4.60	-128.66	0.69	8.30
32/4	0.00	72.80	24.11	-10.86	10.95	0.00	48.34	-107.03	10.65	-8.65
32/5	-0.57	64.09	65.95	-27.83	7.94	-0.57	56.34	68.11	-16.38	6.18
33/1	0.00	9.02	-64.98	4.94	6.15	0.00	9.92	31.04	-5.09	4.20
33/2	-4.60	75.90	70.36	3.86	-6.91	-4.60	75.90	70.36	5.64	-4.62
33/3	-2.47	36.94	34.12	-6.15	8.76	-2.47	21.94	45.64	-6.05	18.20
33/4	0.00	52.92	-51.90	-0.78	4.05	0.00	0.00	-2.80	29.11	-60.86
33/5	-1.17	27.72	22.27	0.61	-2.04	-1.17	27.72	22.27	-1.78	-7.94
34/1	-4.00	76.84	45.52	34.82	-7.34	-4.00	76.84	45.52	33.81	6.42
34/2	-3.55	60.65	47.75	-42.75	3.58	-3.55	60.65	47.75	-42.84	-11.80
34/3	0.00	3.67	-56.87	-0.26	-1.55	0.00	-3.88	4.00	1.49	7.23
34/4	0.00	0.00	-18.25	-9.03	21.93	0.00	59.59	51.52	9.85	-4.13
34/5	0.00	0.00	0.00	-10.57	-13.24	0.00	-42.62	-25.33	-0.67	10.19
35/1	-2.44	81.94	50.74	3.04	0.45	-2.44	56.21	14.05	-19.30	-4.00
35/2	0.00	-15.09	-14.08	1.48	-2.85	0.00	47.86	45.60	-6.87	-9.13
35/3	0.00	1.90	-58.61	-2.24	7.86	0.00	22.56	-7.93	1.46	-0.88
35/4	0.00	57.44	64.91	-18.28	39.56	0.00	20.95	47.91	-7.57	-40.66
35/5	0.00	0.00	3.73	-8.64	5.43	0.00	-71.19	-69.26	1.17	4.95
36/1	0.00	42.74	34.95	2.66	-30.34	0.00	23.76	12.79	-27.50	-17.38
36/2	-0.66	46.98	25.96	16.53	2.83	-0.66	7.06	7.52	-7.26	-2.97
36/3	-1.53	49.70	55.57	-2.45	13.35	-1.53	38.62	34.82	-5.27	4.02
36/4	0.00	74.27	-28.53	-11.51	27.55	0.00	40.78	-4.61	0.60	-10.14
36/5	0.00	40.25	51.76	8.01	14.30	0.00	-10.39	-12.40	1.07	0.22

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_1					RPD_2				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
37/1	0.00	44.80	36.50	4.02	0.94	0.00	22.47	14.71	0.61	-5.52
37/2	-1.72	33.03	33.40	-14.25	-5.27	-1.72	33.03	33.40	-11.34	-6.32
37/3	-0.85	43.93	40.86	-1.31	3.94	-0.85	63.41	38.53	-1.05	10.77
37/4	0.00	3.74	2.33	15.92	-2.47	0.00	11.57	-1.73	1.46	36.30
37/5	0.00	-56.14	-92.72	-30.57	0.51	0.00	-18.67	-68.92	-38.93	-6.78
38/1	-6.98	63.58	35.56	-0.30	-42.78	-6.98	62.43	38.48	-5.19	-39.22
38/2	-7.26	49.66	28.52	-21.52	-16.67	-7.26	66.97	46.23	-5.01	-12.77
38/3	0.00	42.99	5.10	1.28	1.38	0.00	0.00	0.00	1.13	1.16
38/4	-0.20	78.87	32.52	-6.86	6.93	-0.20	61.14	45.29	-10.27	5.35
38/5	-2.70	25.23	9.92	-26.70	0.60	-2.70	39.64	32.64	-22.60	4.54
39/1	-2.13	53.90	10.04	16.03	-12.31	-2.13	53.90	10.04	15.98	-30.39
39/2	-7.74	44.44	25.75	-3.15	5.23	-7.74	44.44	25.75	-8.22	-2.08
39/3	0.00	-27.85	26.75	-5.35	-5.36	0.00	26.28	29.06	3.43	3.12
39/4	0.00	22.68	-32.91	-1.57	-0.10	0.00	59.26	-17.15	-4.06	5.96
39/5	0.00	19.35	16.00	11.44	-2.65	0.00	19.35	16.00	9.03	-4.86
40/1	-9.09	48.17	45.56	-56.39	17.71	-9.09	42.94	36.80	-4.12	-21.42
40/2	0.00	0.00	0.00	-1.40	-7.22	0.00	0.00	0.00	-1.37	-1.15
40/3	0.00	13.45	3.59	0.17	15.75	0.00	36.36	24.67	2.09	5.43
40/4	0.00	38.30	34.12	-9.06	7.93	0.00	26.49	-22.62	-3.70	4.89
40/5	-4.85	16.00	-2.11	4.70	-13.44	-4.85	26.57	14.76	7.99	-4.31
41/1	0.00	40.46	39.12	-22.00	26.14	0.00	14.88	15.60	-6.13	3.16
41/2	-5.43	20.22	17.08	-4.26	-10.21	-5.43	38.20	27.48	-7.81	-26.69
41/3	0.00	2.02	9.16	3.00	-5.11	0.00	0.00	0.00	-0.49	-20.07
41/4	0.00	9.60	-7.87	0.83	22.45	0.00	23.78	19.17	-3.70	4.48
41/5	-1.87	59.72	37.66	0.19	19.67	-1.87	59.72	37.66	-2.70	-7.45
42/1	-9.09	72.42	66.29	42.83	34.51	-9.09	71.46	68.11	50.05	35.83
42/2	0.00	0.00	0.00	2.84	5.20	0.00	0.00	0.00	1.81	1.69
42/3	0.00	22.22	0.64	-3.04	-1.28	0.00	50.96	33.33	-12.81	10.80
42/4	0.00	79.88	53.24	15.34	-5.75	0.00	67.96	25.04	-7.65	7.46
42/5	0.00	26.51	19.48	-13.80	2.80	0.00	49.59	35.97	8.85	-4.16
43/1	0.00	37.91	9.25	24.81	-1.71	0.00	62.33	58.64	11.20	8.04
43/2	-2.59	48.45	29.27	-1.12	0.17	-2.59	59.51	39.29	-4.94	2.46
43/3	0.00	52.41	-8.73	5.04	4.11	0.00	44.44	31.83	4.81	22.34
43/4	0.00	44.32	59.28	5.63	-0.28	0.00	-5.22	-219.46	-12.24	12.85
43/5	-0.66	14.81	-14.34	-12.07	-19.96	-0.66	29.63	7.32	9.12	6.09
44/1	-5.88	69.08	66.07	11.49	1.57	-5.88	83.20	83.25	30.11	31.99

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_1					RPD_2				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
44/2	0.00	48.00	57.20	-21.29	4.70	0.00	-18.18	-32.32	-18.59	-10.97
44/3	0.00	31.30	3.41	1.00	0.17	0.00	13.48	14.20	2.22	4.10
44/4	-0.19	50.85	44.26	-10.98	6.12	-0.19	73.63	6.69	1.29	-6.34
44/5	0.00	0.00	0.00	3.20	7.16	0.00	0.00	-12.58	19.18	-4.52
45/1	-2.33	68.31	22.80	18.82	-13.37	-2.33	75.44	37.62	18.03	-37.51
45/2	-2.01	67.21	55.83	18.46	5.67	-2.01	67.21	55.83	18.65	3.29
45/3	0.00	22.99	-18.39	-1.67	0.33	0.00	55.81	43.73	8.03	1.08
45/4	0.00	15.73	-4.03	-2.43	5.70	0.00	32.17	-9.09	1.75	-2.24
45/5	0.00	40.31	27.60	4.01	-11.12	0.00	40.31	27.60	3.41	-11.65
$\overline{RPD}$	-1.34	36.59	18.87	-3.09	2.34	-1.34	33.24	17.78	-0.44	-3.16

Tabla B.15: Desviaciones porcentuales entre las soluciones ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ (RPD_1) y $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ (RPD_2), para los valores de sobrecarga (W) y la no-regularidad del mix de producción ($\Delta_Q(X)$), del trabajo requerido ($\Delta_Q(P)$), de la sobrecarga ($\Delta_Q(W)$) y del trabajo completado ($\Delta_Q(V)$).

P/E	RPD_3					RPD_6				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
1/1	0.00	-36.92	0.22	-1.91	-31.13	0.00	14.81	-51.52	8.57	-24.68
1/2	0.00	23.93	45.88	-10.22	-3.73	0.00	14.12	20.87	8.77	-2.57
1/3	0.00	23.76	-2.05	5.06	0.67	0.00	0.00	3.22	-1.91	1.27
1/4	0.00	31.86	-4.99	6.98	0.46	0.00	20.62	-1.65	2.92	-1.10
1/5	0.00	26.45	13.85	4.90	-2.15	0.00	0.00	0.32	7.29	-4.77
2/1	0.00	10.39	-113.97	1.49	-11.61	0.00	-24.62	-91.64	8.54	3.07
2/2	0.00	0.00	0.00	-0.97	-0.65	0.00	0.00	7.99	0.37	-2.21
2/3	0.00	0.00	-16.97	18.17	-0.22	0.00	-5.48	14.32	-5.51	-11.44
2/4	0.00	4.30	8.85	0.27	0.01	0.00	-5.48	-46.33	4.14	-0.79
2/5	0.00	19.86	12.61	3.25	-1.41	0.00	-5.48	-1.37	-0.16	-1.00
3/1	0.00	27.72	20.22	-4.61	4.75	0.00	0.00	67.14	2.49	-4.25
3/2	0.00	-21.92	-31.91	-7.06	-0.42	0.00	-5.80	5.82	7.47	-0.85
3/3	0.00	34.11	1.51	-14.24	0.73	0.00	-4.71	-48.87	2.43	0.77
3/4	0.00	38.92	4.44	16.57	-9.81	0.00	-28.87	-27.54	-34.07	-23.98
3/5	0.00	44.44	41.58	29.26	-0.30	0.00	0.00	2.52	-2.21	3.01
4/1	0.00	-20.62	-40.72	-46.07	-3.68	0.00	5.19	25.19	12.33	-2.96
4/2	0.00	36.88	59.39	20.86	2.65	0.00	0.00	0.00	5.10	5.04
4/3	0.00	28.37	41.65	4.22	-15.08	0.00	0.00	0.00	-6.91	-9.51
4/4	0.00	-22.36	-19.32	16.57	-30.31	0.00	-18.82	-38.24	49.55	-45.81

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_3					RPD_6				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
4/5	0.00	-186.30	-375.51	-32.07	-8.98	0.00	17.98	25.80	-27.54	-1.66
5/1	0.00	4.65	12.28	3.01	-1.04	0.00	19.35	24.25	5.69	-20.93
5/2	0.00	-38.10	-14.09	-19.19	-2.55	0.00	0.00	2.71	1.35	-0.76
5/3	0.00	41.60	-13.03	0.78	-2.23	0.00	-14.08	-21.14	13.51	-0.12
5/4	0.00	0.00	-51.97	3.68	0.16	0.00	0.00	2.78	10.36	1.55
5/5	0.00	0.00	0.00	2.18	2.66	0.00	0.00	6.38	1.23	0.12
6/1	0.00	-50.53	-56.10	14.92	-22.38	0.00	-2.15	8.68	-0.38	-3.73
6/2	0.00	0.00	0.68	-10.42	-11.25	0.00	0.00	0.00	-9.28	-8.50
6/3	0.00	0.00	0.00	0.79	-0.33	0.00	0.00	0.00	-0.80	-48.82
6/4	0.00	20.34	23.74	-0.23	-6.11	0.00	-33.80	6.50	-3.67	3.43
6/5	0.00	-35.96	-64.49	-3.25	-16.30	0.00	-11.59	-19.70	-19.53	-2.29
7/1	0.00	7.27	-10.36	-5.03	-23.11	0.00	-13.59	0.48	-1.24	17.84
7/2	0.00	36.89	27.31	16.40	-4.53	0.00	0.00	0.00	2.80	-15.47
7/3	0.00	-10.53	-13.76	0.26	-1.13	0.00	-6.06	-37.78	-4.56	-24.15
7/4	0.00	30.51	-21.00	-12.50	-16.28	0.00	-44.44	-14.52	-6.54	-15.82
7/5	0.00	11.21	25.65	-34.34	7.52	0.00	0.00	7.32	3.98	3.68
8/1	0.00	23.26	-79.82	6.76	-24.80	0.00	20.51	25.23	-0.60	1.89
8/2	0.00	6.54	12.86	2.47	4.38	0.00	0.00	0.00	4.05	-1.66
8/3	0.00	61.25	56.40	0.59	18.87	0.00	0.00	0.00	0.07	5.12
8/4	0.00	-47.62	-13.73	-0.19	-6.20	0.00	0.00	-0.60	0.00	-109.15
8/5	0.00	31.65	23.29	-18.57	-4.12	0.00	5.33	0.97	-0.74	-4.32
9/1	0.00	50.93	45.36	15.31	-1.19	0.00	0.00	51.41	-1.34	-2.59
9/2	0.00	29.91	12.22	17.49	6.26	0.00	-8.70	-4.46	-7.69	-4.15
9/3	0.00	-14.51	-5.60	-0.96	6.39	0.00	0.00	0.00	-0.77	2.22
9/4	0.00	4.94	-13.41	0.28	11.11	0.00	12.90	5.91	2.56	-13.34
9/5	0.00	0.00	0.00	-3.00	-28.93	0.00	5.48	19.02	7.14	-7.89
10/1	0.00	-86.57	-29.79	-22.95	1.95	0.00	10.67	15.05	4.31	-2.05
10/2	0.00	0.00	0.00	0.61	0.94	0.00	-5.19	-46.66	-1.39	-0.87
10/3	0.00	86.15	17.21	0.81	-3.37	0.00	4.94	46.07	-6.45	-1.66
10/4	0.00	30.74	-9.15	16.57	5.24	0.00	-16.47	-243.36	63.75	-152.08
10/5	0.00	0.00	0.00	0.12	0.93	0.00	0.00	0.00	2.57	-7.82
11/1	0.00	1.47	-12.01	1.83	-5.25	0.00	0.00	0.00	1.38	-2.43
11/2	0.00	0.00	0.00	1.15	0.52	0.00	16.09	18.61	-1.37	10.07
11/3	0.00	-61.68	-0.98	2.96	10.40	0.00	6.74	-2.10	0.60	3.86
11/4	0.00	38.42	-32.71	6.90	-8.52	0.00	6.74	-45.66	2.74	-5.46
11/5	0.00	0.00	0.00	-1.83	-2.09	0.00	0.00	0.00	-3.72	-5.19

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_3					RPD_6				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
12/1	0.00	32.19	23.80	33.74	-22.88	0.00	0.00	0.00	1.35	-2.62
12/2	0.00	0.00	0.00	1.35	7.04	0.00	0.00	0.00	0.94	-0.06
12/3	0.00	-4.18	15.07	4.65	3.53	0.00	4.40	-64.99	-3.45	-9.16
12/4	0.00	-53.80	22.51	11.24	-47.14	0.00	0.00	12.32	3.17	-34.95
12/5	0.00	0.00	0.00	0.25	-24.94	0.00	-23.19	-23.08	-8.44	-43.42
13/1	0.00	0.00	1.74	-0.86	21.35	0.00	-4.49	30.47	6.35	-6.92
13/2	0.00	-73.02	-84.22	15.37	5.09	0.00	0.00	0.00	1.11	-6.32
13/3	0.00	-10.17	24.21	1.21	-3.49	0.00	-10.99	59.85	2.59	17.60
13/4	0.00	52.14	9.36	-13.53	8.56	0.00	-4.71	-19.47	-3.12	-14.88
13/5	0.00	0.00	0.00	-0.37	-2.26	0.00	0.00	0.00	-7.45	-9.86
14/1	0.00	3.63	7.18	1.69	12.02	0.00	0.00	-2.64	7.37	-37.06
14/2	0.00	0.00	0.00	4.34	-3.28	0.00	-7.23	-4.14	4.60	-3.54
14/3	0.00	-2.96	15.10	2.25	7.82	0.00	-20.90	-14.23	0.53	2.69
14/4	0.00	13.57	-6.46	-1.41	-16.32	0.00	2.74	1.43	-9.76	7.83
14/5	0.00	0.00	0.00	0.73	0.11	0.00	0.00	0.00	-1.20	-1.97
15/1	0.00	-23.67	-37.13	0.13	-20.00	0.00	70.81	3.04	-3.56	-24.28
15/2	0.00	-48.19	-29.11	12.77	-8.24	0.00	0.00	0.00	2.49	-14.55
15/3	0.00	-38.40	27.12	5.24	0.26	0.00	6.45	-3.91	-0.94	-2.09
15/4	0.00	71.09	52.16	-28.42	12.60	0.00	-13.79	-12.41	13.58	-88.92
15/5	0.00	47.26	45.90	-13.59	27.05	0.00	0.00	3.67	-4.08	9.40
16/1	0.00	0.00	0.00	-0.15	-6.83	0.00	0.00	0.00	2.38	3.77
16/2	0.00	0.00	0.00	10.12	5.27	0.00	0.00	0.00	6.52	-3.92
16/3	0.00	-18.01	-29.24	-0.14	-2.00	0.00	0.00	0.00	-0.38	2.21
16/4	0.00	-43.48	-182.88	-34.18	-2.32	0.00	-3.20	31.02	-6.31	2.82
16/5	0.00	-121.91	-117.76	18.12	-50.36	0.00	0.00	0.00	2.84	2.33
17/1	0.00	2.17	0.15	0.75	-20.33	0.00	0.00	0.00	7.23	15.99
17/2	0.00	0.00	0.00	0.03	-5.59	0.00	0.00	-2.31	21.78	19.88
17/3	0.00	-30.00	23.02	4.74	5.55	0.00	0.00	20.57	4.11	1.28
17/4	0.00	-42.86	-0.94	-4.31	7.47	0.00	0.00	-2.68	-8.50	7.75
17/5	0.00	0.00	0.00	3.14	3.17	0.00	0.00	0.00	0.41	0.51
18/1	0.00	9.39	7.01	24.10	-34.00	0.00	0.00	0.00	-0.53	-10.33
18/2	0.00	0.00	0.00	1.13	1.11	0.00	0.00	0.00	1.41	-10.45
18/3	0.00	-46.72	-35.71	1.10	-18.96	0.00	0.00	11.16	-1.18	-0.43
18/4	0.00	51.99	-82.63	4.28	-22.53	0.00	31.68	31.46	3.12	-3.20
18/5	0.00	0.00	0.00	2.40	-0.67	0.00	0.00	7.62	14.89	8.74
19/1	0.00	0.00	0.00	-0.20	20.86	0.00	0.00	-5.63	6.76	9.21

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_3					RPD_6				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
19/2	0.00	0.00	0.00	4.29	4.03	0.00	0.00	0.00	-2.38	-7.11
19/3	0.00	-254.55	-88.43	17.55	-1.07	0.00	14.81	53.24	-4.61	4.97
19/4	0.00	-3.20	20.61	-2.99	5.44	0.00	-38.36	32.17	0.55	-7.34
19/5	0.00	4.94	-21.75	-17.92	-2.49	0.00	-5.19	17.86	10.64	-7.37
20/1	0.00	-59.48	-18.48	-31.63	-3.96	0.00	0.00	8.31	-8.32	4.57
20/2	0.00	19.80	17.18	-3.64	0.81	0.00	0.00	0.00	2.97	1.15
20/3	0.00	-60.95	30.90	7.00	8.29	0.00	0.00	-45.52	-0.31	2.69
20/4	0.00	29.27	18.08	7.19	-47.05	0.00	4.94	-78.77	-8.68	-32.96
20/5	0.00	0.00	0.00	-0.93	-6.00	0.00	0.00	0.00	-9.60	-76.41
21/1	0.00	26.14	43.93	-7.98	7.76	0.00	-17.39	-37.56	-0.34	-3.01
21/2	0.00	0.00	17.40	5.84	7.74	0.00	0.00	-13.40	1.84	-6.88
21/3	0.00	-102.26	12.97	7.25	-1.88	0.00	9.88	-33.36	8.18	-7.80
21/4	0.00	-4.94	-117.73	-31.53	-38.10	0.00	-43.84	-20.91	21.81	-46.30
21/5	0.00	2.26	13.49	6.78	7.07	0.00	-17.39	-16.88	-4.19	-9.13
22/1	0.00	44.44	25.33	-9.61	-4.88	0.00	-6.56	-29.28	1.88	-2.28
22/2	0.00	-65.98	-38.40	2.66	2.11	0.00	12.37	22.64	0.28	-2.64
22/3	0.00	73.90	36.70	6.61	-1.32	0.00	2.60	12.12	1.56	4.77
22/4	0.00	26.57	58.64	-116.30	64.40	0.00	-4.40	28.27	35.69	-100.38
22/5	0.00	-2.74	-0.64	-9.35	2.99	0.00	-10.96	-22.47	-24.28	-2.24
23/1	0.00	0.00	0.00	-0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.11	-0.34
23/2	0.00	6.19	-0.10	-4.96	-10.54	0.00	0.00	0.00	-0.20	-1.61
23/3	0.00	67.92	57.66	0.77	0.05	0.00	-14.49	0.92	6.54	3.48
23/4	0.00	80.99	80.94	-40.39	54.66	0.00	-30.99	-24.23	10.84	-59.82
23/5	0.00	-24.49	-20.02	1.66	-16.06	0.00	7.41	-4.60	-20.35	-6.22
24/1	0.00	26.55	16.55	-29.97	-12.27	0.00	17.72	10.98	13.79	-2.45
24/2	0.00	20.08	11.03	-8.64	-4.78	0.00	0.00	0.00	1.73	1.12
24/3	0.00	-108.91	-45.68	-3.69	6.67	0.00	5.80	18.83	-3.02	-4.76
24/4	0.00	33.19	39.60	-14.96	-32.68	0.00	25.74	44.07	-16.72	10.63
24/5	0.00	57.78	42.85	-66.68	1.90	0.00	-29.51	-38.23	-5.28	3.16
25/1	0.00	-5.91	-8.72	1.92	8.34	0.00	0.00	0.00	0.38	6.63
25/2	0.00	-31.33	-16.02	-17.88	-5.67	0.00	2.41	8.48	-11.33	-5.61
25/3	0.00	-28.07	24.54	-4.30	-1.64	0.00	9.88	15.43	8.20	-3.19
25/4	0.00	-64.52	19.51	-1.37	22.43	0.00	24.81	-279.58	24.63	-28.11
25/5	0.00	-14.16	-6.76	0.37	-7.83	0.00	23.76	14.52	4.25	-0.96
26/1	0.00	12.12	-30.11	4.92	1.05	0.00	24.10	19.61	11.95	-13.43
26/2	0.00	-48.10	-11.51	15.47	-9.58	0.00	-11.94	-19.90	-18.83	1.71

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_3					RPD_6				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
26/3	0.00	27.80	-0.81	0.45	-7.17	0.00	21.05	-2.68	-2.90	1.02
26/4	0.00	-91.33	-56.00	-5.26	15.16	0.00	-17.28	2.61	10.90	-38.82
26/5	0.00	-15.04	-0.79	3.30	-2.85	0.00	-30.99	-55.44	9.49	-1.52
27/1	0.00	0.00	0.00	1.92	1.95	0.00	0.00	21.21	-7.26	3.10
27/2	0.00	-17.98	-7.53	10.45	-5.67	0.00	0.00	0.00	4.20	-2.51
27/3	0.00	60.70	-2.98	-10.82	-5.56	0.00	0.00	0.00	0.90	3.38
27/4	0.00	-37.89	9.78	-11.63	12.89	0.00	-43.48	-2.33	-3.90	-30.30
27/5	0.00	0.00	0.00	2.06	-2.78	0.00	0.00	0.00	-0.80	2.26
28/1	0.00	-198.52	-47.76	-73.56	9.52	0.00	0.00	0.00	-3.44	-14.16
28/2	0.00	-33.01	-16.03	17.98	-1.46	0.00	0.00	0.00	4.13	-3.46
28/3	0.00	-7.27	13.53	4.32	3.11	0.00	0.00	0.00	0.48	-7.53
28/4	0.00	-72.56	-316.29	31.11	-44.13	0.00	-14.43	12.17	23.87	-124.97
28/5	0.00	2.47	-8.43	1.78	3.60	0.00	-5.06	1.47	-5.21	-11.42
29/1	0.00	0.00	0.00	-2.19	-3.19	0.00	-5.80	-3.34	2.91	-15.09
29/2	0.00	2.99	-8.47	-4.16	-9.34	0.00	0.00	0.00	-3.79	-4.67
29/3	0.00	81.44	54.51	-11.64	-10.08	0.00	-2.25	5.08	-0.42	-4.56
29/4	0.00	-26.57	-150.69	31.06	-54.81	0.00	-80.00	0.96	4.68	-63.43
29/5	0.00	48.82	29.87	-6.28	-4.23	0.00	9.76	7.66	-9.33	4.35
30/1	0.00	42.11	27.73	11.16	-5.95	0.00	-6.06	-4.49	-3.72	-8.57
30/2	0.00	10.22	6.67	-3.04	-9.50	0.00	-13.70	-5.45	-11.28	-8.44
30/3	0.00	17.94	24.61	-0.25	3.10	0.00	12.66	-9.43	-1.12	-0.77
30/4	0.00	16.46	-1.78	-7.01	-16.23	0.00	37.38	22.45	-3.43	5.97
30/5	0.00	-56.07	-79.47	-29.46	1.59	0.00	-50.75	-78.17	-27.83	-19.44
31/1	0.00	34.04	43.18	-3.29	-37.87	0.00	-12.35	-1.63	3.43	-19.33
31/2	0.00	-8.76	6.59	-19.66	-7.48	0.00	0.00	0.00	2.77	2.99
31/3	0.00	0.00	0.00	0.10	-1.71	0.00	0.00	0.00	0.87	-1.43
31/4	0.00	52.35	16.95	15.06	-1.64	0.00	0.00	-9.62	7.07	-23.24
31/5	0.00	19.05	21.99	15.63	2.11	0.00	19.05	21.99	15.99	0.55
32/1	0.00	-73.95	-18.11	-24.08	1.47	0.00	3.39	12.17	-1.31	-18.72
32/2	0.00	14.04	14.27	-1.24	13.35	0.00	-2.53	-6.06	0.82	3.13
32/3	0.00	43.87	-2.27	-7.45	-16.15	0.00	0.00	0.00	0.39	-4.21
32/4	0.00	11.72	21.14	-5.15	2.30	0.00	-67.69	-115.15	15.25	-19.21
32/5	0.00	-17.68	-54.79	-10.42	-3.26	0.00	-43.08	-44.96	-0.53	-5.23
33/1	0.00	9.02	-64.98	7.43	-7.81	0.00	9.92	31.04	-2.34	-10.05
33/2	0.00	0.00	0.00	2.22	-2.98	0.00	0.00	0.00	4.04	-0.77
33/3	0.00	1.27	-23.63	1.23	-6.38	0.00	-22.22	-2.01	1.33	4.62

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_3					RPD_6				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
33/4	0.00	56.03	-89.16	-3.83	5.09	0.00	6.61	-28.02	26.96	-59.12
33/5	0.00	0.00	0.00	0.37	-0.13	0.00	0.00	0.00	-2.02	-5.92
34/1	0.00	0.00	0.00	0.33	-18.67	0.00	0.00	0.00	-1.21	-3.46
34/2	0.00	0.00	0.00	0.16	3.72	0.00	0.00	0.00	0.09	-11.64
34/3	0.00	5.50	27.86	5.40	-0.74	0.00	-1.90	55.86	7.06	7.98
34/4	0.00	-152.58	-43.94	3.18	-23.66	0.00	-2.06	40.98	19.95	-64.95
34/5	0.00	29.89	20.21	-0.97	-11.85	0.00	0.00	0.00	8.07	11.29
35/1	0.00	58.76	42.69	20.76	-5.94	0.00	0.00	0.00	2.50	-10.68
35/2	0.00	-120.75	-109.72	10.86	8.95	0.00	0.00	0.00	3.31	3.40
35/3	0.00	-26.67	-46.96	-3.48	-10.51	0.00	0.00	0.00	0.27	-21.01
35/4	0.00	63.67	29.44	-1.03	-5.39	0.00	32.52	-4.74	8.12	-145.27
35/5	0.00	14.49	16.57	-9.60	-26.17	0.00	-46.38	-46.68	0.29	-26.81
36/1	0.00	13.68	-9.71	27.06	-63.58	0.00	-14.93	-47.09	4.46	-47.31
36/2	0.00	42.95	19.93	18.73	-0.68	0.00	0.00	0.00	-4.44	-6.69
36/3	0.00	14.20	41.75	1.97	8.14	0.00	-4.71	14.57	-0.72	-1.75
36/4	0.00	72.68	-3.62	4.31	-14.82	0.00	37.11	15.66	14.69	-74.56
36/5	0.00	51.57	63.94	13.61	14.21	0.00	10.53	15.98	7.10	0.12
37/1	0.00	28.80	25.55	4.33	-14.77	0.00	0.00	0.00	0.93	-22.25
37/2	0.00	0.00	0.00	-1.23	-0.95	0.00	0.00	0.00	1.35	-1.96
37/3	0.00	-65.90	15.04	1.94	-7.04	0.00	-8.25	11.69	2.20	0.57
37/4	0.00	-13.08	3.96	13.43	-80.39	0.00	-3.88	-0.04	-1.45	-12.14
37/5	0.00	-31.58	-14.09	1.19	2.88	0.00	0.00	0.00	-5.14	-4.23
38/1	0.00	0.00	0.00	-2.41	-2.56	0.00	-3.17	4.53	-7.40	-0.01
38/2	0.00	-52.41	-32.95	-16.14	-4.42	0.00	0.00	0.00	-0.37	-0.93
38/3	0.00	41.12	9.72	2.76	2.13	0.00	-3.28	4.86	2.61	1.91
38/4	0.00	45.63	-21.81	2.62	1.11	0.00	0.00	1.24	-0.50	-0.56
38/5	0.00	0.00	0.00	2.23	-10.08	0.00	19.28	25.22	5.40	-5.71
39/1	0.00	0.00	0.00	-0.49	-1.24	0.00	0.00	0.00	-0.55	-17.53
39/2	0.00	0.00	0.00	1.24	0.61	0.00	0.00	0.00	-3.61	-7.06
39/3	0.00	-73.42	-3.25	-8.55	-4.81	0.00	0.00	0.00	0.50	3.63
39/4	0.00	-150.52	-8.62	-4.80	-1.37	0.00	-32.00	4.26	-7.38	4.77
39/5	0.00	0.00	0.00	1.80	0.89	0.00	0.00	0.00	-0.87	-1.24
40/1	0.00	7.33	18.97	-55.04	25.12	0.00	-2.02	5.93	-3.22	-10.47
40/2	0.00	0.00	0.00	2.57	-14.04	0.00	0.00	0.00	2.59	-7.58
40/3	0.00	-38.66	-61.33	-8.39	-21.31	0.00	-1.94	-26.05	-6.31	-36.17
40/4	0.00	-7.09	30.53	0.04	-1.99	0.00	-27.59	-29.30	4.96	-5.35

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_3					RPD_6				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
40/5	0.00	-14.40	-19.79	-4.91	-9.71	0.00	0.00	0.00	-1.29	-0.88
41/1	0.00	30.06	27.87	-8.89	1.90	0.00	0.00	0.00	5.27	-28.63
41/2	0.00	0.00	0.00	3.01	-1.01	0.00	22.54	12.55	-0.29	-16.11
41/3	0.00	0.00	0.00	1.07	-19.93	0.00	-2.06	-10.08	-2.48	-36.99
41/4	0.00	-14.40	-33.73	8.62	2.42	0.00	3.54	-0.21	4.45	-20.19
41/5	0.00	0.00	0.00	-1.31	-20.80	0.00	0.00	0.00	-4.25	-61.57
42/1	0.00	0.00	0.00	0.00	-3.97	0.00	-3.48	5.40	12.63	-1.87
42/2	0.00	13.11	4.52	13.21	-4.49	0.00	13.11	4.52	12.29	-8.37
42/3	0.00	-58.59	-49.02	9.82	-3.79	0.00	0.00	0.00	1.26	8.59
42/4	0.00	4.33	-1.53	25.83	-24.57	0.00	-52.31	-62.77	5.68	-9.02
42/5	0.00	-45.78	-25.76	-23.31	8.06	0.00	0.00	0.00	1.23	1.49
43/1	0.00	-40.52	-99.57	10.84	-8.49	0.00	14.74	9.03	-5.29	1.91
43/2	0.00	-27.33	-16.51	4.24	-6.95	0.00	0.00	0.00	0.62	-4.50
43/3	0.00	6.90	-47.16	1.12	-7.02	0.00	-8.70	7.74	0.88	13.33
43/4	0.00	37.84	63.80	10.42	-18.69	0.00	-17.48	-184.01	-6.55	-3.15
43/5	0.00	0.00	0.00	-6.24	-27.85	0.00	17.39	18.94	13.84	-0.09
44/1	0.00	-55.42	-105.13	-14.42	-54.00	0.00	15.58	-1.26	9.65	-6.40
44/2	0.00	56.00	67.97	-9.14	11.46	0.00	0.00	0.99	-6.72	-3.11
44/3	0.00	22.61	-15.18	3.89	1.99	0.00	2.53	-2.31	5.08	5.85
44/4	0.00	-116.38	-0.97	-3.88	-0.17	0.00	-16.09	-69.02	7.60	-13.46
44/5	0.00	0.00	11.18	-17.44	8.66	0.00	0.00	0.00	1.95	-2.82
45/1	0.00	-62.55	-70.76	1.67	-24.42	0.00	-25.97	-37.99	0.70	-50.92
45/2	0.00	0.00	0.00	1.43	-0.69	0.00	0.00	0.00	1.66	-3.24
45/3	0.00	-147.13	-9.69	-11.52	4.45	0.00	-41.79	47.86	-0.88	5.17
45/4	0.00	-60.67	1.67	-4.31	3.50	0.00	-29.33	-3.11	-0.05	-4.62
45/5	0.00	0.00	0.00	2.43	2.39	0.00	0.00	0.00	1.81	1.92
$\overline{RPD}$	0.00	-5.36	-7.45	-1.49	-4.68	0.00	-2.44	-4.78	1.53	-10.64

Tabla B.16: Desviaciones porcentuales entre las soluciones ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ (RPD_3) y $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$ (RPD_6), para los valores de sobrecarga (W) y la no-regularidad del mix de producción ($\Delta_Q(X)$), del trabajo requerido ($\Delta_Q(P)$), de la sobrecarga ($\Delta_Q(W)$) y del trabajo completado ($\Delta_Q(V)$).

P/E	RPD_4					RPD_5				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
1/1	0.00	-9.88	-24.07	10.69	-28.23	0.00	-6.15	-21.86	-4.32	-27.49
1/2	0.00	-4.71	16.31	11.11	-5.89	0.00	37.61	48.83	-13.12	-0.48

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_4					RPD_5				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
1/3	0.00	-11.59	-68.79	4.03	0.38	0.00	31.68	41.48	-0.81	1.55
1/4	0.00	20.62	-7.76	4.57	-0.13	0.00	31.86	0.97	5.37	-0.50
1/5	0.00	-21.92	-8.88	-0.64	-4.51	0.00	39.67	21.13	12.39	-2.41
2/1	0.00	-6.15	-18.74	10.92	-0.41	0.00	-5.19	-245.32	-1.15	-7.74
2/2	0.00	-15.58	-28.07	3.40	-1.64	0.00	13.48	28.15	-4.14	-1.21
2/3	0.00	-54.79	-38.73	5.96	-4.55	0.00	31.86	27.76	8.19	-6.82
2/4	0.00	-21.92	6.25	-3.14	1.56	0.00	17.20	-42.27	7.32	-2.37
2/5	0.72	-54.79	-48.07	1.00	0.40	-0.72	45.39	40.18	2.11	-2.83
3/1	0.00	9.88	65.96	1.38	-1.52	0.00	19.80	23.00	-3.43	2.19
3/2	0.00	-28.99	-30.52	-8.97	-4.33	0.00	0.00	4.82	9.09	2.93
3/3	0.00	0.00	-5.98	4.99	3.97	0.00	31.01	-38.34	-17.32	-2.58
3/4	0.00	-16.49	-24.05	-34.07	-28.70	0.00	32.43	1.75	16.57	-5.79
3/5	0.00	-43.84	-57.36	6.83	-2.03	0.00	61.38	63.81	22.40	4.65
4/1	0.00	-51.95	-97.78	-18.48	-0.43	0.00	24.74	46.77	-8.08	-6.29
4/2	0.00	-15.58	1.80	10.48	4.54	0.00	45.39	58.64	16.11	3.16
4/3	0.00	-24.69	-30.12	-11.21	-16.53	0.00	42.55	55.16	7.91	-8.14
4/4	0.00	-131.76	-89.21	40.47	-77.77	0.00	37.27	12.82	29.29	-6.88
4/5	0.00	-134.83	-221.10	-39.85	-2.91	0.00	0.00	-9.88	-20.44	-7.66
5/1	4.17	-32.26	-95.19	-6.91	-8.31	-4.35	41.86	65.96	14.44	-12.82
5/2	3.38	-110.14	-69.60	-12.52	-2.80	-3.50	34.29	34.55	-4.50	-0.52
5/3	0.00	-2.82	8.36	11.32	2.12	0.00	35.20	-49.42	3.23	-4.57
5/4	0.00	-27.69	-9.98	5.31	1.23	0.00	21.69	-34.33	8.81	0.49
5/5	1.77	-301.45	-172.18	18.76	1.85	-1.80	75.09	65.60	-18.93	0.95
6/1	0.00	-53.76	-76.10	11.65	-22.64	0.00	0.00	19.05	3.33	-3.51
6/2	0.00	0.00	0.68	-6.94	-8.01	0.00	0.00	0.00	-12.84	-11.75
6/3	0.00	0.00	0.00	-0.47	-11.70	0.00	0.00	0.00	0.47	-33.68
6/4	0.00	-98.59	-13.89	1.06	21.21	0.00	46.33	37.39	-5.01	-30.06
6/5	0.00	-75.36	-108.76	-19.82	-17.74	0.00	13.48	5.69	-2.99	-1.04
7/1	12.50	-48.54	-0.16	-31.31	-21.58	-14.29	29.09	-9.66	19.02	16.80
7/2	0.00	0.00	0.00	1.33	-17.03	0.00	36.89	27.31	17.64	-3.13
7/3	0.00	-6.06	-37.78	-3.38	-15.67	0.00	-10.53	-13.76	-0.88	-8.54
7/4	0.00	-51.85	-22.68	-5.24	-27.39	0.00	33.90	-12.95	-13.89	-5.72
7/5	0.00	-50.79	-16.56	-21.78	0.20	0.00	41.12	40.88	-5.92	10.74
8/1	0.00	15.38	34.90	-5.33	-3.76	0.00	27.91	-106.52	10.95	-18.01
8/2	1.00	-44.44	-54.30	3.38	5.12	-1.01	35.29	43.52	3.15	-2.46
8/3	0.00	-6.06	-16.03	-6.39	6.52	0.00	63.47	62.42	6.63	17.66

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_4					RPD_5				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
8/4	0.00	-56.57	-13.37	4.53	-14.42	0.00	5.71	-0.92	-4.95	-94.12
8/5	0.00	-26.67	-27.29	5.47	0.93	0.00	48.92	40.32	-26.35	-9.64
9/1	0.00	2.47	40.95	2.40	-5.10	0.00	49.69	55.03	12.06	1.24
9/2	0.00	-8.70	-10.25	-5.54	-0.52	0.00	29.91	16.83	15.81	2.87
9/3	1.28	-202.74	-204.45	0.15	3.38	-1.29	62.18	65.31	-1.89	5.26
9/4	0.00	17.20	-1.89	10.36	-11.43	0.00	0.00	-4.73	-8.39	9.60
9/5	1.13	-49.32	0.79	15.21	-7.34	-1.14	36.70	18.37	-12.80	-29.59
10/1	0.00	-66.67	-10.26	-20.35	0.29	0.00	0.00	0.00	2.25	-0.36
10/2	0.00	-23.38	-106.62	21.97	-1.05	0.00	14.74	29.02	-29.13	1.12
10/3	0.00	-66.67	-7.89	-2.08	-2.03	0.00	92.10	58.62	-3.44	-3.00
10/4	0.00	-308.24	-251.02	38.91	-128.96	0.00	80.24	-6.77	50.50	-4.33
10/5	10.64	-73.68	-101.79	32.05	-26.57	-11.90	42.42	50.44	-43.21	15.60
11/1	7.50	-498.51	-321.33	-19.56	-5.87	-8.11	83.54	73.41	19.03	-1.83
11/2	3.65	-39.08	-7.01	0.04	14.61	-3.79	39.67	23.94	-0.24	-4.77
11/3	4.02	-94.38	-19.09	7.52	3.40	-4.19	22.43	13.43	-4.30	10.83
11/4	0.00	-40.45	-72.73	-5.43	8.86	0.00	59.11	-11.91	14.11	-25.58
11/5	2.42	-52.46	-51.79	-23.96	-1.56	-2.48	34.41	34.12	14.80	-5.74
12/1	7.50	-209.64	-40.25	30.12	-32.35	-8.11	78.10	45.67	6.46	4.72
12/2	0.88	-30.11	-2.29	-1.17	0.46	-0.89	23.14	2.24	3.40	6.57
12/3	0.90	-228.57	-148.70	4.29	-25.93	-0.90	69.69	43.66	-3.06	16.37
12/4	0.00	-216.87	-9.46	13.27	-20.48	0.00	51.46	37.93	0.90	-64.81
12/5	0.00	-23.19	-23.08	-5.98	-42.27	0.00	0.00	0.00	-2.06	-25.96
13/1	12.12	-615.73	-122.48	-50.71	6.30	-13.79	85.40	69.29	37.33	10.25
13/2	0.00	-37.97	-56.04	19.53	6.51	0.00	-25.40	-18.06	-4.01	-7.93
13/3	0.96	-114.29	-16.27	1.09	-11.53	-0.97	42.94	73.82	2.70	23.54
13/4	0.00	-44.71	-12.61	2.58	3.73	0.00	65.37	3.85	-20.18	-9.11
13/5	0.00	0.00	0.00	-4.68	-9.97	0.00	0.00	0.00	-3.03	-2.15
14/1	8.16	-424.69	-203.87	-6.83	-7.34	-8.89	81.63	68.65	14.77	-12.34
14/2	0.65	-19.28	-15.45	13.09	-10.82	-0.65	10.10	9.80	-5.00	3.51
14/3	2.53	-107.46	-48.87	6.18	-5.35	-2.60	40.00	34.85	-3.64	14.85
14/4	0.00	-161.64	-12.78	-4.07	-28.83	0.00	67.87	6.95	-6.94	16.79
14/5	2.83	-104.48	-109.11	22.74	-9.57	-2.91	51.09	52.18	-30.03	7.04
15/1	9.09	-200.00	-178.85	-29.62	27.22	-10.00	87.97	52.32	20.20	-104.90
15/2	0.00	-73.24	-67.41	12.93	-4.96	0.00	14.46	22.88	2.30	-18.14
15/3	0.00	-86.02	-0.40	4.24	-3.30	0.00	30.40	24.57	0.11	1.42
15/4	0.00	-55.17	34.27	0.97	-22.25	0.00	78.80	18.19	-12.08	-35.07

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_4					RPD_5				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
15/5	0.00	-62.34	-57.94	11.68	-23.30	0.00	67.51	67.00	-33.86	46.39
16/1	11.11	-516.55	-79.64	-16.96	-3.94	-12.50	83.78	44.33	16.40	1.10
16/2	0.00	0.00	0.00	2.23	-2.04	0.00	0.00	0.00	14.06	3.52
16/3	0.00	-112.82	-63.04	0.59	-3.61	0.00	44.55	20.73	-1.11	3.73
16/4	0.00	-84.80	-110.10	-39.28	7.64	0.00	19.88	7.13	-2.43	-7.66
16/5	0.00	-121.91	-117.76	17.01	-51.66	0.00	0.00	0.00	4.14	3.16
17/1	7.50	-800.00	-199.44	-33.70	0.70	-8.11	89.13	66.65	31.13	-1.80
17/2	0.00	0.00	-2.31	19.27	12.76	0.00	0.00	0.00	3.14	3.03
17/3	0.90	-160.00	0.73	7.46	-4.97	-0.91	50.00	38.40	1.29	11.17
17/4	0.00	-100.00	-25.68	-5.52	9.83	0.00	28.57	17.53	-7.26	5.33
17/5	0.00	0.00	0.00	-4.29	-2.98	0.00	0.00	0.00	7.51	6.45
18/1	2.17	-179.71	-51.95	15.51	-34.53	-2.22	67.61	38.80	9.68	-9.89
18/2	4.90	-268.49	-225.80	-16.29	-2.47	-5.15	72.86	69.31	16.18	-6.59
18/3	0.87	-91.43	-36.38	0.36	-13.50	-0.87	23.36	11.61	-0.43	-5.26
18/4	0.00	-31.68	-61.96	6.92	-10.00	0.00	75.09	22.72	0.37	-14.96
18/5	1.25	-98.55	-57.03	0.42	-6.82	-1.27	49.64	41.17	16.59	13.99
19/1	5.71	-258.06	-82.93	-19.34	28.06	-6.06	72.07	42.25	21.72	0.13
19/2	0.00	0.00	0.00	-1.50	-0.62	0.00	0.00	0.00	3.46	-2.16
19/3	5.24	-429.63	32.32	19.17	10.57	-5.53	42.98	-30.20	-6.70	-7.40
19/4	0.00	-76.71	8.20	6.42	-0.52	0.00	19.20	41.34	-9.45	-0.97
19/5	0.00	0.00	0.00	-4.71	-6.82	0.00	0.00	0.00	-0.63	-3.03
20/1	11.43	-521.74	-84.83	-14.54	5.96	-12.90	74.35	41.23	-24.48	-5.49
20/2	0.00	19.80	17.18	7.50	11.85	0.00	0.00	0.00	-8.71	-11.23
20/3	0.00	-60.95	8.57	4.85	8.86	0.00	0.00	-9.98	1.95	2.08
20/4	0.00	-79.01	-40.45	-1.14	-33.44	0.00	62.44	-4.27	0.28	-46.53
20/5	0.00	0.00	0.00	-5.61	-10.94	0.00	0.00	0.00	-4.74	-68.56
21/1	1.75	-63.77	-41.97	-12.08	-5.03	-1.79	47.06	45.67	3.33	9.53
21/2	0.00	0.00	6.32	6.62	5.95	0.00	0.00	0.00	1.02	-4.85
21/3	0.00	-232.10	-58.99	5.33	-13.48	0.00	45.11	27.00	10.05	3.22
21/4	0.00	-482.19	-255.10	-30.25	-69.10	0.00	74.07	25.87	21.04	-19.48
21/5	0.93	-150.72	-128.39	27.58	-42.64	-0.94	54.24	55.73	-34.12	28.90
22/1	0.00	9.84	-1.11	0.05	-7.17	0.00	34.34	4.53	-7.61	-0.10
22/2	0.00	-65.98	-38.40	2.00	1.04	0.00	12.37	22.64	0.95	-1.54
22/3	0.00	15.58	42.60	-2.06	0.77	0.00	69.88	3.10	9.92	2.76
22/4	0.00	-15.38	21.54	6.59	29.20	0.00	33.57	62.19	-48.92	-0.74
22/5	0.00	-2.74	-0.64	-10.39	1.99	0.00	-10.96	-22.47	-23.11	-1.20

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_4					RPD_5				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
23/1	1.79	-116.92	-3.90	-21.51	8.57	-1.82	53.90	3.76	15.26	-9.75
23/2	0.00	-4.60	-16.04	-4.87	-11.69	0.00	10.31	13.73	-0.29	-0.56
23/3	0.00	-98.55	19.52	4.72	1.98	0.00	81.50	47.87	2.67	1.57
23/4	0.00	-73.24	0.34	0.00	13.04	0.00	85.63	76.24	-25.16	16.68
23/5	0.00	-125.93	-131.58	16.74	-68.35	0.00	48.98	45.79	-42.15	26.77
24/1	0.00	-5.06	1.78	6.97	-4.80	0.00	42.48	24.37	-20.44	-9.75
24/2	1.44	-119.54	-118.81	15.64	7.23	-1.46	63.60	59.34	-26.55	-11.68
24/3	0.38	-205.80	-36.95	-5.44	-0.13	-0.39	35.64	13.66	-1.30	2.36
24/4	0.00	-55.45	15.91	-11.44	-14.53	0.00	68.09	59.83	-20.41	-3.53
24/5	0.00	-55.74	-80.63	-14.01	-8.99	0.00	64.89	56.26	-53.92	12.84
25/1	0.00	-147.13	-32.96	-23.97	16.57	0.00	57.14	18.24	21.19	-2.58
25/2	0.00	-31.33	-16.02	-18.46	-6.68	0.00	2.41	8.48	-10.78	-4.61
25/3	0.00	-170.37	-5.90	-0.87	3.00	0.00	57.31	39.74	5.09	-8.13
25/4	0.00	-18.60	-36.64	-4.77	32.17	0.00	-4.30	-123.60	27.07	-46.52
25/5	2.83	-27.72	-29.56	30.84	2.50	-2.91	31.86	29.56	-37.93	-11.66
26/1	0.00	-4.82	-15.17	-0.05	-2.64	0.00	36.36	9.18	16.32	-9.35
26/2	0.00	-74.63	-37.78	10.47	-7.90	0.00	5.06	2.96	-12.19	0.18
26/3	0.82	-69.47	-58.29	0.78	-3.65	-0.82	66.37	34.60	-3.25	-2.34
26/4	0.00	-308.64	-112.97	-0.65	12.62	0.00	45.09	28.66	6.81	-34.77
26/5	0.65	-115.49	-102.40	20.90	1.10	-0.66	30.08	22.59	-10.66	-5.57
27/1	3.33	-353.62	-106.30	-15.98	7.84	-3.45	77.96	61.81	9.29	-3.09
27/2	0.00	-23.53	-30.52	0.21	-5.41	0.00	4.49	17.62	14.02	-2.77
27/3	0.00	-34.67	-33.46	-5.00	-0.54	0.00	70.82	22.84	-4.60	-1.45
27/4	0.00	-89.86	-3.25	-10.61	14.27	0.00	-4.21	10.58	-4.85	-32.41
27/5	4.86	-104.48	-87.80	8.86	-9.83	-5.11	51.09	46.75	-8.32	8.53
28/1	0.00	-269.72	-68.18	-48.23	-8.64	0.00	19.26	12.14	-21.12	4.92
28/2	0.00	-21.24	-31.60	8.48	-0.78	0.00	-9.71	11.83	14.08	-4.16
28/3	0.38	-78.79	-31.38	-0.45	3.71	-0.38	40.00	34.19	5.21	-8.20
28/4	0.00	-282.47	-448.06	50.30	-285.06	0.00	48.37	33.29	-5.52	15.80
28/5	0.00	0.00	-15.01	-14.16	-4.43	0.00	-2.47	7.11	9.48	-2.86
29/1	5.88	-197.10	-57.05	15.96	10.90	-6.25	64.39	34.20	-18.06	-33.29
29/2	0.00	10.96	-6.40	-7.40	-9.91	0.00	-8.96	-1.95	-0.65	-4.14
29/3	0.00	-4.49	-22.14	-6.80	-1.07	0.00	81.84	64.65	-4.97	-13.88
29/4	0.00	-178.46	-644.03	46.43	-139.70	0.00	18.18	66.63	-22.66	-5.55
29/5	0.00	47.15	46.65	-21.53	8.87	0.00	12.60	-21.40	4.39	-9.40
30/1	0.00	-22.22	-68.54	-20.57	-13.53	0.00	49.76	55.19	23.58	-1.32

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_4					RPD_5				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
30/2	0.56	-68.49	-39.65	8.94	-6.42	-0.56	39.42	29.53	-25.91	-11.58
30/3	1.38	-212.66	-38.27	6.69	-2.82	-1.40	77.08	40.33	-8.64	5.03
30/4	0.00	-89.72	23.75	-11.97	-7.11	0.00	72.43	-3.51	1.14	-2.03
30/5	1.27	-149.25	-154.67	-38.78	-14.03	-1.29	5.61	-25.55	-19.24	-3.08
31/1	1.89	-14.81	-31.80	-0.28	-37.26	-1.92	35.46	56.18	0.52	-19.86
31/2	1.92	-53.61	-33.51	0.31	-11.21	-1.96	29.20	30.04	-16.71	6.24
31/3	2.39	-50.53	-26.42	4.61	-7.77	-2.45	33.57	20.90	-3.81	4.27
31/4	0.00	2.74	1.05	5.76	-7.27	0.00	51.01	8.00	16.24	-16.77
31/5	0.00	19.05	21.99	18.62	5.39	0.00	19.05	21.99	12.90	-2.90
32/1	1.85	-250.85	-43.94	-13.30	9.31	-1.89	52.10	27.93	-10.95	-29.00
32/2	1.58	-210.13	-121.10	26.18	9.75	-1.60	71.58	58.87	-36.02	7.00
32/3	3.29	4.40	56.27	-0.30	-13.65	-3.40	41.29	-133.84	-6.71	-6.51
32/4	0.00	-224.62	-3.92	5.15	-9.72	0.00	54.39	-63.27	6.05	-6.15
32/5	0.56	-227.69	-354.54	13.62	-12.16	-0.57	48.62	50.63	-28.50	3.13
33/1	0.00	0.00	0.00	2.61	-14.87	0.00	18.05	-13.78	2.72	-3.28
33/2	4.40	-314.94	-237.43	-1.70	3.68	-4.60	75.90	70.36	7.74	-7.74
33/3	2.41	-56.57	-87.67	6.95	-16.60	-2.47	22.93	32.80	-4.74	12.98
33/4	0.00	6.61	-24.53	-3.03	1.09	0.00	56.03	-94.45	26.39	-52.67
33/5	1.16	-38.36	-28.64	-0.24	1.87	-1.17	27.72	22.27	-1.40	-8.09
34/1	3.85	-331.76	-83.56	-52.91	-10.56	-4.00	76.84	45.52	34.03	-11.05
34/2	3.42	-154.10	-91.39	30.06	0.15	-3.55	60.65	47.75	-42.61	-7.64
34/3	0.00	1.90	54.02	5.65	0.80	0.00	1.83	30.75	6.82	6.55
34/4	0.00	-152.58	-21.73	11.20	-58.41	0.00	-2.06	30.21	12.71	-28.77
34/5	0.00	29.89	20.21	8.69	1.22	0.00	0.00	0.00	-1.65	-0.45
35/1	2.38	-128.36	-16.35	18.28	-6.42	-2.44	81.94	50.74	5.47	-10.18
35/2	0.00	-91.80	-83.84	9.52	11.48	0.00	-15.09	-14.08	4.74	0.64
35/3	0.00	-29.13	7.35	-1.21	-19.95	0.00	1.90	-58.61	-1.97	-11.49
35/4	0.00	14.63	-101.07	14.59	-74.37	0.00	71.28	63.24	-8.68	-48.24
35/5	0.00	14.49	13.34	-0.89	-33.42	0.00	-46.38	-41.21	-8.32	-19.92
36/1	0.00	-50.75	-68.66	25.07	-25.50	0.00	34.19	4.32	7.01	-92.01
36/2	0.65	-7.59	-8.14	2.63	-3.61	-0.66	46.98	25.96	12.83	-3.67
36/3	1.51	-70.59	-31.08	4.32	-6.02	-1.53	47.34	62.04	-3.19	11.83
36/4	0.00	-6.19	19.38	14.18	-58.49	0.00	83.82	-8.39	4.88	-26.47
36/5	0.00	18.95	25.25	6.09	-0.10	0.00	46.54	59.47	14.54	14.41
37/1	0.00	-28.99	-17.25	0.32	-15.86	0.00	44.80	36.50	4.92	-21.11
37/2	1.69	-49.32	-50.16	11.40	4.10	-1.72	33.03	33.40	-12.71	-7.33

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_4					RPD_5				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
37/3	0.84	-195.88	-43.67	3.21	-11.43	-0.85	39.31	47.78	0.91	4.49
37/4	0.00	-17.48	1.66	-2.96	-76.04	0.00	0.00	2.29	14.70	-14.91
37/5	0.00	15.73	40.80	24.32	2.38	0.00	-56.14	-92.72	-37.28	-3.70
38/1	6.52	-174.60	-55.18	-2.10	28.17	-6.98	62.43	38.48	-7.73	-42.79
38/2	6.77	-202.74	-85.99	4.42	10.50	-7.26	49.66	28.52	-21.96	-17.76
38/3	0.00	-3.28	4.86	1.50	0.76	0.00	41.12	9.72	3.86	3.26
38/4	0.20	-157.33	-80.50	8.86	-6.25	-0.20	78.87	33.35	-7.39	6.41
38/5	2.63	-33.73	-11.01	22.83	-10.74	-2.70	39.64	32.64	-19.86	-5.08
39/1	2.08	-116.92	-11.16	-19.67	9.86	-2.13	53.90	10.04	15.57	-32.00
39/2	7.18	-80.00	-34.68	4.25	-4.87	-7.74	44.44	25.75	-6.87	-1.46
39/3	0.00	-35.64	-40.96	-3.03	0.52	0.00	-27.85	26.75	-4.82	-1.54
39/4	0.00	-224.00	18.28	-3.19	-1.27	0.00	-2.06	-27.25	-9.06	4.67
39/5	0.00	-24.00	-19.04	-10.89	3.45	0.00	19.35	16.00	10.67	-3.93
40/1	8.33	-78.79	-48.85	0.86	9.01	-9.09	47.12	48.78	-61.43	9.09
40/2	0.00	0.00	0.00	3.91	-6.36	0.00	0.00	0.00	1.23	-15.35
40/3	0.00	-60.19	-67.33	-8.58	-43.99	0.00	11.76	-21.52	-6.13	-14.73
40/4	0.00	-73.56	-5.45	8.35	-10.77	0.00	21.28	14.82	-3.66	3.01
40/5	4.63	-36.19	-17.32	-10.09	3.29	-4.85	16.00	-2.11	3.47	-14.44
41/1	0.00	-17.48	-18.48	10.75	-32.82	0.00	40.46	39.12	-15.57	5.00
41/2	5.15	-25.35	-20.59	6.97	8.35	-5.43	38.20	27.48	-4.57	-27.96
41/3	0.00	-2.06	-10.08	-1.98	-14.10	0.00	0.00	0.00	0.59	-44.00
41/4	0.00	-26.55	-23.98	7.86	-25.82	0.00	12.80	-8.10	5.24	6.80
41/5	1.83	-148.24	-60.41	-1.50	-50.37	-1.87	59.72	37.66	-4.05	-29.79
42/1	8.33	-262.61	-196.68	-74.92	-58.74	-9.09	71.46	68.11	50.05	33.28
42/2	0.00	13.11	4.52	10.67	-10.23	0.00	13.11	4.52	14.78	-2.73
42/3	0.00	-103.90	-49.98	12.48	-2.48	0.00	22.22	0.64	-1.73	7.42
42/4	0.00	-375.38	-117.13	12.39	-17.80	0.00	69.35	23.89	20.15	-15.28
42/5	0.00	-98.36	-56.17	-8.36	5.42	0.00	26.51	19.48	-12.40	4.24
43/1	0.00	-126.32	-119.92	-18.58	-6.66	0.00	47.06	17.45	20.83	0.23
43/2	2.52	-146.99	-64.72	5.30	-7.13	-2.59	48.45	29.27	-0.49	-4.32
43/3	0.00	-95.65	-35.35	-4.13	-11.60	0.00	48.28	-0.32	5.88	16.90
43/4	0.00	-11.65	11.10	5.07	-18.36	0.00	34.59	-15.64	-0.55	-3.44
43/5	0.66	-17.39	12.54	5.20	-6.58	-0.66	29.63	7.32	3.44	-20.06
44/1	5.56	-402.60	-504.53	-29.28	-56.45	-5.88	73.90	65.64	20.03	-4.73
44/2	0.00	15.38	25.17	10.02	7.09	0.00	48.00	57.62	-29.43	1.74
44/3	0.00	-12.66	-19.24	2.92	1.82	0.00	33.04	1.18	6.03	6.01

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_4					RPD_5				
	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$	W	$\Delta_Q(X)$	$\Delta_Q(P)$	$\Delta_Q(W)$	$\Delta_Q(V)$
44/4	0.19	-340.23	-81.14	6.40	-6.70	-0.19	42.94	5.79	-2.55	-6.52
44/5	0.00	0.00	11.18	-21.32	1.62	0.00	0.00	0.00	5.09	4.54
45/1	2.27	-412.99	-121.19	-21.13	-9.75	-2.33	60.08	-6.53	19.39	-71.09
45/2	1.97	-204.94	-126.40	-20.89	-6.75	-2.01	67.21	55.83	19.81	2.61
45/3	0.00	-220.90	7.34	-9.68	4.13	0.00	-9.20	38.27	-2.57	5.48
45/4	0.00	-90.67	5.48	-1.83	-2.32	0.00	-8.99	-7.27	-2.48	1.34
45/5	0.00	-67.53	-38.13	-1.65	12.15	0.00	40.31	27.60	5.75	-8.99
$\overline{RPD}$	1.25	-97.51	-49.98	-0.04	-9.61	-1.34	35.81	18.47	-0.88	-6.25

Tabla B.17: Desviaciones porcentuales entre las soluciones ofrecidas por $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3$ (RPD_4) y $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3_pmr$ (RPD_5), para los valores de sobrecarga (W) y la no-regularidad del mix de producción ($\Delta_Q(X)$), del trabajo requerido ($\Delta_Q(P)$), de la sobrecarga ($\Delta_Q(W)$) y del trabajo completado ($\Delta_Q(V)$).

Una vez presentados los resultados dados por los modelos $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$ para las 225 instancias de datos de la literatura (Bautista y Cano, 2008) y los cálculos realizados para su evaluación frente a sus modelos de referencia ($M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$), se presentan, a continuación, los resultados de los mismos modelos para el caso de estudio NISSAN-9ENG.

Tablas B.18 y B.19

Recogen las desviaciones porcentuales relativas entre los modelos con y sin regularidad para el caso Nissan y para cada una de las funciones utilizadas ($f \in \Im_0 = \{W, \Delta_Q(P), \Delta_Q(V), \Delta_Q(W), \Delta_Q(X)\}$).

A modo de resumen las desviaciones porcentuales calculadas son:

RPD_1 **y** RPD_2 : Comparación de cada modelo con regularidad respecto a su correspondiente modelo de referencia ($M3 \cup 4_pmr$ frente a $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3_pmr$ frente a $M4 \cup 3$).

RPD_3 **y** RPD_6 : Comparación de modelos con instantes relativos respecto a los modelos con instantes absolutos ($M4 \cup 3_pmr$ frente a $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3$ frente a $M3 \cup 4$).

RPD_4 **y** RPD_5 : Comparación entre $M4 \cup 3$ y $M3 \cup 4_pmr$; y entre $M4 \cup 3_pmr$ y $M3 \cup 4$.

Tabla B.20

En esta tabla se comparan los valores de sobrecarga obtenidos, a partir de los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, por los distintos solucionadores utilizados (Cplex vs Gurobi). Además, se calculan los siguientes indicadores:

$RPD_{3\cup4}$: Desviación porcentual de la sobrecarga dada con el modelo $M3 \cup 4$ en Gurobi con respecto a la sobrecarga obtenida con el mismo modelo en Cplex.

$RPD_{4\cup3}$: Desviación porcentual de la sobrecarga dada con el modelo $M4 \cup 3$ en Gurobi, con respecto a la sobrecarga obtenida con el mismo modelo en Cplex.

RPD_{CvsG} : Comparación entre las soluciones obtenidas por el mejor solucionador para cada modelo. En este caso se mide la ganancia o pérdida de $M4 \cup 3$ en Gurobi, respecto a la solución de $M3 \cup 4$ en Cplex.

Ejemplar	$\Delta_Q(X)$						$\Delta_Q(P)$					
(ϵ)	RPD_1	RPD_2	RPD_3	RPD_4	RPD_5	RPD_6	RPD_1	RPD_2	RPD_3	RPD_4	RPD_5	RPD_6
#1	95.45	97.73	-100.43	-4306.46	95.45	0.00	92.66	96.40	-103.76	-2675.40	92.66	0.02
#2	94.34	92.19	28.92	-1155.86	94.45	1.87	91.73	89.70	22.34	-839.07	92.00	3.26
#3	93.22	91.48	21.00	-1065.06	93.27	0.76	91.62	89.24	26.46	-777.20	92.09	5.66
#4	96.60	94.59	34.84	-1814.07	96.48	-3.55	94.85	92.35	26.86	-1319.85	94.41	-8.59
#5	91.22	98.77	-550.30	-7307.83	91.98	8.63	87.83	97.67	-355.28	-3640.79	89.41	12.96
#6	93.11	95.78	-74.49	-2430.69	92.63	-6.88	91.37	94.26	-52.40	-1665.44	91.25	-1.33
#7	97.68	94.57	59.16	-1657.73	97.78	4.64	96.47	91.12	68.27	-798.58	97.18	20.17
#8	92.70	94.25	7.04	-1172.62	94.65	26.82	91.02	94.25	-57.78	-1656.29	90.92	-1.07
#9	87.63	96.46	-238.33	-2634.32	88.03	3.26	84.40	94.61	-162.38	-1581.38	85.85	9.32
#10	88.78	89.59	-5.77	-842.74	88.99	1.87	81.11	87.04	-19.96	-534.94	84.45	17.68
#11	94.65	96.06	-37.76	-2476.08	94.57	-1.50	93.07	95.25	-34.97	-1846.96	93.59	7.52
#12	97.17	97.28	-1.78	-3490.94	97.23	2.42	93.50	96.26	-40.42	-2061.05	94.75	19.28
#13	94.62	96.95	-71.44	-3083.94	94.77	2.94	91.62	95.59	-63.05	-1845.68	92.81	14.20
#14	95.22	96.03	-13.30	-2268.13	95.51	6.08	93.84	94.35	-0.62	-1532.94	94.32	7.81
#15	94.58	96.47	-53.10	-2723.90	94.59	0.25	91.65	94.58	-47.48	-1666.51	92.01	4.25
#16	92.32	92.56	2.56	-1168.28	92.75	5.67	89.20	90.42	-3.87	-862.00	90.05	7.83
#17	89.90	92.34	-32.32	-1209.71	89.87	-0.29	83.92	88.91	-42.58	-786.89	84.19	1.65
#18	93.97	94.56	-13.68	-1784.42	93.82	-2.51	92.66	92.08	7.63	-1157.65	92.68	0.37
#19	91.40	95.06	-82.45	-2022.05	90.99	-4.79	88.69	94.96	-142.35	-2041.87	87.79	-7.90
#20	92.12	96.44	-101.92	-2463.15	92.81	8.71	91.11	96.31	-109.13	-2253.62	92.29	13.23
#21	93.29	88.88	40.46	-787.54	93.38	1.30	92.15	86.39	40.49	-658.42	91.90	-3.21
#22	96.55	94.27	41.26	-1603.07	96.63	2.37	91.93	90.16	34.57	-710.39	93.56	20.29
#23	38.06	92.44	9.85	-45.54	93.19	89.00	89.98	86.55	31.61	-582.85	90.80	8.16
$\overline{RPD}$	91.07	94.55	-49.22	-2152.79	93.64	6.39	90.71	92.54	-42.51	-1456.34	91.35	6.59

Tabla B.18: Desviaciones porcentuales de la no-regularidad de la producción ($\Delta_Q(X)$) y del trabajo requerido ($\Delta_Q(P)$) generado por las secuencias de $M3\cup4$ y $M3\cup4_pmr$ (RPD_1), por $M4\cup3$ y $M4\cup3_pmr$ (RPD_2), por $M3\cup4$ y $M4\cup3$ (RPD_3), por $M3\cup4_pmr$ y $M4\cup3$ (RPD_4), por $M3\cup4$ y $M4\cup3_pmr$ (RPD_5) y por $M3\cup4_pmr$ y $M4\cup3_pmr$ (RPD_6), correspondientes a los 23 ejemplares del conjunto NISSAN-9ENG.

Ejemplar	$\Delta_Q(W)$						$\Delta_Q(V)$					
(ϵ)	RPD_1	RPD_2	RPD_3	RPD_4	RPD_5	RPD_6	RPD_1	RPD_2	RPD_3	RPD_4	RPD_5	RPD_6
#1	-4.07	7.91	33.46	36.07	38.73	41.12	54.41	81.57	-43.31	-214.36	73.59	42.06
#2	-31.28	-24.02	32.85	48.85	16.72	36.56	18.68	18.53	26.09	9.12	39.79	25.96
#3	3.09	11.95	6.08	3.09	17.30	14.66	19.21	14.91	8.54	-13.20	22.17	3.67
#4	-15.86	4.97	37.29	45.88	40.41	48.57	31.20	42.85	31.13	-0.10	60.64	42.79
#5	-2.57	-6.74	26.64	28.48	21.69	23.66	1.69	32.93	-28.49	-30.70	13.83	12.34
#6	-10.34	-26.97	33.11	39.38	15.07	23.03	5.13	22.54	1.74	-3.57	23.89	19.77
#7	13.63	2.92	19.33	6.60	21.69	9.32	19.19	7.38	13.46	-7.08	19.85	0.83
#8	-96.65	-34.65	62.81	81.09	49.92	74.53	-15.14	73.86	-29.70	-12.65	66.10	70.56
#9	3.88	-2.33	17.60	14.27	15.68	12.27	10.16	7.85	7.96	-2.45	15.19	5.60
#10	5.70	1.61	1.11	-4.86	2.71	-3.17	2.78	1.66	-2.07	-4.98	-0.37	-3.24
#11	-17.92	-266.70	82.47	85.13	35.71	45.48	71.35	84.98	-16.54	-306.74	82.50	38.91
#12	-9.13	2.75	42.34	47.16	43.92	48.62	30.06	55.05	-17.89	-68.56	47.01	24.24
#13	-50.85	-23.60	37.79	58.76	23.11	49.03	-7.23	55.88	-15.94	-8.12	48.84	52.29
#14	-4.93	-2.77	15.23	19.21	12.89	16.98	36.10	33.98	13.05	-36.09	42.59	10.15
#15	-30.10	6.21	8.07	29.34	13.79	33.73	19.34	27.38	0.76	-23.03	27.94	10.66
#16	0.71	-17.65	42.09	41.67	31.86	31.37	49.00	43.14	33.24	-30.90	62.04	25.57
#17	-26.24	-2.72	21.34	37.69	19.20	36.00	-1.83	13.27	0.45	2.24	13.66	15.21
#18	-15.50	-3.47	14.17	25.69	11.19	23.11	9.99	8.43	18.69	9.66	25.54	17.28
#19	3.37	0.38	-1.16	-4.69	-0.78	-4.29	5.34	7.96	-7.11	-13.15	1.41	-4.15
#20	-26.99	-41.39	71.01	77.17	59.00	67.72	28.27	79.92	-50.75	-110.17	69.73	57.79
#21	7.95	-3.47	25.97	19.58	23.40	16.78	21.02	4.66	22.86	2.33	26.46	6.88
#22	1.46	-3.96	10.19	8.85	6.63	5.25	6.57	4.39	1.80	-5.10	6.11	-0.49
#23	-12.67	18.67	39.59	46.39	50.87	56.40	57.47	48.07	24.11	-78.45	60.60	7.34
$\overline{RPD}$	-13.71	-17.52	29.54	34.38	24.81	30.73	20.56	33.53	-0.34	-41.13	36.92	20.96

Tabla B.19: Desviaciones porcentuales, de la no-regularidad de la sobrecarga de trabajo ($\Delta_Q(W)$) y del trabajo completado ($\Delta_Q(V)$), entre las soluciones ofrecidas por $M3 \cup 4$ y $M3 \cup 4_pmr$ (RPD_1), por $M4 \cup 3$ y $M4 \cup 3_pmr$ (RPD_2), por $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ (RPD_3), por $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3$ (RPD_4), por $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3_pmr$ (RPD_5) y por $M3 \cup 4_pmr$ y $M4 \cup 3_pmr$ (RPD_6), correspondientes a los 23 ejemplares del conjunto NISSAN-9ENG.

Ejemplar	$W_{3\cup4}$		$W_{4\cup3}$		$RPD_{3\cup4}$	$RPD_{4\cup3}$	RPD_{CvsG}
($\#\epsilon$)	CPLEX	Gurobi	CPLEX	Gurobi			
$\#1$	255	251	228	187	1.57	17.98	26.67
$\#2$	409	444	384	341	-8.56	11.20	16.63
$\#3$	449	477	425	427	-6.24	-0.47	4.90
$\#4$	379	402	381	310	-6.07	18.64	18.21
$\#5$	702	754	654	633	-7.41	3.21	9.83
$\#6$	541	525	477	413	2.96	13.42	23.66
$\#7$	743	818	728	742	-10.09	-1.92	0.13
$\#8$	175	228	197	139	-30.29	29.44	20.57
$\#9$	805	824	782	732	-2.36	6.39	9.07
$\#10$	1208	1208	1208	1208	0.00	0.00	0.00
$\#11$	140	165	139	78	-17.86	43.88	44.29
$\#12$	314	406	326	284	-29.30	12.88	9.55
$\#13$	353	383	384	286	-8.50	25.52	18.98
$\#14$	452	500	442	420	-10.62	4.98	7.08
$\#15$	497	506	452	433	-1.81	4.20	12.88
$\#16$	270	321	279	227	-18.89	18.64	15.93
$\#17$	548	550	511	478	-0.36	6.46	12.77
$\#18$	700	673	678	605	3.86	10.77	13.57
$\#19$	945	949	945	945	-0.42	0.00	0.00
$\#20$	167	233	182	139	-39.52	23.63	16.77
$\#21$	635	652	660	560	-2.68	15.15	11.81
$\#22$	984	1006	985	987	-2.24	-0.20	-0.30
$\#23$	140	188	133	140	-34.29	-5.26	0.00
				$\overline{RPD}$	-9.96	11.24	12.74

Tabla B.20: Sobrecarga obtenida con los modelos $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$ en CPLEX y Gurobi y desviaciones porcentuales relativas entre las soluciones de $M3 \cup 4_{CPLEX}$ y $M3 \cup 4_{Gurobi}$ ($RPD_{3\cup4}$), de $M4 \cup 3_{CPLEX}$ y $M4 \cup 3_{Gurobi}$ ($RPD_{4\cup3}$) y entre las de $M3 \cup 4_{CPLEX}$ y $M4 \cup 3_{Gurobi}$ (RPD_{CvsG}).

Finalmente, en las siguientes tablas se recogen los cálculos y resultados de la evaluación del modelo $M4'_RWR$ mediante los 225 ejemplares de la literatura Bautista y Cano, 2008.

Tabla B.21

En esta tabla se recogen los tiempos de CPU utilizados por Gurobi, para alcanzar los óptimos de todos los ejemplares de datos (225) para cada uno de los valores asignados al parámetro de ponderación de funciones (β), con el modelo $M4'_RWR$. Dichos valores se presentan por programa de producción y por estructura de tiempos de proceso a la que pertenece cada ejemplar (*P/E*).

Además, al final de la tabla se muestran los tiempos mínimos, máximos y medios que tarda el modelo en resolver el conjunto de datos en función de β.

Tiempos de CPU ($M4'_RWR$)

P/E	β							P/E	β						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
1/1	1.23	2.34	2.24	1.66	1.76	1.71	0.93	***12/1***	230.43	533.86	371.92	85.04	79.62	41.90	14.19
1/2	2.02	2.60	1.70	1.74	1.88	1.54	0.81	***12/2***	35.14	80.14	61.90	56.23	57.19	52.78	11.87
1/3	1.40	2.09	1.95	1.66	1.25	1.19	0.95	***12/3***	241.19	283.85	382.00	362.27	309.15	125.37	15.24
1/4	1.18	1.72	1.25	1.56	1.40	1.51	0.78	***12/4***	118.68	1062.80	685.78	503.97	328.09	579.80	28.53
1/5	1.67	4.73	3.03	4.43	2.94	1.99	1.34	***12/5***	55.03	120.19	67.89	52.35	35.54	31.34	11.32
2/1	1.21	3.77	2.51	2.05	1.91	1.68	0.67	***13/1***	60.91	303.91	87.19	87.38	58.68	44.64	7.79
2/2	0.05	1.96	1.88	2.08	2.01	1.89	1.14	***13/2***	41.44	80.42	65.93	59.34	53.21	58.29	24.43
2/3	1.95	2.66	2.70	2.53	2.69	2.02	0.88	***13/3***	188.79	235.31	141.66	237.73	180.29	94.87	16.33
2/4	1.01	1.73	1.58	1.76	1.69	1.68	1.07	***13/4***	1036.21	2079.24	2578.40	1962.75	1035.33	630.03	30.61
2/5	1.89	14.83	5.37	5.22	4.97	4.56	1.53	***13/5***	65.52	151.75	110.79	74.33	75.77	53.98	16.09
3/1	2.43	15.19	3.31	2.26	2.17	1.40	0.64	***14/1***	334.96	630.13	368.59	220.93	184.43	92.02	11.56
3/2	1.10	3.40	1.71	1.77	1.20	1.15	1.14	***14/2***	109.80	141.05	69.09	73.70	46.87	55.59	18.06
3/3	2.41	3.17	1.90	1.95	1.54	1.23	0.69	***14/3***	212.17	742.09	678.07	601.92	457.78	128.39	19.45
3/4	0.33	1.35	1.22	1.18	1.27	1.15	0.60	***14/4***	254.38	3175.01	1017.64	1369.73	1095.92	180.84	16.40
3/5	2.80	3.32	1.99	1.74	1.53	1.26	0.88	***14/5***	23.33	69.95	80.54	75.00	46.93	42.97	18.62
4/1	0.02	1.64	1.35	1.37	1.44	1.09	0.68	***15/1***	103.55	211.10	121.16	120.38	109.33	57.20	12.99
4/2	1.43	2.24	2.01	2.20	1.93	1.61	0.75	***15/2***	42.24	55.94	64.32	45.85	44.43	36.04	16.82
4/3	3.27	4.11	3.36	2.47	2.60	1.72	0.87	***15/3***	16.28	74.52	257.56	82.58	73.41	29.78	12.25
4/4	0.36	1.10	1.16	1.03	1.18	1.02	0.55	***15/4***	62.14	238.23	213.95	113.22	106.52	50.53	16.10
4/5	2.25	3.53	1.64	1.37	1.23	1.28	0.76	***15/5***	48.87	94.09	92.53	88.98	92.36	62.85	15.75
5/1	16.44	39.82	39.30	28.78	29.32	24.81	8.69	***16/1***	31.63	87.65	70.93	55.41	44.60	39.49	8.05
5/2	3.42	19.66	24.82	18.16	19.72	24.40	10.55	***16/2***	23.61	25.31	27.84	24.27	30.77	26.94	9.03
5/3	16.17	22.91	24.63	17.26	16.83	15.27	12.01	***16/3***	16.00	94.21	199.24	72.84	56.12	34.60	8.97
5/4	0.55	16.97	19.55	18.58	21.20	25.47	13.15	***16/4***	13.01	136.54	77.24	36.81	36.53	39.04	7.08
5/5	5.82	19.68	18.73	21.20	20.06	22.04	9.94	***16/5***	12.32	34.74	31.21	36.43	33.81	26.31	8.43
6/1	5.32	40.84	26.55	23.50	24.88	17.19	9.08	***17/1***	322.76	428.70	339.73	300.37	266.15	73.29	9.60
6/2	8.67	23.59	22.66	24.71	29.95	24.37	11.58	***17/2***	65.07	115.12	83.50	100.27	63.82	46.74	19.49
6/3	27.74	63.35	39.85	39.27	38.12	24.45	1.39	***17/3***	188.30	359.22	766.01	870.16	501.40	107.54	19.25
6/4	20.18	117.42	56.76	91.07	57.30	41.42	8.77	***17/4***	27.67	3395.39	1083.93	1773.38	635.41	604.18	16.55
6/5	13.40	33.58	29.98	27.99	30.41	22.27	8.59	***17/5***	21.52	36.09	54.71	33.63	37.79	38.87	15.50
7/1	5.05	4.61	5.50	15.95	17.62	6.39	1.88	***18/1***	67.34	296.28	102.37	63.68	72.51	39.04	13.30
7/2	10.60	38.57	36.43	29.72	28.56	23.75	12.36	***18/2***	12.44	44.22	32.04	29.14	29.39	30.73	14.20
7/3	19.83	29.34	39.63	34.62	31.13	21.84	8.47	***18/3***	19.06	99.26	96.75	63.25	43.75	38.57	11.48
7/4	132.98	266.83	227.90	205.91	119.36	74.97	10.01	***18/4***	69.92	507.98	318.38	368.23	251.56	86.06	19.07
7/5	28.88	55.17	32.52	27.18	24.90	23.51	9.81	***18/5***	22.27	211.42	91.39	60.21	41.85	27.28	13.08
8/1	64.15	131.48	92.44	60.41	44.18	37.11	1.91	***19/1***	25.96	53.78	37.91	36.51	36.71	28.44	10.16
8/2	13.08	39.19	28.68	23.26	24.48	22.21	10.24	***19/2***	14.82	30.39	35.54	39.64	27.40	26.40	11.92
8/3	16.54	127.65	64.29	45.92	41.46	18.00	6.97	***19/3***	23.31	84.23	52.42	41.90	48.12	26.47	13.59
8/4	26.90	202.71	82.25	55.71	58.34	41.02	8.92	***19/4***	144.31	666.97	612.53	459.64	391.51	158.69	14.28
8/5	14.94	41.15	29.12	30.65	25.49	23.52	9.96	***19/5***	46.52	116.15	76.32	60.50	38.10	35.19	11.64
9/1	8.66	25.07	29.05	18.61	19.41	14.46	7.99	***20/1***	16.61	53.82	49.45	41.84	41.25	25.62	10.53
9/2	6.94	25.99	20.44	18.84	21.18	21.66	9.82	***20/2***	23.43	48.86	46.12	63.51	52.15	39.02	14.75
9/3	24.12	53.03	45.65	42.51	31.61	29.01	11.34	***20/3***	27.51	60.76	42.27	38.00	31.79	25.38	9.72
9/4	178.90	438.13	199.65	276.31	113.52	78.09	14.98	***20/4***	7.39	112.44	46.45	47.70	33.50	26.23	9.96
9/5	13.74	50.43	39.49	30.24	29.25	20.64	10.19	***20/5***	23.31	80.63	55.18	31.49	39.86	30.03	13.82
10/1	3.13	21.32	8.41	16.81	16.83	14.23	9.28	***21/1***	46.01	74.88	49.65	44.61	35.76	25.77	15.46
10/2	2.07	19.20	22.89	16.28	20.57	16.95	9.88	***21/2***	45.97	106.97	82.60	49.30	48.32	26.26	9.68
10/3	5.77	18.21	33.61	24.62	17.73	12.58	7.30	***21/3***	14.31	72.49	135.63	85.07	58.65	30.74	13.42
10/4	0.35	12.94	73.64	10.77	11.15	16.55	1.50	***21/4***	10.22	113.26	78.15	22.54	29.54	28.91	11.35
10/5	4.68	22.33	26.97	29.94	23.68	24.76	10.22	***21/5***	70.45	93.97	81.87	67.32	50.16	33.33	9.63
11/1	150.31	421.87	205.22	158.43	100.70	73.05	12.44	***22/1***	0.05	6.96	15.29	15.18	6.30	3.70	11.44
11/2	17.03	44.56	29.13	36.28	31.25	44.90	14.98	***22/2***	15.81	59.50	39.83	39.52	27.81	20.48	12.42
11/3	46.06	290.66	113.19	140.90	91.30	70.84	17.31	***22/3***	4.96	66.45	49.14	43.45	27.46	21.36	12.77
11/4	1750.64	3737.33	2229.02	1722.68	571.52	180.03	25.08	***22/4***	3.76	97.41	101.39	26.88	24.90	22.88	9.08
11/5	14.90	35.31	33.88	35.45	35.27	30.30	15.22	***22/5***	24.96	62.94	34.48	28.59	24.95	22.59	11.89

Sigue en la página siguiente.

Tiempos de CPU (*M4'_RWR*)

P/E	β							*P/E*	β						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
23/1	19.48	35.67	27.08	27.82	27.57	18.24	8.28	***34/1***	19.75	32.49	9.47	6.35	8.13	8.89	8.92
23/2	17.85	53.71	48.10	43.69	30.91	18.06	9.40	***34/2***	20.48	63.37	40.56	35.25	31.75	26.70	9.12
23/3	5.43	64.56	38.15	81.28	24.03	20.34	12.67	***34/3***	14.43	31.70	41.33	47.21	36.66	27.23	9.50
23/4	5.70	19.19	30.25	27.72	24.03	18.24	9.16	***34/4***	6.74	131.00	56.47	47.10	37.48	29.59	9.01
23/5	24.33	54.06	52.21	46.47	39.07	25.21	11.69	***34/5***	30.81	57.97	41.33	38.64	26.63	21.19	11.85
24/1	1.04	6.40	7.00	4.45	6.49	15.17	8.26	***35/1***	25.79	56.55	48.33	41.94	46.78	25.52	11.82
24/2	25.99	55.42	44.34	41.60	35.40	27.65	11.70	***35/2***	25.50	57.91	41.54	31.41	26.01	21.37	10.57
24/3	18.95	144.89	222.55	179.65	72.80	37.81	11.42	***35/3***	14.10	45.35	39.14	31.41	33.83	28.12	11.08
24/4	4.86	118.44	69.81	68.72	35.50	32.39	11.56	***35/4***	5.22	77.22	44.42	49.74	48.09	30.02	7.66
24/5	33.11	76.01	54.91	42.78	30.29	19.87	10.78	***35/5***	20.09	36.13	34.39	19.73	18.34	21.50	9.64
25/1	99.95	233.94	131.14	115.87	83.25	46.81	10.27	***36/1***	13.01	28.13	27.35	24.06	22.89	21.30	8.41
25/2	31.62	98.30	46.21	32.28	30.68	24.73	12.67	***36/2***	15.46	44.20	41.61	40.73	41.62	32.29	9.64
25/3	13.50	87.86	97.51	88.97	59.66	25.08	17.42	***36/3***	53.76	184.95	116.66	82.83	91.38	54.90	11.78
25/4	5.12	96.51	60.15	23.19	39.89	26.82	10.92	***36/4***	183.42	1598.01	1065.04	754.28	594.55	439.23	17.07
25/5	18.88	58.45	44.44	38.70	29.38	21.60	10.76	***36/5***	150.48	105.44	72.65	38.07	32.17	27.21	10.36
26/1	26.87	46.54	29.01	25.57	25.75	18.70	10.70	***37/1***	47.43	147.42	90.53	49.78	60.04	39.70	11.89
26/2	45.42	91.44	42.92	39.10	29.02	26.36	11.72	***37/2***	12.71	26.62	37.42	33.20	30.21	30.05	11.12
26/3	49.16	118.39	80.29	100.41	65.50	34.13	11.75	***37/3***	148.47	111.05	92.59	82.29	69.98	44.85	11.54
26/4	80.16	219.16	301.49	105.20	100.13	56.41	13.59	***37/4***	18.36	900.94	474.10	279.64	264.19	81.44	11.45
26/5	100.09	198.23	84.30	56.40	38.55	22.99	11.96	***37/5***	23.22	70.84	43.21	42.68	33.89	22.15	11.09
27/1	67.20	137.46	107.16	82.58	48.96	35.16	10.52	***38/1***	40.36	59.83	41.20	36.55	31.77	27.32	10.13
27/2	64.32	130.40	87.19	47.67	48.12	30.30	10.67	***38/2***	3.09	27.98	23.23	23.33	22.51	24.93	9.17
27/3	27.88	392.30	270.00	64.86	77.87	46.42	11.34	***38/3***	6.99	27.96	38.12	37.72	29.52	25.08	14.09
27/4	64.48	228.13	119.11	95.72	84.68	55.54	14.27	***38/4***	28.05	31.10	27.39	54.65	125.85	32.95	18.11
27/5	37.34	61.08	62.02	56.23	45.71	27.93	12.11	***38/5***	17.62	32.07	33.07	32.91	26.80	25.67	9.83
28/1	9.43	29.81	25.69	19.32	13.83	17.10	6.38	***39/1***	26.79	101.53	46.17	33.62	32.14	23.87	9.66
28/2	17.80	37.41	36.42	30.81	26.68	20.82	8.81	***39/2***	6.53	25.35	30.00	20.23	24.10	25.92	12.24
28/3	54.25	54.25	30.21	26.18	23.73	20.85	12.36	***39/3***	19.73	26.00	42.18	27.97	24.11	23.24	11.65
28/4	5.45	93.45	107.65	85.60	26.15	21.31	3.49	***39/4***	83.17	127.71	34.33	61.37	36.39	40.77	13.26
28/5	24.23	38.93	33.31	23.35	20.10	20.94	11.70	***39/5***	25.09	72.45	39.49	44.06	40.15	24.82	10.35
29/1	9.83	53.21	46.03	33.91	31.06	22.20	9.33	***40/1***	11.48	27.25	40.41	33.70	26.86	32.20	9.68
29/2	14.35	32.53	24.92	23.37	19.56	22.31	8.50	***40/2***	17.09	40.62	33.66	32.20	31.90	29.98	10.78
29/3	5.52	54.49	23.29	24.33	25.11	15.38	12.10	***40/3***	35.66	47.94	59.37	45.22	44.41	37.06	7.23
29/4	4.90	101.43	109.20	25.60	21.12	23.13	9.14	***40/4***	31.23	250.61	202.37	157.76	147.33	87.19	14.85
29/5	14.68	40.88	43.16	32.51	27.91	19.89	12.69	***40/5***	65.76	92.17	63.67	53.07	43.35	37.40	11.57
30/1	15.43	31.26	30.00	20.96	20.83	12.78	1.65	***41/1***	12.19	41.98	27.13	24.41	25.16	21.76	12.48
30/2	23.54	62.31	43.81	36.36	30.15	27.44	13.74	***41/2***	21.40	53.64	44.26	44.70	40.41	33.74	12.98
30/3	131.36	150.97	188.11	139.31	110.51	67.16	14.08	***41/3***	29.58	72.97	38.65	43.23	50.31	26.28	9.15
30/4	794.04	1624.07	1063.76	700.54	733.68	257.10	17.22	***41/4***	29.80	257.79	109.80	68.07	72.02	70.96	11.19
30/5	35.55	120.04	81.22	74.89	65.79	26.04	11.03	***41/5***	45.59	71.54	41.94	45.93	31.94	22.80	13.97
31/1	127.02	147.74	111.84	80.45	61.32	31.87	10.97	***42/1***	27.47	73.95	56.44	48.31	41.18	33.16	10.59
31/2	18.24	30.85	25.76	23.80	23.04	19.61	13.07	***42/2***	9.73	27.04	22.68	21.06	20.47	19.39	9.13
31/3	62.05	161.94	126.30	73.52	63.76	32.63	8.92	***42/3***	20.07	46.12	59.26	58.21	33.17	27.77	13.70
31/4	258.94	348.33	316.24	338.37	374.00	182.81	13.48	***42/4***	158.73	592.35	665.02	405.58	369.88	96.10	17.56
31/5	22.18	69.49	33.31	30.90	36.72	27.89	10.46	***42/5***	42.05	93.66	56.82	32.71	38.75	29.01	10.79
32/1	10.63	31.22	34.06	30.67	31.56	23.90	9.89	***43/1***	106.97	121.38	62.99	41.70	27.61	21.75	9.16
32/2	18.55	48.44	33.76	23.23	26.17	23.27	10.77	***43/2***	8.92	26.78	24.35	25.34	19.91	17.99	10.95
32/3	39.62	138.94	92.09	59.48	52.10	32.05	10.49	***43/3***	41.64	52.34	59.35	42.15	48.16	39.33	7.95
32/4	233.89	471.52	459.59	397.68	294.23	80.81	14.03	***43/4***	119.53	784.26	642.02	184.56	225.67	79.92	11.82
32/5	56.96	95.59	59.83	54.58	47.13	25.71	9.21	***43/5***	46.10	116.61	37.00	40.30	27.20	18.03	10.52
33/1	73.64	117.34	108.20	62.72	61.41	34.53	10.51	***44/1***	34.58	126.74	69.14	52.84	43.64	23.95	9.64
33/2	21.82	54.35	32.32	44.63	42.07	27.41	10.71	***44/2***	8.50	20.83	20.64	18.55	22.90	27.61	11.39
33/3	39.45	92.58	79.56	97.69	56.67	44.99	12.46	***44/3***	6.22	24.98	30.92	31.25	21.87	23.46	14.13
33/4	170.16	581.22	462.80	397.47	313.23	114.29	12.79	***44/4***	58.00	180.04	336.90	80.86	107.20	56.06	24.42
33/5	46.95	117.33	31.83	57.71	37.46	28.74	12.21	***44/5***	17.35	31.36	24.60	27.03	24.53	23.50	10.73

Sigue en la página siguiente.

Tiempos de CPU ($M4'_RWR$)														
P/E	β							Valores globales						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0							
45/1	21.06	60.31	66.67	76.13	39.77	26.46	9.59							
45/2	10.94	21.79	25.83	26.56	21.67	25.70	9.56	CPU_{min}	0.02	1.10	1.16	1.03	1.18	1.02	0.55
45/3	17.49	27.80	27.20	26.75	24.93	20.36	10.17	CPU_{max}	1750.64	3737.33	2578.40	1962.75	1095.92	630.03	30.61
45/4	59.55	30.26	71.29	31.61	38.86	36.46	9.06	$\overline{CPU}$	57.68	180.58	127.25	104.47	76.08	44.50	10.76
45/5	15.71	91.37	36.88	25.91	41.55	21.19	11.92								

Tabla B.21: Tiempos de CPU (s) utilizados por el modelo $M4'_RWR$ para obtener los óptimos de las 225 instancias de la literatura, agrupados por programa de producción y estructuras de tiempos (*P/E*), en función del coeficiente de ponderación β.

Tabla B.22

A continuación, en la tabla B.22 se presentan los resultados, en cuanto a sobrecarga de trabajo, obtenidos con el modelo $M4'_RWR$, para el conjunto de datos de la literatura (225 ejemplares) y los diferentes valores del coeficiente de ponderación β.

A modo de recordatorio, la función objetivo del modelo $M4'_RWR$ es:

$$\text{mín}\,\Phi(\beta) = \beta \cdot W + (1-\beta)\Delta_P = \beta \left[\sum_{k=1}^{|K|}\left(b_k \sum_{t=1}^{T} w_{k,t}\right)\right] + (1-\beta)\left[\sum_{k=1}^{|K|}\sum_{t=1}^{T}\left(\delta_{k,t}^{+} + \delta_{k,t}^{-}\right)\right]$$

W ($M4'_RWR$)															
P/E	β							*P/E*	β						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
1/1	40	40	40	41	41	41	43	***4/1***	143	143	143	143	143	143	143
1/2	230	230	230	230	235	235	235	***4/2***	324	324	324	324	324	336	346
1/3	369	369	369	369	369	369	369	***4/3***	313	313	313	313	313	315	315
1/4	710	710	710	710	710	710	715	***4/4***	80	80	80	80	80	80	80
1/5	211	211	211	211	211	211	223	***4/5***	212	212	212	212	212	212	212
2/1	100	100	100	100	100	100	103	***5/1***	46	47	47	47	47	47	56
2/2	282	282	282	282	282	286	297	***5/2***	200	207	207	207	210	217	236
2/3	339	339	339	339	339	339	339	***5/3***	345	345	345	345	345	345	350
2/4	638	638	638	638	638	643	643	***5/4***	674	674	674	674	674	674	679
2/5	276	276	278	278	278	278	285	***5/5***	222	223	223	226	226	226	241
3/1	81	81	81	81	81	81	81	***6/1***	46	47	47	47	47	49	53
3/2	270	270	270	270	270	270	270	***6/2***	100	100	100	100	100	108	132
3/3	421	421	421	421	421	421	421	***6/3***	227	227	227	227	227	227	244
3/4	80	80	80	80	80	80	80	***6/4***	338	338	338	338	338	338	338
3/5	166	166	166	166	166	166	166	***6/5***	136	137	137	137	137	137	144

Sigue en la página siguiente.

W ($M4'_RWR$)																
P/E	β							*P/E*	β						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
7/1	14	14	14	14	14	19	21	***15/1***	40	41	41	44	45	45	56
7/2	151	151	151	151	152	152	187	***15/2***	147	147	147	147	147	148	176
7/3	185	185	185	185	185	200	200	***15/3***	239	240	250	250	253	256	262
7/4	338	338	338	338	338	338	343	***15/4***	240	240	240	240	240	240	240
7/5	143	143	146	146	146	146	160	***15/5***	70	70	75	75	80	100	119
8/1	61	61	62	62	62	63	71	***16/1***	32	34	37	37	37	45	52
8/2	199	203	204	204	204	210	212	***16/2***	117	117	118	118	118	129	159
8/3	279	279	287	287	293	293	293	***16/3***	196	202	204	205	209	209	219
8/4	302	302	302	302	302	302	302	***16/4***	240	240	240	240	240	240	240
8/5	177	177	177	181	181	181	193	***16/5***	65	65	70	75	80	87	116
9/1	81	81	81	84	84	84	93	***17/1***	37	38	39	40	41	50	66
9/2	218	218	218	223	223	234	235	***17/2***	133	133	133	133	144	150	222
9/3	232	235	238	238	238	238	251	***17/3***	219	221	221	228	228	232	256
9/4	302	302	302	302	302	302	307	***17/4***	320	320	320	320	320	320	320
9/5	175	178	182	182	182	190	197	***17/5***	84	89	89	89	94	103	157
10/1	68	68	68	68	69	69	74	***18/1***	45	45	46	47	47	48	55
10/2	225	225	225	227	227	241	245	***18/2***	136	143	143	143	154	154	168
10/3	367	367	367	367	367	367	367	***18/3***	229	229	240	242	244	244	256
10/4	80	80	80	80	80	80	80	***18/4***	415	415	415	415	415	415	415
10/5	42	47	47	47	51	63	63	***18/5***	158	162	163	163	163	163	186
11/1	37	39	39	39	40	46	62	***19/1***	33	34	36	36	36	38	66
11/2	132	134	134	134	139	161	174	***19/2***	150	151	151	151	164	168	182
11/3	215	215	226	226	226	228	270	***19/3***	217	219	219	219	221	221	243
11/4	415	415	415	415	415	415	415	***19/4***	415	415	415	415	415	415	415
11/5	121	124	124	124	124	124	148	***19/5***	151	156	159	159	159	159	192
12/1	37	37	40	41	41	41	46	***20/1***	31	31	33	35	35	35	45
12/2	112	117	117	117	117	144	197	***20/2***	114	114	119	119	119	128	143
12/3	221	223	223	223	230	230	252	***20/3***	221	223	224	224	224	231	232
12/4	326	326	326	326	326	326	326	***20/4***	252	252	252	252	252	252	252
12/5	95	95	95	100	106	106	159	***20/5***	68	74	74	74	74	74	97
13/1	29	30	31	31	33	40	59	***21/1***	56	56	56	58	59	59	82
13/2	122	122	122	122	122	138	199	***21/2***	193	193	197	197	197	205	223
13/3	207	209	209	213	215	221	236	***21/3***	277	277	282	282	293	293	293
13/4	326	326	326	326	326	326	326	***21/4***	228	228	228	228	228	228	228
13/5	95	98	101	101	101	111	143	***21/5***	106	107	112	112	112	112	137
14/1	45	46	47	47	49	50	69	***22/1***	63	63	67	67	67	67	87
14/2	153	154	158	158	158	169	207	***22/2***	213	213	213	215	215	227	245
14/3	231	237	240	243	247	253	255	***22/3***	311	311	311	311	311	317	317
14/4	314	314	314	314	314	314	314	***22/4***	154	154	154	154	154	154	154
14/5	103	103	107	107	110	112	147	***22/5***	82	83	83	83	83	92	111

Sigue en la página siguiente.

W ($M4'_RWR$)																
P/E	β							*P/E*	β						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
23/1	55	55	55	55	55	58	69	***31/1***	52	52	54	54	54	54	64
23/2	197	198	198	208	208	213	217	***31/2***	153	157	157	157	157	163	171
23/3	329	329	329	329	329	329	330	***31/3***	245	253	253	259	259	271	271
23/4	154	154	154	154	154	154	154	***31/4***	314	314	314	314	314	314	314
23/5	67	67	67	67	76	81	99	***31/5***	148	148	148	148	148	148	192
24/1	67	67	67	67	67	75	80	***32/1***	53	53	54	54	54	62	74
24/2	205	208	214	214	214	214	228	***32/2***	187	193	193	197	197	197	222
24/3	259	259	273	273	273	278	278	***32/3***	235	237	239	239	239	239	250
24/4	228	228	228	228	228	228	228	***32/4***	403	403	403	403	403	403	403
24/5	128	128	134	134	134	136	148	***32/5***	176	179	180	183	183	194	194
25/1	56	56	58	58	60	65	73	***33/1***	53	53	54	54	54	54	61
25/2	190	196	196	196	196	207	209	***33/2***	174	175	181	186	193	197	203
25/3	295	295	295	300	300	309	312	***33/3***	243	243	243	256	260	262	274
25/4	228	228	228	228	228	228	228	***33/4***	403	403	403	403	403	403	403
25/5	103	103	108	114	114	114	122	***33/5***	171	173	173	173	173	181	213
26/1	63	63	66	66	66	66	83	***34/1***	25	26	26	26	26	28	33
26/2	206	206	212	214	214	214	232	***34/2***	141	142	147	147	147	160	175
26/3	243	251	253	253	257	257	257	***34/3***	208	210	210	210	210	217	227
26/4	302	302	302	302	302	302	302	***34/4***	252	252	252	252	252	252	252
26/5	152	157	157	158	158	158	169	***34/5***	91	92	94	94	101	101	115
27/1	58	59	59	61	61	61	80	***35/1***	41	41	41	41	41	46	46
27/2	200	200	208	208	208	215	240	***35/2***	117	117	117	117	117	124	137
27/3	261	269	269	269	271	275	275	***35/3***	235	237	237	237	237	246	247
27/4	302	302	302	302	302	302	302	***35/4***	252	252	252	252	252	252	252
27/5	137	140	145	145	145	154	176	***35/5***	86	86	91	91	91	91	113
28/1	46	46	48	48	48	48	53	***36/1***	29	29	30	32	32	32	41
28/2	175	175	177	177	177	183	201	***36/2***	152	152	156	156	156	179	191
28/3	265	265	265	270	270	273	285	***36/3***	196	196	199	199	213	213	220
28/4	166	166	166	166	166	166	166	***36/4***	326	326	326	326	326	326	331
28/5	64	65	65	65	65	74	85	***36/5***	146	146	151	151	151	154	166
29/1	48	49	50	50	50	52	61	***37/1***	48	48	48	49	49	51	58
29/2	158	159	159	159	159	180	180	***37/2***	116	118	118	118	131	136	157
29/3	283	283	283	283	286	286	286	***37/3***	235	237	237	243	243	249	249
29/4	166	166	166	166	166	166	166	***37/4***	326	326	326	326	326	326	326
29/5	56	56	56	56	61	66	78	***37/5***	132	132	132	137	141	141	163
30/1	55	55	58	58	58	58	67	***38/1***	43	44	46	46	47	48	65
30/2	178	179	179	179	179	190	207	***38/2***	179	186	193	193	193	200	231
30/3	214	214	214	217	220	231	238	***38/3***	263	263	263	263	270	270	304
30/4	314	314	314	314	314	314	319	***38/4***	510	510	514	514	520	523	537
30/5	155	157	157	163	163	171	184	***38/5***	185	186	186	186	191	194	207

Sigue en la página siguiente.

W ($M4'_RWR$)																
P/E	β							*P/E*	β						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
39/1	47	47	47	47	48	50	61	***43/1***	44	45	45	45	46	47	51
39/2	168	175	175	175	175	186	229	***43/2***	116	120	120	132	132	133	133
39/3	257	257	257	260	262	273	302	***43/3***	232	232	232	232	232	252	271
39/4	509	509	509	509	509	509	509	***43/4***	427	427	427	427	427	427	427
39/5	194	194	197	197	197	197	211	***43/5***	151	152	153	153	153	157	180
40/1	22	25	25	25	25	25	38	***44/1***	34	36	37	37	37	38	47
40/2	104	106	106	106	106	113	153	***44/2***	163	163	163	169	169	169	205
40/3	199	199	199	199	199	216	216	***44/3***	271	271	271	271	277	277	290
40/4	338	338	338	338	338	338	338	***44/4***	522	524	524	526	526	539	539
40/5	103	104	109	109	109	118	143	***44/5***	169	169	169	169	169	176	194
41/1	34	35	37	37	37	37	40	***45/1***	43	43	44	45	47	47	54
41/2	92	93	93	97	106	121	142	***45/2***	149	152	154	154	161	166	197
41/3	213	213	213	213	213	230	230	***45/3***	265	265	265	265	267	273	273
41/4	338	338	338	338	338	338	338	***45/4***	521	521	521	521	521	521	521
41/5	107	110	110	110	114	114	138	***45/5***	182	183	183	183	183	183	207
42/1	22	24	24	25	25	27	43								
42/2	137	137	137	137	137	137	151								
42/3	211	211	213	213	215	229	260								
42/4	427	427	427	427	427	427	427								
42/5	142	145	145	145	145	148	174								

Tabla B.22: Valores de sobrecarga (óptimos), W, obtenidos con el modelo $M4'_RWR$ para obtener los óptimos de las 225 instancias de la literatura, agrupados por programa de producción y estructuras de tiempos (*P/E*), en función del coeficiente de ponderación β.

Tabla B.23

De forma similar a la tabla anterior, la tabla B.23 recoge los resultados, en cuanto a no-regularidad del trabajo requerido por la secuencia, obtenidos con el modelo $M4'_RWR$, para el conjunto de datos de la literatura (225 ejemplares) y los diferentes valores del coeficiente de ponderación β.

Δ_P ($M4'_RWR$)																
P/E	β							*P/E*	β						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
1/1	30.84	30.84	30.84	29.59	29.59	29.59	29.19	***2/1***	30.48	24.98	24.98	24.98	24.98	24.98	24.61
1/2	139.59	87.18	87.18	87.18	83.30	83.30	83.30	***2/2***	88.86	77.93	77.93	77.93	77.93	76.83	76.68
1/3	121.92	87.24	87.24	87.24	87.24	87.24	87.24	***2/3***	82.25	67.33	67.33	67.33	67.33	67.33	67.33
1/4	105.18	87.76	87.76	87.76	87.76	87.76	87.63	***2/4***	89.65	88.08	88.08	88.08	88.08	86.46	86.46
1/5	62.07	60.08	60.08	60.08	60.08	60.08	58.97	***2/5***	63.45	62.87	59.48	59.48	59.48	59.48	58.58

Sigue en la página siguiente.

Δ_P ($M4'_RWR$)

P/E	β							P/E	β						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
3/1	24.51	23.29	23.29	23.29	23.29	23.29	23.29	***12/1***	57.30	44.86	35.82	34.34	34.34	34.34	33.89
3/2	154.60	84.55	84.55	84.55	84.55	84.55	84.55	***12/2***	140.16	114.78	114.78	114.78	114.78	106.38	104.57
3/3	156.09	82.92	82.92	82.92	82.92	82.92	82.92	***12/3***	193.57	111.69	111.69	111.69	105.27	105.27	102.86
3/4	229.74	93.16	93.16	93.16	93.16	93.16	93.16	***12/4***	141.96	118.89	118.89	118.89	118.89	118.89	118.89
3/5	124.50	71.23	71.23	71.23	71.23	71.23	71.23	***12/5***	132.12	93.68	93.68	87.51	82.06	82.06	78.13
4/1	50.76	32.26	32.26	32.26	32.26	32.26	32.26	***13/1***	57.51	43.38	39.65	39.65	37.92	35.42	34.54
4/2	120.33	89.94	89.94	89.94	89.94	83.41	82.38	***13/2***	121.45	117.26	117.26	117.26	117.26	112.76	111.09
4/3	85.07	70.28	70.28	70.28	70.28	69.32	69.32	***13/3***	186.32	108.33	108.33	103.76	101.84	98.93	97.55
4/4	205.35	82.25	82.25	82.25	82.25	82.25	82.25	***13/4***	150.02	115.34	115.34	115.34	115.34	115.34	115.34
4/5	181.32	79.48	79.48	79.48	79.48	79.48	79.48	***13/5***	129.01	105.01	96.65	96.65	96.65	93.98	91.95
5/1	38.68	32.97	32.97	32.97	32.97	32.97	31.75	***14/1***	78.13	39.43	36.87	36.87	35.37	35.06	32.99
5/2	137.87	98.62	98.62	98.62	95.64	92.79	92.67	***14/2***	136.40	123.38	110.38	110.38	110.38	107.00	104.38
5/3	102.82	73.97	73.97	73.97	73.97	73.97	72.78	***14/3***	155.21	111.75	106.90	102.87	99.38	96.84	96.71
5/4	107.50	81.73	81.73	81.73	81.73	81.73	81.28	***14/4***	129.13	116.75	116.75	116.75	116.75	116.75	116.75
5/5	98.06	75.17	75.17	71.35	71.35	71.35	71.06	***14/5***	118.12	113.42	98.17	98.17	95.43	94.72	92.40
6/1	60.36	31.29	31.29	31.29	31.29	30.04	29.64	***15/1***	46.71	40.71	40.71	37.17	36.35	36.35	33.80
6/2	113.14	113.14	113.14	113.14	113.14	108.27	106.87	***15/2***	123.41	109.04	109.04	109.04	109.04	108.60	106.86
6/3	112.35	112.35	112.35	112.35	112.35	112.35	109.99	***15/3***	138.27	116.25	93.71	93.71	91.12	90.02	89.46
6/4	139.11	124.76	124.76	124.76	124.76	124.76	124.76	***15/4***	129.59	103.99	103.99	103.99	103.99	103.99	103.99
6/5	98.06	72.38	72.38	72.38	72.38	72.38	71.18	***15/5***	130.07	113.41	103.91	103.91	100.48	93.42	91.13
7/1	59.00	42.35	42.35	42.35	42.35	39.99	39.85	***16/1***	55.23	41.14	36.18	36.18	36.18	33.25	32.64
7/2	117.41	107.70	107.70	107.70	107.00	107.00	106.01	***16/2***	112.38	112.38	108.54	108.54	108.54	104.68	102.39
7/3	109.96	104.86	104.86	104.86	104.86	97.29	97.29	***16/3***	149.20	101.28	96.64	95.25	91.61	91.61	90.51
7/4	124.47	112.86	112.86	112.86	112.86	112.86	112.65	***16/4***	166.03	100.77	100.77	100.77	100.77	100.77	100.77
7/5	105.98	97.81	89.81	89.81	89.81	89.81	89.03	***16/5***	158.71	111.17	101.03	94.80	90.38	86.71	84.67
8/1	57.48	32.57	30.76	30.76	30.76	30.41	29.74	***17/1***	65.46	41.41	38.85	37.52	36.77	33.82	32.46
8/2	173.71	101.49	98.00	98.00	98.00	96.31	95.91	***17/2***	117.82	117.82	117.82	117.82	107.82	106.20	103.61
8/3	258.35	123.09	92.47	92.47	88.05	88.05	88.05	***17/3***	178.00	109.68	109.68	100.67	100.67	98.48	96.74
8/4	135.90	118.61	118.61	118.61	118.61	118.61	118.61	***17/4***	132.82	114.59	114.59	114.59	114.59	114.59	114.59
8/5	120.11	93.11	93.11	88.61	88.61	88.61	87.44	***17/5***	121.61	93.51	93.51	93.51	89.27	85.77	83.03
9/1	45.34	36.73	36.73	32.73	32.73	32.73	32.52	***18/1***	46.43	39.55	36.79	35.31	35.31	34.79	34.19
9/2	104.41	100.62	100.62	95.49	95.49	91.06	91.00	***18/2***	186.86	112.10	112.10	112.10	101.96	101.96	101.43
9/3	165.28	92.20	86.90	86.90	86.90	86.90	85.65	***18/3***	133.25	126.59	106.34	103.43	101.59	101.59	98.87
9/4	120.63	107.88	107.88	107.88	107.88	107.88	107.58	***18/4***	141.69	113.19	113.19	113.19	113.19	113.19	113.19
9/5	112.01	94.93	86.68	86.68	86.68	84.28	83.86	***18/5***	111.71	83.55	81.43	81.43	81.43	81.43	80.68
10/1	36.99	33.05	33.05	33.05	32.13	32.13	31.82	***19/1***	54.56	44.07	39.32	39.32	39.32	38.61	36.62
10/2	107.59	100.81	100.81	98.18	98.18	93.56	93.52	***19/2***	120.08	115.44	115.44	115.44	103.31	100.94	98.44
10/3	103.13	68.71	68.71	68.71	68.71	68.71	68.71	***19/3***	129.00	88.34	88.34	88.34	86.41	86.41	83.79
10/4	255.67	86.65	86.65	86.65	86.65	86.65	86.65	***19/4***	150.50	100.07	100.07	100.07	100.07	100.07	100.07
10/5	137.53	108.17	108.17	108.17	104.47	96.61	96.61	***19/5***	122.54	92.79	86.17	86.17	86.17	86.17	82.78
11/1	68.65	38.31	38.31	38.31	37.56	35.60	35.43	***20/1***	47.81	46.13	38.56	36.18	36.18	36.18	34.88
11/2	140.77	113.79	113.79	113.79	109.10	102.76	102.67	***20/2***	132.36	132.36	114.56	114.56	114.56	110.99	108.26
11/3	121.55	118.73	96.33	96.33	96.33	95.25	91.74	***20/3***	133.41	107.51	104.09	104.09	104.09	100.92	100.82
11/4	214.01	106.23	106.23	106.23	106.23	106.23	106.23	***20/4***	198.52	105.93	105.93	105.93	105.93	105.93	105.93
11/5	101.12	82.79	82.79	82.79	82.79	82.79	80.95	***20/5***	124.64	90.29	90.29	90.29	90.29	90.29	86.82

Sigue en la página siguiente.

Δ_P **(**$M4'_RWR$**)**

P/E	β							P/E	β						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
21/1	61.94	39.68	39.68	37.14	36.24	36.24	35.73	***30/1***	60.03	40.43	34.93	34.93	34.93	34.93	34.88
21/2	112.22	112.08	105.74	105.74	105.74	101.74	99.55	***30/2***	125.97	104.87	104.87	104.87	104.87	100.95	98.82
21/3	121.85	102.68	91.07	91.07	82.35	82.35	82.35	***30/3***	121.59	99.33	99.33	95.74	93.60	89.21	88.49
21/4	165.38	102.38	102.38	102.38	102.38	102.38	102.38	***30/4***	122.55	109.63	109.72	109.63	109.63	109.63	109.63
21/5	125.12	105.14	87.27	87.27	87.27	87.27	83.79	***30/5***	113.75	102.02	102.02	94.87	94.87	90.62	88.30
22/1	42.47	40.56	33.56	33.56	33.56	33.56	33.27	***31/1***	39.38	36.18	32.43	32.43	32.43	32.43	31.65
22/2	161.72	106.20	106.20	103.92	103.92	98.37	98.19	***31/2***	170.13	103.03	103.03	103.03	103.03	99.88	98.70
22/3	139.92	80.28	80.28	80.28	80.28	76.95	76.95	***31/3***	156.57	110.82	110.82	102.02	102.02	96.82	96.82
22/4	150.28	92.59	92.49	92.49	92.49	92.49	92.49	***31/4***	142.96	120.34	120.34	120.34	120.34	120.34	120.34
22/5	135.26	99.82	99.82	99.82	99.82	97.23	96.01	***31/5***	91.43	87.90	87.90	87.90	87.90	87.90	85.01
23/1	31.23	31.23	31.23	31.23	31.23	30.12	29.42	***32/1***	45.68	39.37	37.47	37.47	37.47	34.70	33.73
23/2	134.88	105.28	105.28	94.90	94.90	92.93	92.90	***32/2***	153.83	98.85	98.85	94.72	94.72	94.72	90.80
23/3	88.08	80.75	80.75	80.75	80.75	80.75	80.72	***32/3***	117.06	86.28	80.83	80.83	80.83	80.83	79.42
23/4	187.13	96.11	96.11	96.11	96.11	96.11	96.11	***32/4***	119.35	99.48	99.48	99.48	99.48	99.48	99.48
23/5	105.71	105.71	105.71	105.71	97.30	94.52	92.36	***32/5***	142.91	91.56	88.49	84.08	84.08	80.06	80.06
24/1	45.39	36.48	36.48	36.48	36.48	34.23	33.55	***33/1***	47.10	34.50	31.99	31.99	31.99	31.99	31.56
24/2	141.79	107.00	97.58	97.58	97.58	97.58	96.03	***33/2***	199.00	118.57	105.17	98.88	93.46	92.43	91.72
24/3	156.71	114.23	81.73	81.73	81.73	79.44	79.44	***33/3***	225.90	116.66	116.66	101.04	97.73	96.79	96.32
24/4	174.39	100.34	100.34	100.34	100.34	100.34	100.34	***33/4***	131.97	111.47	111.47	111.47	111.47	111.47	111.47
24/5	136.12	106.83	95.24	95.24	95.24	94.33	91.91	***33/5***	105.69	88.44	88.44	88.44	88.44	83.83	83.22
25/1	58.96	41.89	36.07	36.07	34.19	32.67	32.53	***34/1***	47.05	36.51	36.51	36.51	36.51	35.79	35.25
25/2	126.87	100.61	100.61	100.61	100.61	97.45	97.39	***34/2***	127.09	119.29	103.56	103.56	103.56	97.81	95.60
25/3	156.80	99.78	99.78	92.54	92.54	87.40	86.74	***34/3***	157.33	103.35	103.35	103.35	103.35	100.62	99.75
25/4	160.38	103.38	103.38	103.38	103.38	103.38	103.38	***34/4***	185.11	103.35	103.35	103.35	103.35	103.35	103.35
25/5	117.59	113.75	101.27	92.40	92.40	92.40	90.55	***34/5***	114.65	105.74	99.74	99.74	92.78	92.78	91.08
26/1	44.04	43.38	35.44	35.44	35.44	35.44	33.83	***35/1***	53.11	35.44	35.44	35.44	35.44	32.61	32.61
26/2	118.62	111.28	99.53	97.28	97.28	97.28	95.26	***35/2***	110.80	104.65	104.65	104.65	104.65	102.39	102.24
26/3	187.91	89.57	86.22	86.22	83.28	83.28	83.28	***35/3***	154.88	108.48	108.48	108.48	108.48	105.83	105.72
26/4	112.95	110.71	110.71	110.71	110.71	110.71	110.71	***35/4***	185.63	107.23	107.23	107.23	107.23	107.23	107.23
26/5	140.25	88.07	88.07	86.57	86.57	86.57	84.84	***35/5***	110.56	91.53	80.28	80.28	80.28	80.28	78.53
27/1	45.33	38.03	38.03	35.48	35.48	35.48	34.39	***36/1***	53.96	45.52	42.60	39.77	39.77	39.77	39.71
27/2	128.08	124.14	100.70	100.70	100.70	96.99	96.12	***36/2***	112.86	112.86	106.79	106.79	106.79	98.26	97.53
27/3	135.46	91.26	91.15	91.15	89.37	87.65	87.65	***36/3***	111.37	110.94	102.67	102.67	92.59	92.59	92.21
27/4	126.36	115.02	115.02	115.02	115.02	115.02	115.02	***36/4***	114.79	111.62	111.62	111.62	111.62	111.62	111.35
27/5	124.73	98.70	88.49	88.49	88.49	85.93	85.93	***36/5***	110.81	105.78	88.46	88.46	88.46	87.47	86.68
28/1	37.15	35.67	31.73	31.73	31.73	31.73	31.42	***37/1***	38.66	34.47	34.47	33.47	33.47	32.64	31.97
28/2	120.02	111.69	103.94	103.94	103.94	101.23	99.78	***37/2***	139.34	119.26	119.26	119.26	109.61	107.86	107.04
28/3	100.65	100.65	100.65	94.97	94.97	93.14	92.05	***37/3***	170.02	112.75	112.75	106.37	106.37	104.55	104.55
28/4	272.09	95.83	95.83	95.83	95.83	95.83	95.83	***37/4***	140.06	122.11	122.11	122.11	122.11	122.11	122.11
28/5	113.26	98.32	98.32	98.32	98.32	95.89	95.03	***37/5***	99.52	89.70	89.70	83.65	79.82	79.82	78.86
29/1	40.05	35.69	33.45	33.45	33.45	32.64	31.89	***38/1***	46.63	40.47	36.07	36.07	35.35	34.85	33.95
29/2	130.49	107.07	107.07	107.07	107.07	98.37	98.37	***38/2***	137.85	107.01	95.51	95.51	95.51	93.46	90.45
29/3	130.31	96.92	96.92	96.92	94.61	94.61	94.61	***38/3***	86.72	86.72	86.72	86.72	81.32	81.32	79.90
29/4	251.91	98.56	98.56	98.56	98.56	98.56	98.56	***38/4***	118.03	112.65	102.33	102.33	98.30	97.38	96.92
29/5	145.23	101.52	101.52	101.52	96.56	94.64	92.69	***38/5***	87.83	82.79	82.79	82.79	78.39	77.14	76.23

Sigue en la página siguiente.

Δ_P ($M4'_RWR$)															
P/E	β							*P/E*	β						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
39/1	31.82	31.82	31.82	31.82	31.04	30.12	29.45	***43/1***	52.09	31.48	31.48	31.48	30.31	30.06	29.87
39/2	168.45	102.71	102.71	102.71	102.71	96.71	92.06	***43/2***	162.59	109.82	109.82	95.67	95.67	95.19	95.19
39/3	108.16	98.73	98.73	94.78	92.94	87.07	86.00	***43/3***	120.72	115.15	115.15	115.15	115.15	104.01	103.63
39/4	129.31	104.70	104.70	104.70	104.70	104.70	104.70	***43/4***	129.03	112.84	112.84	112.84	112.84	112.84	112.84
39/5	89.04	88.04	80.12	80.12	80.12	80.12	78.17	***43/5***	83.94	79.03	76.48	76.48	76.48	74.91	74.19
40/1	60.60	39.24	39.24	39.24	39.30	39.24	38.17	***44/1***	55.24	36.10	34.58	34.58	34.58	34.06	33.86
40/2	133.35	107.15	107.15	107.15	107.15	104.28	103.73	***44/2***	107.80	102.89	102.89	95.63	95.63	95.63	94.09
40/3	111.63	107.58	107.58	107.58	107.58	101.72	101.72	***44/3***	94.27	86.22	86.22	86.22	82.04	82.04	80.18
40/4	126.49	116.73	116.73	116.73	116.73	116.73	116.73	***44/4***	144.90	105.37	105.37	103.08	103.08	97.29	97.29
40/5	109.41	100.13	91.72	91.72	91.72	87.95	86.31	***44/5***	94.49	83.45	83.45	83.45	83.45	81.42	81.01
41/1	54.38	37.67	34.20	34.20	34.20	34.20	34.04	***45/1***	42.28	38.94	36.03	34.55	32.80	32.80	32.09
41/2	125.25	120.20	120.20	115.35	109.02	103.22	102.70	***45/2***	176.97	112.30	105.96	105.96	99.97	98.45	93.19
41/3	112.20	110.13	110.13	110.13	110.13	104.38	104.38	***45/3***	116.50	95.30	95.30	95.30	93.65	91.03	91.03
41/4	131.71	120.04	120.04	120.04	120.04	120.04	120.04	***45/4***	120.23	105.33	105.33	105.33	105.33	105.33	105.33
41/5	115.15	83.19	83.19	83.19	80.35	80.35	79.14	***45/5***	95.66	77.50	77.50	77.50	77.50	77.50	76.74
42/1	74.57	41.64	41.64	40.45	40.45	39.20	38.52								
42/2	99.93	99.93	99.93	99.93	99.93	99.93	98.89								
42/3	116.16	106.63	102.08	102.08	100.35	92.34	90.67								
42/4	129.44	100.70	100.70	100.70	100.70	100.70	100.70								
42/5	116.16	85.45	85.45	85.45	85.45	84.24	81.77								

Tabla B.23: Valores de no-regularidad del trabajo requerido, Δ_P, generados por las secuencias obtenidas con $M4'_RWR$ para las 225 instancias de la literatura, agrupados por programa de producción y estructuras de tiempos (*P/E*), en función del coeficiente de ponderación β.

Tabla B.24

Finalmente, la tabla B.24 recoge los valores calculados para los siguientes indicadores (ecuaciones (4.78) y (4.79)), que miden la distancia de la mejor solución encontrada, para la sobrecarga de trabajo $W(\beta = 1)$ y para la no-regularidad del trabajo requerido ($\Delta_P(\beta = 0)$), respectivamente, y el resto de soluciones encontradas cuando se considera otro valor para el parámetro de ponderación de las funciones (β), considerando las 225 instancias de datos de la literatura.

$$RPD_W(\beta,\epsilon) = \frac{\Big(W^\star(\beta,\epsilon)\Big) - \Big(W^\star(\epsilon)\Big)}{\Big(W^\star(\epsilon)\Big)} \cdot 100 \qquad (\beta = 0.8,\ldots,0.0; \epsilon \in \mathrm{E})$$

$$RPD_{\Delta_P}(\beta,\epsilon) = \frac{\Big(\Delta_P^\star(\beta,\epsilon)\Big) - \Big(\Delta_P^\star(\epsilon)\Big)}{\Big(\Delta_P^\star(\epsilon)\Big)} \cdot 100 \qquad (\beta = 0.8,\ldots,0.0; \epsilon \in \mathrm{E})$$

P/E	RPD_W ($M4'_RWR$)							P/E	RPD_{Δ_P} ($M4'_RWR$)						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
1/1	0.00	0.00	0.00	2.50	2.50	2.50	7.50	***1/1***	5.63	5.63	5.63	1.35	1.35	1.35	0.00
1/2	0.00	0.00	0.00	0.00	2.17	2.17	2.17	***1/2***	67.58	4.66	4.66	4.66	0.00	0.00	0.00
1/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***1/3***	39.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	***1/4***	20.03	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00
1/5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.69	***1/5***	5.26	1.88	1.88	1.88	1.88	1.88	0.00
2/1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00	***2/1***	23.86	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	0.00
2/2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.42	5.32	***2/2***	15.88	1.63	1.63	1.63	1.63	0.19	0.00
2/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***2/3***	22.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	0.78	***2/4***	3.70	1.88	1.88	1.88	1.88	0.00	0.00
2/5	0.00	0.00	0.72	0.72	0.72	0.72	3.26	***2/5***	8.31	7.33	1.53	1.53	1.53	1.53	0.00
3/1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***3/1***	5.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***3/2***	82.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***3/3***	88.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***3/4***	146.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***3/5***	74.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4/1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***4/1***	57.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4/2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.70	6.79	***4/2***	46.08	9.18	9.18	9.18	9.18	1.25	0.00
4/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64	0.64	***4/3***	22.73	1.39	1.39	1.39	1.39	0.00	0.00
4/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***4/4***	149.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4/5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***4/5***	128.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5/1	0.00	2.17	2.17	2.17	2.17	2.17	21.74	***5/1***	21.81	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85	0.00
5/2	0.00	3.50	3.50	3.50	5.00	8.50	18.00	***5/2***	48.78	6.42	6.42	6.42	3.20	0.14	0.00
5/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.45	***5/3***	41.27	1.64	1.64	1.64	1.64	1.64	0.00
5/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.74	***5/4***	32.26	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.00
5/5	0.00	0.45	0.45	1.80	1.80	1.80	8.56	***5/5***	37.99	5.78	5.78	0.41	0.41	0.41	0.00
6/1	0.00	2.17	2.17	2.17	2.17	6.52	15.22	***6/1***	103.61	5.54	5.54	5.54	5.54	1.33	0.00
6/2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.00	32.00	***6/2***	5.87	5.87	5.87	5.87	5.87	1.31	0.00
6/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.49	***6/3***	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	2.14	0.00
6/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***6/4***	11.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6/5	0.00	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	5.88	***6/5***	37.76	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	0.00
7/1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	35.71	50.00	***7/1***	48.05	6.27	6.27	6.27	6.27	0.35	0.00
7/2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66	0.66	23.84	***7/2***	10.75	1.60	1.60	1.60	0.94	0.94	0.00
7/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.11	8.11	***7/3***	13.02	7.78	7.78	7.78	7.78	0.00	0.00
7/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.48	***7/4***	10.49	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.00
7/5	0.00	0.00	2.10	2.10	2.10	2.10	11.89	***7/5***	19.04	9.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.00
8/1	0.00	0.00	1.64	1.64	1.64	3.28	16.39	***8/1***	93.26	9.51	3.42	3.42	3.42	2.24	0.00
8/2	0.00	2.01	2.51	2.51	2.51	5.53	6.53	***8/2***	81.13	5.82	2.18	2.18	2.18	0.43	0.00
8/3	0.00	0.00	2.87	2.87	5.02	5.02	5.02	***8/3***	193.40	39.79	5.01	5.01	0.00	0.00	0.00
8/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***8/4***	14.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8/5	0.00	0.00	0.00	2.26	2.26	2.26	9.04	***8/5***	37.36	6.48	6.48	1.34	1.34	1.34	0.00

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_W ($M4'_RWR$)							P/E	RPD_{Δ_P} ($M4'_RWR$)						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
9/1	0.00	0.00	0.00	3.70	3.70	3.70	14.81	***9/1***	39.45	12.96	12.96	0.66	0.66	0.66	0.00
9/2	0.00	0.00	0.00	2.29	2.29	7.34	7.80	***9/2***	14.73	10.56	10.56	4.93	4.93	0.06	0.00
9/3	0.00	1.29	2.59	2.59	2.59	2.59	8.19	***9/3***	92.98	7.65	1.46	1.46	1.46	1.46	0.00
9/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.66	***9/4***	12.13	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.00
9/5	0.00	1.71	4.00	4.00	4.00	8.57	12.57	***9/5***	33.57	13.20	3.36	3.36	3.36	0.49	0.00
10/1	0.00	0.00	0.00	0.00	1.47	1.47	8.82	***10/1***	16.26	3.88	3.88	3.88	1.00	1.00	0.00
10/2	0.00	0.00	0.00	0.89	0.89	7.11	8.89	***10/2***	15.05	7.80	7.80	4.99	4.99	0.04	0.00
10/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***10/3***	50.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***10/4***	195.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10/5	0.00	11.90	11.90	11.90	21.43	50.00	50.00	***10/5***	42.36	11.97	11.97	11.97	8.13	0.00	0.00
11/1	0.00	5.41	5.41	5.41	8.11	24.32	67.57	***11/1***	93.75	8.14	8.14	8.14	6.01	0.48	0.00
11/2	0.00	1.52	1.52	1.52	5.30	21.97	31.82	***11/2***	37.10	10.83	10.83	10.83	6.26	0.08	0.00
11/3	0.00	0.00	5.12	5.12	5.12	6.05	25.58	***11/3***	32.49	29.41	5.00	5.00	5.00	3.82	0.00
11/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***11/4***	101.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11/5	0.00	2.48	2.48	2.48	2.48	2.48	22.31	***11/5***	24.92	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	0.00
12/1	0.00	0.00	8.11	10.81	10.81	10.81	24.32	***12/1***	69.07	32.37	5.69	1.32	1.32	1.32	0.00
12/2	0.00	4.46	4.46	4.46	4.46	28.57	75.89	***12/2***	34.03	9.77	9.77	9.77	9.77	1.73	0.00
12/3	0.00	0.90	0.90	0.90	4.07	4.07	14.03	***12/3***	88.19	8.59	8.59	8.59	2.34	2.34	0.00
12/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***12/4***	19.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12/5	0.00	0.00	0.00	5.26	11.58	11.58	67.37	***12/5***	69.10	19.90	19.90	12.00	5.02	5.02	0.00
13/1	0.00	3.45	6.90	6.90	13.79	37.93	103.45	***13/1***	66.49	25.60	14.78	14.78	9.78	2.54	0.00
13/2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.11	63.11	***13/2***	9.32	5.56	5.56	5.56	5.56	1.51	0.00
13/3	0.00	0.97	0.97	2.90	3.86	6.76	14.01	***13/3***	90.99	11.04	11.04	6.37	4.39	1.41	0.00
13/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***13/4***	30.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13/5	0.00	3.16	6.32	6.32	6.32	16.84	50.53	***13/5***	40.29	14.19	5.11	5.11	5.11	2.20	0.00
14/1	0.00	2.22	4.44	4.44	8.89	11.11	53.33	***14/1***	136.85	19.52	11.76	11.76	7.21	6.28	0.00
14/2	0.00	0.65	3.27	3.27	3.27	10.46	35.29	***14/2***	30.68	18.20	5.75	5.75	5.75	2.51	0.00
14/3	0.00	2.60	3.90	5.19	6.93	9.52	10.39	***14/3***	60.49	15.55	10.53	6.37	2.76	0.13	0.00
14/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***14/4***	10.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14/5	0.00	0.00	3.88	3.88	6.80	8.74	42.72	***14/5***	27.83	22.74	6.24	6.24	3.27	2.51	0.00
15/1	0.00	2.50	2.50	10.00	12.50	12.50	40.00	***15/1***	38.21	20.46	20.46	9.98	7.57	7.57	0.00
15/2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	19.73	***15/2***	15.49	2.04	2.04	2.04	2.04	1.63	0.00
15/3	0.00	0.42	4.60	4.60	5.86	7.11	9.62	***15/3***	54.56	29.95	4.75	4.75	1.86	0.63	0.00
15/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***15/4***	24.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15/5	0.00	0.00	7.14	7.14	14.29	42.86	70.00	***15/5***	42.73	24.45	14.02	14.02	10.26	2.52	0.00
16/1	0.00	6.25	15.63	15.63	15.63	40.63	62.50	***16/1***	69.20	26.01	10.82	10.82	10.82	1.85	0.00
16/2	0.00	0.00	0.85	0.85	0.85	10.26	35.90	***16/2***	9.76	9.76	6.01	6.01	6.01	2.24	0.00
16/3	0.00	3.06	4.08	4.59	6.63	6.63	11.73	***16/3***	64.85	11.90	6.77	5.24	1.22	1.22	0.00
16/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***16/4***	64.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16/5	0.00	0.00	7.69	15.38	23.08	33.85	78.46	***16/5***	87.45	31.30	19.32	11.97	6.75	2.42	0.00

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_W ($M4'_RWR$)							P/E	RPD_{Δ_P} ($M4'_RWR$)						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
17/1	0.00	2.70	5.41	8.11	10.81	35.14	78.38	***17/1***	101.68	27.59	19.68	15.60	13.29	4.18	0.00
17/2	0.00	0.00	0.00	0.00	8.27	12.78	66.92	***17/2***	13.72	13.72	13.72	13.72	4.07	2.51	0.00
17/3	0.00	0.91	0.91	4.11	4.11	5.94	16.89	***17/3***	84.00	13.38	13.38	4.07	4.07	1.80	0.00
17/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***17/4***	15.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17/5	0.00	5.95	5.95	5.95	11.90	22.62	86.90	***17/5***	46.46	12.62	12.62	12.62	7.52	3.30	0.00
18/1	0.00	0.00	2.22	4.44	4.44	6.67	22.22	***18/1***	35.79	15.67	7.59	3.27	3.27	1.74	0.00
18/2	0.00	5.15	5.15	5.15	13.24	13.24	23.53	***18/2***	84.23	10.52	10.52	10.52	0.52	0.52	0.00
18/3	0.00	0.00	4.80	5.68	6.55	6.55	11.79	***18/3***	34.77	28.04	7.56	4.61	2.76	2.76	0.00
18/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***18/4***	25.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18/5	0.00	2.53	3.16	3.16	3.16	3.16	17.72	***18/5***	38.47	3.57	0.93	0.93	0.93	0.93	0.00
19/1	0.00	3.03	9.09	9.09	9.09	15.15	100.00	***19/1***	48.99	20.36	7.38	7.38	7.38	5.43	0.00
19/2	0.00	0.67	0.67	0.67	9.33	12.00	21.33	***19/2***	21.99	17.27	17.27	17.27	4.95	2.54	0.00
19/3	0.00	0.92	0.92	0.92	1.84	1.84	11.98	***19/3***	53.96	5.43	5.43	5.43	3.13	3.13	0.00
19/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***19/4***	50.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19/5	0.00	3.31	5.30	5.30	5.30	5.30	27.15	***19/5***	48.02	12.09	4.08	4.08	4.08	4.08	0.00
20/1	0.00	0.00	6.45	12.90	12.90	12.90	45.16	***20/1***	37.05	32.24	10.54	3.71	3.71	3.71	0.00
20/2	0.00	0.00	4.39	4.39	4.39	12.28	25.44	***20/2***	22.26	22.26	5.82	5.82	5.82	2.52	0.00
20/3	0.00	0.90	1.36	1.36	1.36	4.52	4.98	***20/3***	32.33	6.64	3.25	3.25	3.25	0.10	0.00
20/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***20/4***	87.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20/5	0.00	8.82	8.82	8.82	8.82	8.82	42.65	***20/5***	43.56	3.99	3.99	3.99	3.99	3.99	0.00
21/1	0.00	0.00	0.00	3.57	5.36	5.36	46.43	***21/1***	73.37	11.08	11.08	3.96	1.44	1.44	0.00
21/2	0.00	0.00	2.07	2.07	2.07	6.22	15.54	***21/2***	12.73	12.58	6.21	6.21	6.21	2.20	0.00
21/3	0.00	0.00	1.81	1.81	5.78	5.78	5.78	***21/3***	47.97	24.69	10.59	10.59	0.00	0.00	0.00
21/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***21/4***	61.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21/5	0.00	0.94	5.66	5.66	5.66	5.66	29.25	***21/5***	49.33	25.48	4.15	4.15	4.15	4.15	0.00
22/1	0.00	0.00	6.35	6.35	6.35	6.35	38.10	***22/1***	27.66	21.93	0.88	0.88	0.88	0.88	0.00
22/2	0.00	0.00	0.00	0.94	0.94	6.57	15.02	***22/2***	64.71	8.16	8.16	5.84	5.84	0.18	0.00
22/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.93	1.93	***22/3***	81.84	4.33	4.33	4.33	4.33	0.00	0.00
22/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***22/4***	62.49	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22/5	0.00	1.22	1.22	1.22	1.22	12.20	35.37	***22/5***	40.89	3.97	3.97	3.97	3.97	1.28	0.00
23/1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.45	25.45	***23/1***	6.15	6.15	6.15	6.15	6.15	2.38	0.00
23/2	0.00	0.51	0.51	5.58	5.58	8.12	10.15	***23/2***	45.18	13.32	13.32	2.15	2.15	0.03	0.00
23/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	***23/3***	9.12	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00
23/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***23/4***	94.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23/5	0.00	0.00	0.00	0.00	13.43	20.90	47.76	***23/5***	14.45	14.45	14.45	14.45	5.35	2.34	0.00
24/1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11.94	19.40	***24/1***	35.29	8.75	8.75	8.75	8.75	2.04	0.00
24/2	0.00	1.46	4.39	4.39	4.39	4.39	11.22	***24/2***	47.65	11.42	1.61	1.61	1.61	1.61	0.00
24/3	0.00	0.00	5.41	5.41	5.41	7.34	7.34	***24/3***	97.26	43.79	2.88	2.88	2.88	0.00	0.00
24/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***24/4***	73.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24/5	0.00	0.00	4.69	4.69	4.69	6.25	15.63	***24/5***	48.10	16.23	3.63	3.63	3.63	2.63	0.00

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_W ($M4'_RWR$)							P/E	RPD_{Δ_P} ($M4'_RWR$)						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
25/1	0.00	0.00	3.57	3.57	7.14	16.07	30.36	***25/1***	81.23	28.77	10.88	10.88	5.10	0.41	0.00
25/2	0.00	3.16	3.16	3.16	3.16	8.95	10.00	***25/2***	30.27	3.31	3.31	3.31	3.31	0.06	0.00
25/3	0.00	0.00	0.00	1.69	1.69	4.75	5.76	***25/3***	80.78	15.04	15.04	6.69	6.69	0.77	0.00
25/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***25/4***	55.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25/5	0.00	0.00	4.85	10.68	10.68	10.68	18.45	***25/5***	29.86	25.62	11.84	2.04	2.04	2.04	0.00
26/1	0.00	0.00	4.76	4.76	4.76	4.76	31.75	***26/1***	30.18	28.21	4.76	4.76	4.76	4.76	0.00
26/2	0.00	0.00	2.91	3.88	3.88	3.88	12.62	***26/2***	24.52	16.83	4.48	2.13	2.13	2.13	0.00
26/3	0.00	3.29	4.12	4.12	5.76	5.76	5.76	***26/3***	125.64	7.56	3.53	3.53	0.00	0.00	0.00
26/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***26/4***	2.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26/5	0.00	3.29	3.29	3.95	3.95	3.95	11.18	***26/5***	65.32	3.81	3.81	2.04	2.04	2.04	0.00
27/1	0.00	1.72	1.72	5.17	5.17	5.17	37.93	***27/1***	31.80	10.59	10.59	3.18	3.18	3.18	0.00
27/2	0.00	0.00	4.00	4.00	4.00	7.50	20.00	***27/2***	33.26	29.15	4.77	4.77	4.77	0.91	0.00
27/3	0.00	3.07	3.07	3.07	3.83	5.36	5.36	***27/3***	54.55	4.13	4.00	4.00	1.97	0.00	0.00
27/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***27/4***	9.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27/5	0.00	2.19	5.84	5.84	5.84	12.41	28.47	***27/5***	45.15	14.86	2.98	2.98	2.98	0.00	0.00
28/1	0.00	0.00	4.35	4.35	4.35	4.35	15.22	***28/1***	18.25	13.53	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
28/2	0.00	0.00	1.14	1.14	1.14	4.57	14.86	***28/2***	20.29	11.93	4.17	4.17	4.17	1.45	0.00
28/3	0.00	0.00	0.00	1.89	1.89	3.02	7.55	***28/3***	9.35	9.35	9.35	3.18	3.18	1.19	0.00
28/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***28/4***	183.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28/5	0.00	1.56	1.56	1.56	1.56	15.63	32.81	***28/5***	19.18	3.46	3.46	3.46	3.46	0.90	0.00
29/1	0.00	2.08	4.17	4.17	4.17	8.33	27.08	***29/1***	25.56	11.91	4.89	4.89	4.89	2.33	0.00
29/2	0.00	0.63	0.63	0.63	0.63	13.92	13.92	***29/2***	32.66	8.85	8.85	8.85	8.85	0.00	0.00
29/3	0.00	0.00	0.00	0.00	1.06	1.06	1.06	***29/3***	37.73	2.44	2.44	2.44	0.00	0.00	0.00
29/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***29/4***	155.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29/5	0.00	0.00	0.00	0.00	8.93	17.86	39.29	***29/5***	56.68	9.52	9.52	9.52	4.17	2.10	0.00
30/1	0.00	0.00	5.45	5.45	5.45	5.45	21.82	***30/1***	72.11	15.90	0.14	0.14	0.14	0.14	0.00
30/2	0.00	0.56	0.56	0.56	0.56	6.74	16.29	***30/2***	27.48	6.12	6.12	6.12	6.12	2.15	0.00
30/3	0.00	0.00	0.00	1.40	2.80	7.94	11.21	***30/3***	37.41	12.24	12.24	8.20	5.78	0.81	0.00
30/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.59	***30/4***	11.79	0.01	0.08	0.01	0.01	0.01	0.00
30/5	0.00	1.29	1.29	5.16	5.16	10.32	18.71	***30/5***	28.82	15.54	15.54	7.44	7.44	2.62	0.00
31/1	0.00	0.00	3.85	3.85	3.85	3.85	23.08	***31/1***	24.42	14.32	2.47	2.47	2.47	2.47	0.00
31/2	0.00	2.61	2.61	2.61	2.61	6.54	11.76	***31/2***	72.38	4.39	4.39	4.39	4.39	1.20	0.00
31/3	0.00	3.27	3.27	5.71	5.71	10.61	10.61	***31/3***	61.71	14.46	14.46	5.37	5.37	0.00	0.00
31/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***31/4***	18.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31/5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.73	***31/5***	7.55	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	0.00
32/1	0.00	0.00	1.89	1.89	1.89	16.98	39.62	***32/1***	35.42	16.69	11.07	11.07	11.07	2.86	0.00
32/2	0.00	3.21	3.21	5.35	5.35	5.35	18.72	***32/2***	69.41	8.86	8.86	4.31	4.31	4.31	0.00
32/3	0.00	0.85	1.70	1.70	1.70	1.70	6.38	***32/3***	47.39	8.63	1.78	1.78	1.78	1.78	0.00
32/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***32/4***	19.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32/5	0.00	1.70	2.27	3.98	3.98	10.23	10.23	***32/5***	78.50	14.36	10.53	5.01	5.01	0.00	0.00

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_W ($M4'_RWR$)							P/E	RPD_{Δ_P} ($M4'_RWR$)						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
33/1	0.00	0.00	1.89	1.89	1.89	1.89	15.09	***33/1***	49.27	9.34	1.37	1.37	1.37	1.37	0.00
33/2	0.00	0.57	4.02	6.90	10.92	13.22	16.67	***33/2***	116.97	29.27	14.66	7.81	1.90	0.77	0.00
33/3	0.00	0.00	0.00	5.35	7.00	7.82	12.76	***33/3***	134.53	21.12	21.12	4.90	1.46	0.49	0.00
33/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***33/4***	18.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33/5	0.00	1.17	1.17	1.17	1.17	5.85	24.56	***33/5***	27.01	6.28	6.28	6.28	6.28	0.74	0.00
34/1	0.00	4.00	4.00	4.00	4.00	12.00	32.00	***34/1***	33.46	3.56	3.56	3.56	3.56	1.52	0.00
34/2	0.00	0.71	4.26	4.26	4.26	13.48	24.11	***34/2***	32.94	24.78	8.33	8.33	8.33	2.32	0.00
34/3	0.00	0.96	0.96	0.96	0.96	4.33	9.13	***34/3***	57.72	3.61	3.61	3.61	3.61	0.87	0.00
34/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***34/4***	79.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34/5	0.00	1.10	3.30	3.30	10.99	10.99	26.37	***34/5***	25.88	16.10	9.51	9.51	1.87	1.87	0.00
35/1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.20	12.20	***35/1***	62.85	8.67	8.67	8.67	8.67	0.00	0.00
35/2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.98	17.09	***35/2***	8.37	2.36	2.36	2.36	2.36	0.14	0.00
35/3	0.00	0.85	0.85	0.85	0.85	4.68	5.11	***35/3***	46.51	2.61	2.61	2.61	2.61	0.11	0.00
35/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***35/4***	73.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35/5	0.00	0.00	5.81	5.81	5.81	5.81	31.40	***35/5***	40.78	16.55	2.22	2.22	2.22	2.22	0.00
36/1	0.00	0.00	3.45	10.34	10.34	10.34	41.38	***36/1***	35.87	14.62	7.27	0.14	0.14	0.14	0.00
36/2	0.00	0.00	2.63	2.63	2.63	17.76	25.66	***36/2***	15.72	15.72	9.49	9.49	9.49	0.74	0.00
36/3	0.00	0.00	1.53	1.53	8.67	8.67	12.24	***36/3***	20.77	20.30	11.34	11.34	0.41	0.41	0.00
36/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.53	***36/4***	3.09	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.00
36/5	0.00	0.00	3.42	3.42	3.42	5.48	13.70	***36/5***	27.85	22.04	2.06	2.06	2.06	0.91	0.00
37/1	0.00	0.00	0.00	2.08	2.08	6.25	20.83	***37/1***	20.91	7.83	7.83	4.70	4.70	2.09	0.00
37/2	0.00	1.72	1.72	1.72	12.93	17.24	35.34	***37/2***	30.17	11.41	11.41	11.41	2.40	0.76	0.00
37/3	0.00	0.85	0.85	3.40	3.40	5.96	5.96	***37/3***	62.62	7.85	7.85	1.75	1.75	0.00	0.00
37/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***37/4***	14.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37/5	0.00	0.00	0.00	3.79	6.82	6.82	23.48	***37/5***	26.20	13.74	13.74	6.08	1.22	1.22	0.00
38/1	0.00	2.33	6.98	6.98	9.30	11.63	51.16	***38/1***	37.34	19.21	6.25	6.25	4.14	2.67	0.00
38/2	0.00	3.91	7.82	7.82	7.82	11.73	29.05	***38/2***	52.40	18.31	5.60	5.60	5.60	3.33	0.00
38/3	0.00	0.00	0.00	0.00	2.66	2.66	15.59	***38/3***	8.53	8.53	8.53	8.53	1.78	1.78	0.00
38/4	0.00	0.00	0.78	0.78	1.96	2.55	5.29	***38/4***	21.79	16.23	5.58	5.58	1.43	0.48	0.00
38/5	0.00	0.54	0.54	0.54	3.24	4.86	11.89	***38/5***	15.22	8.60	8.60	8.60	2.83	1.19	0.00
39/1	0.00	0.00	0.00	0.00	2.13	6.38	29.79	***39/1***	8.05	8.05	8.05	8.05	5.41	2.29	0.00
39/2	0.00	4.17	4.17	4.17	4.17	10.71	36.31	***39/2***	82.97	11.56	11.56	11.56	11.56	5.04	0.00
39/3	0.00	0.00	0.00	1.17	1.95	6.23	17.51	***39/3***	25.76	14.79	14.79	10.21	8.06	1.23	0.00
39/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***39/4***	23.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
39/5	0.00	0.00	1.55	1.55	1.55	1.55	8.76	***39/5***	13.90	12.62	2.49	2.49	2.49	2.49	0.00
40/1	0.00	13.64	13.64	13.64	13.64	13.64	72.73	***40/1***	58.75	2.81	2.81	2.81	2.96	2.81	0.00
40/2	0.00	1.92	1.92	1.92	1.92	8.65	47.12	***40/2***	28.55	3.30	3.30	3.30	3.30	0.52	0.00
40/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.54	8.54	***40/3***	9.74	5.77	5.77	5.77	5.77	0.00	0.00
40/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***40/4***	8.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40/5	0.00	0.97	5.83	5.83	5.83	14.56	38.83	***40/5***	26.76	16.01	6.27	6.27	6.27	1.90	0.00

Sigue en la página siguiente.

P/E	RPD_W ($M4'_RWR$)							P/E	RPD_{Δ_P} ($M4'_RWR$)						
	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
41/1	0.00	2.94	8.82	8.82	8.82	8.82	17.65	***41/1***	59.78	10.68	0.49	0.49	0.49	0.49	0.00
41/2	0.00	1.09	1.09	5.43	15.22	31.52	54.35	***41/2***	21.95	17.04	17.04	12.31	6.15	0.50	0.00
41/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.98	7.98	***41/3***	7.49	5.51	5.51	5.51	5.51	0.00	0.00
41/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***41/4***	9.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
41/5	0.00	2.80	2.80	2.80	6.54	6.54	28.97	***41/5***	45.49	5.11	5.11	5.11	1.53	1.53	0.00
42/1	0.00	9.09	9.09	13.64	13.64	22.73	95.45	***42/1***	93.61	8.11	8.11	5.02	5.02	1.78	0.00
42/2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.22	***42/2***	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	0.00
42/3	0.00	0.00	0.95	0.95	1.90	8.53	23.22	***42/3***	28.12	17.61	12.59	12.59	10.68	1.85	0.00
42/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***42/4***	28.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
42/5	0.00	2.11	2.11	2.11	2.11	4.23	22.54	***42/5***	42.06	4.50	4.50	4.50	4.50	3.03	0.00
43/1	0.00	2.27	2.27	2.27	4.55	6.82	15.91	***43/1***	74.40	5.39	5.39	5.39	1.47	0.63	0.00
43/2	0.00	3.45	3.45	13.79	13.79	14.66	14.66	***43/2***	70.80	15.36	15.36	0.50	0.50	0.00	0.00
43/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.62	16.81	***43/3***	16.49	11.11	11.11	11.11	11.11	0.37	0.00
43/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***43/4***	14.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
43/5	0.00	0.66	1.32	1.32	1.32	3.97	19.21	***43/5***	13.14	6.52	3.08	3.08	3.08	0.97	0.00
44/1	0.00	5.88	8.82	8.82	8.82	11.76	38.24	***44/1***	63.15	6.62	2.13	2.13	2.13	0.60	0.00
44/2	0.00	0.00	0.00	3.68	3.68	3.68	25.77	***44/2***	14.56	9.34	9.34	1.64	1.64	1.64	0.00
44/3	0.00	0.00	0.00	0.00	2.21	2.21	7.01	***44/3***	17.57	7.54	7.54	7.54	2.33	2.33	0.00
44/4	0.00	0.38	0.38	0.77	0.77	3.26	3.26	***44/4***	48.94	8.30	8.30	5.95	5.95	0.00	0.00
44/5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.14	14.79	***44/5***	16.64	3.01	3.01	3.01	3.01	0.50	0.00
45/1	0.00	0.00	2.33	4.65	9.30	9.30	25.58	***45/1***	31.76	21.37	12.29	7.68	2.23	2.23	0.00
45/2	0.00	2.01	3.36	3.36	8.05	11.41	32.21	***45/2***	89.90	20.51	13.71	13.71	7.27	5.65	0.00
45/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	3.02	3.02	***45/3***	27.98	4.70	4.70	4.70	2.88	0.00	0.00
45/4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	***45/4***	14.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45/5	0.00	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	13.74	***45/5***	24.66	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.00
$\overline{RPD_W}$	0.00	0.94	1.97	2.60	3.57	6.90	18.70	$\overline{RPD_{\Delta_p}}$	44.84	9.31	5.46	4.22	3.05	1.20	0.00

Tabla B.24: Desviación porcentual relativa entre la sobrecarga total óptima cuando $\beta = 1$ en $M4'_RWR$ y el valor óptimo obtenido para $\forall \beta \neq 1$ (RPD_W); y desviación porcentual relativa entre el valor óptimo de no-regularidad del trabajo requerido cuando $\beta = 0$ en $M4'_RWR$ y el valor óptimo obtenido para $\forall \beta \neq 0$ (RPD_{Δ_P}), para los 225 ejemplares de la literatura, con diferentes valores del coeficiente de ponderación β

B.3. Incorporación del Concepto de Actividad en el *MMSP-W*

Esta parte del Anexo B está dedicada a los resultados y cálculos correspondientes a la tercera variante del problema de secuenciación de unidades mixtas estudiada, la incorporación del concepto de actividad en el *MMSP-W*. En concreto, se recogen las siguientes tablas:

Tabla B.25

En ella se presentan los valores de sobrecarga obtenidos con los modelos de referencia, $M3 \cup 4$ y $M4 \cup 3$, y con los modelos propuestos, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, para cada una de las funciones del factor de actividad definidas ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$, $\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$).

Específicamente, se muestra la sobrecarga global de la línea, expresada en segundos, generada por la secuencias proporcionadas por los modelos para cada uno de los planes de producción del caso NISSAN-9ENG ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$).

Tablas B.26 y B.27

Ambas tablas recogen los tiempos de CPU, utilizados por Gurobi, para alcanzar las soluciones de los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, respectivamente. Al igual que la tabla B.25, éstas muestran los tiempos, empleados por el solucionador, para cada plan de demanda del caso NISSAN-9ENG correspondiente a un día de producción con dos turnos (*Bloque-I*) y para cada función del factor de actividad utilizada ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$, $\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$).

También se muestran los tiempos máximos, mínimos y medios del conjunto de ejemplares ($\mathrm{E} = 23$) para cada función del factor de actividad.

ϵ	W_{3U4}	$W_{3\cup4_\dot{\alpha}I}$		W_{4U3}	$W_{4\cup3_\dot{\alpha}I}$	
		$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$, $\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$		$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$, $\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$
#1	251	0	0	187	0	0
#2	444	23	0	341	12	0
#3	477	0	0	427	0	0
#4	402	0	0	310	0	0
#5	754	182	0	633	225	0
#6	525	93	0	413	86	0
#7	818	116	0	742	105	0
#8	228	0	0	139	0	0
#9	824	204	0	732	239	0
#10	1208*	459	0	1208 *	458	0
#11	165	0	0	78	0	0
#12	406	8	0	284	0	0
#13	383	34	0	286	21	0
#14	500	55	0	420	46	0
#15	506	27	0	433	10	0
#16	321	0	0	227	8	0
#17	550	46	0	478	53	0
#18	673	228	0	605	198	0
#19	949	250	0	945*	242	0
#20	233	0	0	139	0	0
#21	652	89	0	560	104	0
#22	1006	282	0	987	301	0
#23	188	0	0	140	0	0

Tabla B.25: Sobrecargas obtenidas por $M3 \cup 4$, $M4 \cup 3$, $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, con los perfiles del factor de actividad escalón, triangular, trapezoidal, parabólico ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$ y $\dot{\alpha}^P$) y sus respectivas funciones lineales y constantes ($\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$, $\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$) para cada uno de los 23 ejemplares del $Bloque - I$ de NISSAN-9ENG, con Gurobi. Nótese que que todas las soluciones nulas son óptimas, además de las marcadas con *.

ϵ	$CPU_{3\cup 4_\dot{\alpha}I}$						
	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\dot{\alpha}^Z$	$\dot{\alpha}^P$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\overline{\alpha^Z}$, $\overline{\alpha^P}$
$\#1$	3743.916	1.358	1.131	1.196	1.263	1.182	1.088
$\#2$	6839.964	1.385	1.254	1.169	1.481	1.194	1.090
$\#3$	3096.004	1.500	1.166	1.167	1.240	1.186	1.121
$\#4$	2947.805	1.436	1.289	1.275	1.300	1.186	1.095
$\#5$	7047.203	1.465	1.351	1.284	1.293	1.246	1.130
$\#6$	6994.258	1.424	1.370	1.179	1.531	1.182	1.105
$\#7$	6783.442	1.440	1.203	1.195	1.250	1.205	1.121
$\#8$	1733.303	11.442	1.216	1.187	1.294	1.226	1.139
$\#9$	6767.982	10.911	1.416	1.350	1.570	1.243	1.142
$\#10$	6848.486	1.405	1.206	1.280	1.234	1.157	1.108
$\#11$	396.835	1.350	1.292	1.141	1.243	1.187	1.096
$\#12$	6800.265	1.431	1.251	1.246	1.265	1.183	1.107
$\#13$	6825.006	1.471	1.158	1.204	1.290	1.189	1.103
$\#14$	6747.224	1.421	1.366	1.308	1.318	1.239	1.139
$\#15$	6817.828	1.383	1.176	1.148	1.248	1.195	1.108
$\#16$	3210.067	3.599	1.151	1.233	1.275	1.173	1.100
$\#17$	6789.235	1.369	1.257	1.138	1.372	1.195	1.102
$\#18$	6802.307	10.752	1.367	1.323	1.560	1.221	1.112
$\#19$	6848.755	1.415	1.185	1.259	1.252	1.191	1.126
$\#20$	798.561	3.611	1.124	1.154	1.287	1.205	1.092
$\#21$	6742.131	11.114	1.354	1.307	1.524	1.208	1.093
$\#22$	6840.335	1.655	1.266	1.380	1.355	1.279	1.195
$\#23$	542.866	1.220	1.281	1.168	1.232	1.169	1.112
CPU_{min}	396.835	1.220	1.124	1.138	1.232	1.157	1.088
CPU_{max}	7047.203	11.442	1.416	1.380	1.570	1.279	1.195
$\overline{CPU}$	5172.338	3.285	1.253	1.230	1.334	1.202	1.114

Tabla B.26: Tiempos de CPU (s) empleados por $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I$, con los perfiles del factor de actividad escalón, triangular, trapezoidal, parabólico ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$ y $\dot{\alpha}^P$) y sus respectivas funciones lineales y constantes ($\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$, $\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$), para resolver cada uno de los 23 ejemplares del $Bloque - I$ de NISSAN-9ENG, en el solver Gurobi. Nótese que en el caso del perfil escalón, en la mayoría de ejemplares, se alcanza el tiempo límite de 7200 s.

ϵ	$CPU_{4\cup3_\dot{\alpha}I}$						
	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\dot{\alpha}^Z$	$\dot{\alpha}^P$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\overline{\alpha^Z}$, $\overline{\alpha^P}$
#1	2429.630	1.414	1.203	1.114	1.267	1.179	1.064
#2	7004.858	1.309	1.136	1.245	1.456	1.182	1.082
#3	6479.018	1.194	1.145	1.117	1.247	1.170	1.104
#4	2885.591	1.338	1.237	1.203	1.380	1.192	1.079
#5	6831.042	9.249	1.312	1.138	1.494	1.192	1.113
#6	6822.936	1.311	1.254	1.118	1.373	1.179	1.084
#7	7023.369	9.071	1.307	1.317	1.336	1.166	1.086
#8	1498.728	1.422	1.196	1.337	1.317	1.205	1.091
#9	6936.314	9.145	1.439	1.318	1.693	1.251	1.128
#10	6983.217	1.392	1.170	1.145	1.240	1.174	1.089
#11	409.620	1.260	1.293	1.184	1.303	1.179	1.080
#12	3743.907	7.229	1.115	1.169	1.299	1.181	1.073
#13	7103.016	1.354	1.195	1.125	1.320	1.188	1.072
#14	7103.670	2.622	1.145	1.157	1.376	1.212	1.107
#15	7132.584	1.353	1.131	1.119	1.315	1.171	1.081
#16	7081.760	7.939	1.100	1.139	1.275	1.187	1.065
#17	6938.109	1.344	1.359	1.128	1.471	1.181	1.068
#18	7031.431	12.031	1.276	1.330	1.469	1.193	1.066
#19	6952.665	1.436	1.246	1.119	1.254	1.208	1.094
#20	904.124	1.357	1.094	1.100	1.289	1.163	1.063
#21	7092.222	10.536	1.297	1.250	1.557	1.178	1.064
#22	6945.269	8.615	1.231	1.230	1.369	1.273	1.175
#23	348.633	1.303	1.209	1.125	1.266	1.174	1.069
CPU_{min}	348.633	1.194	1.094	1.100	1.240	1.163	1.063
CPU_{max}	7132.584	12.031	1.439	1.337	1.693	1.273	1.175
$\overline{CPU}$	5377.466	4.140	1.221	1.184	1.364	1.190	1.087

Tabla B.27: Tiempos de CPU (s) empleados por $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I$, con los perfiles del factor de actividad escalón, triangular, trapezoidal, parabólico ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$ y $\dot{\alpha}^P$) y sus respectivas funciones lineales y constantes ($\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$, $\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$), para resolver cada uno de los 23 ejemplares del $Bloque - I$ de NISSAN-9ENG, en el solver Gurobi. Nótese que en el caso del perfil escalón, en la mayoría de ejemplares, se alcanza el tiempo límite de $7200\ s$.

B.4. Control de la Saturación de las Estaciones de Trabajo en el *MMSP-W*

Por último, en esta parte del Anexo B se recogen todos los cálculos realizados y resultados a partir de los modelos $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ y $M4 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$, que incorporan, además del factor de actividad, la limitación de la saturación u ocupación de los procesadores de las estaciones de la línea.

En una primera parte, compuesta por las tablas B.28, B.29, B.30, B.31, B.32, B.33, B.34 y B.35, se recogen una serie de cálculos previos, correspondientes a las saturaciones estáticas máximas y medias de la línea y de las estaciones, y los valores de sobrecarga inevitable debida a la limitación de la saturación media ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$), respectivamente. En concreto:

Tabla B.28

Muestra los valores de la saturación estática máxima de la línea, para cada uno de los planes de producción correspondientes a un día de trabajo, en la planta de motores de Nissan. Para su determinación se ha empleado la ecuación 6.2 , que aparece a continuación a modo de recordatorio.

$$\eta^{\circ}_{max}(k, c, \mathrm{P}, \mathrm{A}) = \frac{1}{c} \cdot \max_{i \in I} \left\{ \frac{p_{i,k}}{\alpha_{i,k}} \right\} \qquad k = 1, \ldots, |K|$$

Tablas B.29, B.30, B.31 y B.32

Recogen la saturación estática media de cada estación de la línea y mix de producción $\epsilon \in \mathrm{E}$ ($\mathrm{E} = 23$) cuando no se aumenta el factor de actividad de los operarios y cuando se considera una activación media de los procesadores de las estaciones de $1.0\widehat{33}$, 1.05 y $1.0\widehat{66}$ (correspondientes al valor medio del factor de actividad cuando éste sigue una función escalón, triangular, o trapezoidal o parabólico, respectivamente). Para su cálculo se ha utilizado la ecuación 6.1:

$$\eta^{\circ}_{med}(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}) = \frac{1}{c \cdot T} \cdot \sum_{i=1}^{|I|} \frac{p_{i,k}}{\alpha_{i,k}} \cdot d_i \qquad k = 1, \ldots, |K|$$

Nótese que $\alpha_{i,k}$ se ha considerado independiente del tipo de producto i y de la estación k. Esto es: $\alpha_{i,k} \cong \overline{\alpha_t}$.

Tablas B.33, B.34 y B.35

Muestran la sobrecarga inevitable generada en las estaciones de la línea por la limitación de la saturación estática media a 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$) cuando se mantiene durante toda la jornada laboral una actividad normal ($\alpha^N = 1$) o cuando dicha actividad varia a lo largo del tiempo, con un valor medio de $1.0\widehat{33}$ y 1.05.

Cabe destacar que en este caso, no se ha considerado el valor medio de las funciones trapezoidal y parabólica, pues para ese valor ($1.0\widehat{66}$) ninguna estación presenta una saturación media superior a 0.95 y, por tanto, la sobrecarga inevitable debida a la saturación es nula.

k	$\eta^{\circ}_{max}(k, c, \mathrm{P}, \mathrm{A})$			
	-	$\overline{\alpha^S}(\forall i; \forall k)$	$\overline{\alpha^T}(\forall i; \forall k)$	$\overline{\alpha^Z} = \overline{\alpha^P}(\forall i; \forall k)$
1	0.623	0.603	0.593	0.584
2	0.629	0.608	0.599	0.589
3	0.943	0.912	0.898	0.884
4	1.000	0.968	0.952	0.938
5	0.669	0.647	0.637	0.627
6	0.766	0.741	0.729	0.718
7	0.577	0.559	0.550	0.541
8	0.606	0.586	0.577	0.568
9	1.023	0.990	0.974	0.959
10	1.017	0.984	0.969	0.954
11	1.011	0.979	0.963	0.948
12	0.606	0.586	0.577	0.568
13	0.583	0.564	0.555	0.546
14	0.886	0.857	0.844	0.830
15	0.931	0.901	0.887	0.873
16	1.057	1.023	1.007	0.991
17	1.023	0.990	0.974	0.959
18	1.051	1.018	1.001	0.986
19	0.954	0.924	0.909	0.895
20	0.937	0.907	0.893	0.879
21	1.011	0.979	0.963	0.948

Tabla B.28: Saturación estática máxima (η°_{max}) de las estaciones ($\forall k \in K$), dado un factor de actividad promedio a lo largo de la jornada ($\overline{\alpha_{i,k}}$).

k	$\eta^{\circ}_{med}\left(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}\left(\overline{\alpha^{N}}\right)\right)$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.571	0.568	0.566	0.574	0.563	0.570	0.561	0.572	0.571	0.555	0.577	0.568	0.570	0.567	0.566	0.570	0.565	0.569	0.559	0.576	0.572	0.558	0.573
2	0.600	0.598	0.600	0.600	0.595	0.596	0.597	0.602	0.594	0.596	0.605	0.600	0.598	0.597	0.599	0.599	0.597	0.595	0.597	0.603	0.596	0.595	0.604
3	0.903	0.902	0.894	0.908	0.903	0.909	0.895	0.901	0.916	0.889	0.900	0.900	0.905	0.903	0.899	0.903	0.900	0.912	0.891	0.902	0.914	0.894	0.898
4	0.960*	0.961*	0.956*	0.962*	0.965*	0.966*	0.960*	0.957*	0.972*	0.958*	0.953*	0.959*	0.962*	0.963*	0.959*	0.960*	0.962*	0.970*	0.957*	0.956*	0.969*	0.961*	0.954*
5	0.651	0.652	0.655	0.649	0.654	0.650	0.656	0.651	0.648	0.659	0.650	0.653	0.651	0.652	0.654	0.651	0.654	0.650	0.658	0.650	0.648	0.658	0.651
6	0.714	0.714	0.717	0.713	0.711	0.710	0.715	0.716	0.706	0.716	0.719	0.715	0.713	0.712	0.715	0.714	0.713	0.708	0.717	0.717	0.709	0.714	0.718
7	0.542	0.542	0.540	0.543	0.544	0.545	0.542	0.541	0.548	0.541	0.539	0.541	0.543	0.543	0.542	0.542	0.543	0.547	0.541	0.540	0.546	0.542	0.539
8	0.571	0.570	0.574	0.569	0.566	0.565	0.570	0.574	0.561	0.571	0.578	0.572	0.569	0.568	0.571	0.570	0.569	0.562	0.572	0.575	0.563	0.569	0.576
9	1.000*	1.003*	1.003*	0.998*	1.007*	1.003*	1.008*	0.999*	1.002*	1.012*	0.994*	1.002*	1.002*	1.004*	1.004*	1.001*	1.005*	1.004*	1.009*	0.996*	1.001*	1.011*	0.997*
10	1.001*	1.003*	1.006*	0.999*	1.004*	1.000*	1.007*	1.002*	0.997*	1.011*	1.001*	1.003*	1.001*	1.003*	1.004*	1.002*	1.004*	0.999*	1.009*	1.000*	0.998*	1.008*	1.003*
11	0.944	0.944	0.953*	0.940	0.938	0.934	0.947	0.949	0.925	0.951*	0.955*	0.947	0.941	0.940	0.946	0.944	0.943	0.930	0.951*	0.950	0.930	0.946	0.954
12	0.572	0.572	0.568	0.574	0.574	0.576	0.570	0.570	0.580	0.568	0.568	0.570	0.573	0.573	0.570	0.572	0.572	0.578	0.568	0.570	0.578	0.570	0.568
13	0.571	0.572	0.571	0.572	0.573	0.573	0.572	0.571	0.574	0.571	0.570	0.571	0.572	0.572	0.571	0.571	0.572	0.574	0.571	0.570	0.573	0.572	0.570
14	0.857	0.856	0.859	0.855	0.853	0.852	0.856	0.858	0.849	0.857	0.861	0.857	0.855	0.854	0.856	0.856	0.855	0.850	0.857	0.859	0.851	0.855	0.861
15	0.885	0.884	0.879	0.888	0.884	0.888	0.880	0.883	0.893	0.875	0.883	0.883	0.886	0.885	0.882	0.885	0.883	0.890	0.877	0.885	0.891	0.878	0.882
16	1.001*	1.000*	0.996*	1.003*	1.001*	1.004*	0.997*	0.999*	1.008*	0.994*	0.998*	0.999*	1.001*	1.001*	0.998*	1.000*	0.999*	1.005*	0.995*	1.000*	1.006*	0.996*	0.997*
17	0.999*	0.997*	0.992*	1.003*	0.994*	1.001*	0.990*	0.999*	1.005*	0.984*	1.001*	0.996*	0.999*	0.997*	0.994*	0.998*	0.995*	1.002*	0.986*	1.001*	1.004*	0.987*	0.998*
18	0.999*	1.000*	1.001*	0.999*	1.001*	1.000*	1.002*	0.999*	0.999*	1.004*	0.998*	1.000*	1.000*	1.000*	1.001*	1.000*	1.001*	1.000*	1.003*	0.998*	0.999*	1.003*	0.999*
19	0.887	0.887	0.889	0.886	0.887	0.886	0.889	0.887	0.885	0.890	0.887	0.888	0.887	0.887	0.888	0.887	0.888	0.886	0.890	0.887	0.885	0.889	0.888
20	0.914	0.915	0.914	0.914	0.917	0.916	0.916	0.913	0.917	0.917	0.912	0.915	0.915	0.916	0.915	0.915	0.916	0.917	0.916	0.913	0.916	0.917	0.912
21	0.944	0.948	0.952*	0.940	0.952*	0.944	0.956*	0.944	0.941	0.964*	0.940	0.948	0.946	0.949	0.951*	0.946	0.951*	0.945	0.960*	0.940	0.941	0.960*	0.944
Máximo	1.001	1.003	1.006	1.003	1.007	1.004	1.008	1.002	1.008	1.012	1.001	1.003	1.002	1.004	1.004	1.002	1.005	1.005	1.009	1.001	1.006	1.011	1.003
Promedio	0.814	0.814	0.814	0.814	0.814	0.814	0.814	0.814	0.814	0.813	0.814	0.814	0.814	0.814	0.814	0.814	0.814	0.814	0.813	0.814	0.814	0.814	0.814
Mínimo	0.542	0.542	0.540	0.543	0.544	0.545	0.542	0.541	0.548	0.541	0.539	0.541	0.543	0.543	0.542	0.542	0.543	0.547	0.541	0.540	0.546	0.542	0.539

Tabla B.29: Saturación estática media (η°_{med}) de las estaciones de trabajo ($\forall k \in K$) en función de la composición ($d_i, \forall i \in I$) del mix de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$), para un factor de actividad normal ($\alpha_{i,k} = 1, \forall i \in I; \forall k \in K$). Se marcan con * aquellas estaciones cuya saturación media supera el valor límite de $\eta^{\infty}_{med} = 0.95$.

k	$\eta^{\circ}_{med}\left(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}\left(\overline{\alpha^S}\right)\right)$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.553	0.549	0.548	0.556	0.545	0.551	0.543	0.554	0.553	0.537	0.558	0.550	0.551	0.549	0.548	0.552	0.547	0.550	0.541	0.557	0.554	0.540	0.555
2	0.581	0.579	0.581	0.580	0.576	0.577	0.578	0.582	0.575	0.576	0.586	0.580	0.579	0.578	0.579	0.580	0.578	0.575	0.578	0.584	0.577	0.576	0.584
3	0.874	0.873	0.866	0.879	0.874	0.880	0.867	0.872	0.887	0.860	0.871	0.871	0.875	0.874	0.870	0.874	0.871	0.882	0.862	0.873	0.884	0.865	0.869
4	0.929	0.930	0.925	0.931	0.934	0.935	0.929	0.926	0.940	0.928	0.922	0.928	0.931	0.932	0.928	0.929	0.931	0.938	0.927	0.925	0.937	0.930	0.923
5	0.630	0.631	0.633	0.628	0.633	0.629	0.635	0.630	0.627	0.638	0.629	0.632	0.630	0.631	0.633	0.630	0.632	0.629	0.637	0.629	0.627	0.636	0.630
6	0.691	0.691	0.694	0.690	0.688	0.687	0.692	0.693	0.684	0.693	0.696	0.692	0.690	0.689	0.692	0.691	0.690	0.685	0.693	0.694	0.686	0.691	0.695
7	0.525	0.525	0.522	0.526	0.527	0.528	0.524	0.523	0.530	0.523	0.521	0.524	0.526	0.526	0.524	0.525	0.525	0.529	0.523	0.523	0.529	0.524	0.522
8	0.552	0.551	0.556	0.551	0.548	0.547	0.552	0.555	0.543	0.552	0.559	0.553	0.550	0.550	0.552	0.552	0.551	0.544	0.554	0.556	0.545	0.551	0.558
9	0.968*	0.971*	0.971*	0.966*	0.975*	0.970*	0.975*	0.966*	0.970*	0.980*	0.962*	0.970*	0.970*	0.972*	0.972*	0.969*	0.973*	0.972*	0.977*	0.964*	0.969*	0.978*	0.965*
10	0.969*	0.971*	0.973*	0.967*	0.971*	0.968*	0.974*	0.970*	0.965*	0.978*	0.969*	0.971*	0.969*	0.970*	0.972*	0.970*	0.972*	0.967*	0.976*	0.968*	0.966*	0.976*	0.970*
11	0.914	0.913	0.922	0.910	0.908	0.904	0.917	0.918	0.895	0.920	0.924	0.916	0.910	0.910	0.916	0.914	0.913	0.900	0.921	0.919	0.900	0.916	0.923
12	0.554	0.554	0.550	0.556	0.556	0.558	0.552	0.552	0.562	0.549	0.549	0.552	0.555	0.555	0.552	0.554	0.554	0.560	0.550	0.552	0.560	0.552	0.550
13	0.553	0.553	0.552	0.553	0.554	0.554	0.553	0.552	0.556	0.553	0.551	0.553	0.554	0.554	0.553	0.553	0.553	0.555	0.553	0.552	0.555	0.553	0.552
14	0.829	0.828	0.831	0.828	0.825	0.825	0.829	0.831	0.822	0.829	0.834	0.829	0.827	0.827	0.829	0.829	0.827	0.823	0.830	0.832	0.824	0.828	0.833
15	0.857	0.855	0.851	0.859	0.856	0.860	0.851	0.855	0.864	0.847	0.855	0.854	0.857	0.856	0.854	0.856	0.854	0.861	0.849	0.856	0.862	0.850	0.853
16	0.968*	0.968*	0.964*	0.971*	0.969*	0.971*	0.965*	0.967*	0.975*	0.962*	0.966*	0.966*	0.969*	0.969*	0.966*	0.968*	0.967*	0.973*	0.963*	0.967*	0.974*	0.964*	0.965*
17	0.967*	0.964*	0.960*	0.971*	0.962*	0.969*	0.958*	0.966*	0.973*	0.952*	0.968*	0.964*	0.967*	0.965*	0.962*	0.966*	0.963*	0.969*	0.955*	0.969*	0.972*	0.955*	0.966*
18	0.967*	0.968*	0.969*	0.966*	0.969*	0.967*	0.970*	0.967*	0.967*	0.971*	0.966*	0.968*	0.967*	0.968*	0.969*	0.967*	0.969*	0.967*	0.971*	0.966*	0.967*	0.971*	0.967*
19	0.858	0.859	0.860	0.858	0.859	0.858	0.860	0.859	0.856	0.861	0.859	0.859	0.858	0.859	0.859	0.858	0.859	0.857	0.861	0.858	0.857	0.860	0.859
20	0.885	0.886	0.885	0.885	0.887	0.887	0.886	0.884	0.888	0.887	0.882	0.885	0.886	0.886	0.886	0.885	0.886	0.887	0.886	0.883	0.887	0.887	0.883
21	0.914	0.918	0.921	0.910	0.922	0.914	0.925	0.914	0.911	0.933	0.910	0.918	0.915	0.918	0.920	0.915	0.920	0.914	0.929	0.910	0.910	0.929	0.913
Máximo	0.969	0.971	0.973	0.971	0.975	0.971	0.975	0.970	0.975	0.980	0.969	0.971	0.970	0.972	0.972	0.970	0.973	0.973	0.977	0.969	0.974	0.978	0.970
Promedio	0.787	0.787	0.787	0.788	0.787	0.788	0.787	0.787	0.788	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.787	0.788	0.787	0.787	0.788	0.787	0.787
Mínimo	0.525	0.525	0.522	0.526	0.527	0.528	0.524	0.523	0.530	0.523	0.521	0.524	0.526	0.526	0.524	0.525	0.525	0.529	0.523	0.523	0.529	0.524	0.522

Tabla B.30: Saturación estática media (η°_{med}) de las estaciones de trabajo ($\forall k \in K$) en función de la composición ($d_i, \forall i \in I$) del mix de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$) y en función del factor de actividad promedio correspondiente a la función escalón ($\alpha_{i,k} \cong \overline{\alpha^S}, \forall i \in I; \forall k \in K$).Se marcan con * aquellas estaciones cuya saturación media supera el valor límite de $\eta^{\infty}_{med} = 0.95$.

k	$\eta^{\circ}_{med}\left(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}\left(\overline{\alpha^T}\right)\right)$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.544	0.541	0.539	0.547	0.536	0.543	0.535	0.545	0.544	0.528	0.549	0.541	0.542	0.540	0.539	0.543	0.538	0.542	0.532	0.549	0.545	0.531	0.546
2	0.571	0.570	0.572	0.571	0.567	0.568	0.569	0.573	0.566	0.567	0.576	0.571	0.570	0.569	0.570	0.571	0.569	0.566	0.569	0.575	0.568	0.567	0.575
3	0.860	0.859	0.852	0.865	0.860	0.866	0.853	0.858	0.873	0.847	0.857	0.857	0.862	0.860	0.856	0.860	0.858	0.868	0.848	0.859	0.870	0.851	0.855
4	0.914	0.915	0.910	0.916	0.919	0.920	0.914	0.911	0.926	0.913	0.907	0.913	0.917	0.917	0.914	0.915	0.916	0.923	0.912	0.910	0.922	0.915	0.908
5	0.620	0.621	0.623	0.618	0.623	0.619	0.625	0.620	0.617	0.628	0.619	0.622	0.620	0.621	0.623	0.620	0.622	0.619	0.626	0.619	0.617	0.626	0.620
6	0.680	0.680	0.683	0.679	0.677	0.676	0.681	0.682	0.673	0.682	0.685	0.681	0.679	0.678	0.681	0.680	0.679	0.674	0.682	0.683	0.675	0.680	0.684
7	0.516	0.517	0.514	0.518	0.518	0.519	0.516	0.515	0.522	0.515	0.513	0.516	0.517	0.518	0.516	0.516	0.517	0.521	0.515	0.515	0.520	0.516	0.514
8	0.544	0.543	0.547	0.542	0.539	0.538	0.543	0.546	0.534	0.544	0.550	0.544	0.542	0.541	0.544	0.543	0.542	0.536	0.545	0.547	0.537	0.542	0.549
9	0.952*	0.955*	0.956*	0.951*	0.959*	0.955*	0.960*	0.951*	0.955*	0.964*	0.947	0.955*	0.954*	0.956*	0.956*	0.953*	0.957*	0.956*	0.961*	0.948	0.953*	0.963*	0.950
10	0.954*	0.955*	0.958*	0.951*	0.956*	0.952*	0.959*	0.954*	0.950	0.962*	0.953*	0.956*	0.954*	0.955*	0.957*	0.954*	0.956*	0.952*	0.961*	0.953*	0.950	0.960*	0.955*
11	0.899	0.899	0.907	0.895	0.893	0.890	0.902	0.904	0.881	0.905	0.909	0.902	0.896	0.895	0.901	0.899	0.898	0.885	0.906	0.904	0.886	0.901	0.908
12	0.545	0.545	0.541	0.547	0.547	0.549	0.543	0.543	0.553	0.541	0.541	0.543	0.546	0.546	0.543	0.545	0.545	0.551	0.541	0.543	0.551	0.543	0.541
13	0.544	0.544	0.543	0.545	0.545	0.546	0.544	0.543	0.547	0.544	0.542	0.544	0.545	0.545	0.544	0.544	0.545	0.546	0.544	0.543	0.546	0.545	0.543
14	0.816	0.815	0.818	0.815	0.812	0.812	0.815	0.818	0.809	0.816	0.820	0.816	0.814	0.814	0.816	0.815	0.814	0.810	0.817	0.818	0.811	0.815	0.820
15	0.843	0.842	0.837	0.846	0.842	0.846	0.838	0.841	0.850	0.834	0.841	0.841	0.843	0.843	0.840	0.842	0.841	0.847	0.835	0.843	0.849	0.837	0.840
16	0.953*	0.952*	0.949	0.955*	0.953*	0.956*	0.950	0.951*	0.960*	0.947	0.950	0.951*	0.954*	0.953*	0.951*	0.953*	0.952*	0.957*	0.948	0.952*	0.958*	0.949	0.950
17	0.952*	0.949	0.945	0.955*	0.947	0.953*	0.943	0.951*	0.957*	0.937	0.953*	0.949	0.951*	0.950	0.947	0.951*	0.947	0.954*	0.939	0.954*	0.957*	0.940	0.950
18	0.952*	0.953*	0.953*	0.951*	0.954*	0.952*	0.954*	0.952*	0.951*	0.956*	0.951*	0.953*	0.952*	0.953*	0.953*	0.952*	0.953*	0.952*	0.955*	0.951*	0.951*	0.955*	0.952*
19	0.845	0.845	0.846	0.844	0.845	0.844	0.846	0.845	0.843	0.848	0.845	0.845	0.845	0.845	0.846	0.845	0.845	0.844	0.847	0.845	0.843	0.847	0.845
20	0.871	0.872	0.871	0.871	0.873	0.872	0.872	0.870	0.873	0.873	0.868	0.871	0.872	0.872	0.872	0.871	0.872	0.873	0.872	0.869	0.873	0.873	0.869
21	0.899	0.903	0.906	0.896	0.907	0.899	0.910	0.899	0.896	0.918	0.895	0.903	0.901	0.903	0.906	0.901	0.906	0.900	0.914	0.895	0.896	0.914	0.899
Máximo	0.954	0.955	0.958	0.955	0.959	0.956	0.960	0.954	0.960	0.964	0.953	0.956	0.954	0.956	0.957	0.954	0.957	0.957	0.961	0.954	0.958	0.963	0.955
Promedio	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775	0.775
Mínimo	0.516	0.517	0.514	0.518	0.518	0.519	0.516	0.515	0.522	0.515	0.513	0.516	0.517	0.518	0.516	0.516	0.517	0.521	0.515	0.515	0.520	0.516	0.514

Tabla B.31: Saturación estática media (η°_{med}) de las estaciones de trabajo ($\forall k \in K$) en función de la composición ($d_i, \forall i \in I$) del mix de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$) y en función del factor de actividad promedio correspondiente a la función triangular ($\alpha_{i,k} \cong \overline{\alpha^T}, \forall i \in I; \forall k \in K$). Se marcan con * aquellas estaciones cuya saturación media supera el valor límite de $\eta^{\infty}_{med} = 0.95$.

k	$\eta^{\circ}_{med}\left(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}\left(\overline{\alpha^{Z}} = \overline{\alpha^{P}}\right)\right)$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.536	0.532	0.531	0.538	0.528	0.534	0.526	0.536	0.536	0.520	0.541	0.533	0.534	0.532	0.531	0.534	0.530	0.533	0.524	0.540	0.537	0.523	0.537
2	0.563	0.561	0.563	0.562	0.558	0.559	0.560	0.564	0.557	0.558	0.567	0.562	0.561	0.560	0.561	0.562	0.560	0.557	0.560	0.566	0.559	0.558	0.566
3	0.847	0.845	0.838	0.851	0.846	0.852	0.839	0.844	0.859	0.833	0.843	0.844	0.848	0.847	0.843	0.846	0.844	0.855	0.835	0.846	0.857	0.838	0.842
4	0.900	0.901	0.896	0.902	0.905	0.906	0.900	0.897	0.911	0.899	0.893	0.899	0.902	0.903	0.899	0.900	0.902	0.909	0.898	0.896	0.908	0.901	0.894
5	0.610	0.612	0.614	0.608	0.613	0.610	0.615	0.611	0.608	0.618	0.609	0.612	0.610	0.611	0.613	0.611	0.613	0.609	0.617	0.609	0.608	0.616	0.611
6	0.670	0.669	0.673	0.668	0.667	0.666	0.670	0.672	0.662	0.671	0.674	0.670	0.668	0.668	0.670	0.669	0.669	0.664	0.672	0.672	0.664	0.670	0.674
7	0.508	0.509	0.506	0.509	0.510	0.511	0.508	0.507	0.513	0.507	0.505	0.508	0.509	0.509	0.508	0.508	0.509	0.512	0.507	0.507	0.512	0.508	0.506
8	0.535	0.534	0.538	0.534	0.530	0.530	0.535	0.538	0.526	0.535	0.541	0.536	0.533	0.532	0.535	0.535	0.533	0.527	0.536	0.539	0.528	0.534	0.540
9	0.938	0.940	0.941	0.936	0.944	0.940	0.945	0.936	0.940	0.949	0.932	0.940	0.939	0.941	0.941	0.938	0.942	0.941	0.946	0.933	0.938	0.948	0.935
10	0.939	0.940	0.943	0.937	0.941	0.938	0.944	0.939	0.935	0.947	0.938	0.941	0.939	0.940	0.942	0.939	0.941	0.937	0.946	0.938	0.935	0.945	0.940
11	0.885	0.885	0.893	0.881	0.879	0.876	0.888	0.890	0.868	0.891	0.895	0.888	0.882	0.881	0.887	0.885	0.884	0.871	0.892	0.890	0.872	0.887	0.894
12	0.536	0.536	0.532	0.538	0.538	0.540	0.534	0.534	0.544	0.532	0.532	0.535	0.538	0.538	0.535	0.536	0.536	0.542	0.532	0.534	0.542	0.534	0.532
13	0.536	0.536	0.535	0.536	0.537	0.537	0.536	0.535	0.538	0.536	0.534	0.535	0.536	0.536	0.536	0.536	0.536	0.538	0.536	0.535	0.538	0.536	0.534
14	0.803	0.802	0.805	0.802	0.799	0.799	0.803	0.805	0.796	0.803	0.807	0.803	0.801	0.801	0.803	0.803	0.802	0.797	0.804	0.806	0.798	0.802	0.807
15	0.830	0.829	0.824	0.832	0.829	0.833	0.825	0.828	0.837	0.821	0.828	0.828	0.830	0.830	0.827	0.829	0.828	0.834	0.822	0.829	0.835	0.823	0.827
16	0.938	0.937	0.934	0.940	0.938	0.941	0.935	0.937	0.945	0.932	0.936	0.936	0.939	0.938	0.936	0.938	0.937	0.942	0.933	0.937	0.943	0.934	0.935
17	0.937	0.934	0.930	0.940	0.932	0.938	0.928	0.936	0.942	0.922	0.938	0.934	0.936	0.935	0.932	0.936	0.932	0.939	0.925	0.939	0.942	0.926	0.936
18	0.937	0.938	0.938	0.936	0.939	0.937	0.939	0.937	0.936	0.941	0.936	0.938	0.937	0.938	0.938	0.937	0.938	0.937	0.940	0.936	0.936	0.940	0.937
19	0.832	0.832	0.833	0.831	0.832	0.831	0.833	0.832	0.830	0.834	0.832	0.832	0.831	0.832	0.833	0.832	0.832	0.830	0.834	0.831	0.830	0.834	0.832
20	0.857	0.858	0.857	0.857	0.860	0.859	0.859	0.856	0.860	0.859	0.855	0.857	0.858	0.859	0.858	0.857	0.858	0.860	0.858	0.856	0.859	0.859	0.855
21	0.885	0.889	0.892	0.882	0.893	0.885	0.896	0.885	0.882	0.904	0.881	0.889	0.887	0.889	0.892	0.887	0.892	0.886	0.900	0.881	0.882	0.900	0.885
Máximo	0.939	0.940	0.943	0.940	0.944	0.941	0.945	0.939	0.945	0.949	0.938	0.941	0.939	0.941	0.942	0.939	0.942	0.942	0.946	0.939	0.943	0.948	0.940
Promedio	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763	0.763
Mínimo	0.508	0.509	0.506	0.509	0.510	0.511	0.508	0.507	0.513	0.507	0.505	0.508	0.509	0.509	0.508	0.508	0.509	0.512	0.507	0.507	0.512	0.508	0.506

Tabla B.32: Saturación estática media (η°_{med}) de las estaciones de trabajo ($\forall k \in K$) en función de la composición ($d_i, \forall i \in I$) del mix de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$) y en función del factor de actividad promedio correspondiente a la función trapezoidal o parabólica ($\alpha_{i,k} \cong \overline{\alpha^{Z}} = \overline{\alpha^{P}}, \forall i \in I; \forall k \in K$).

k	$w_0\left(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}\left(\overline{\alpha^N}\right), \eta_{med}^{\infty}\right)$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	472.5	520.5	262.5	577.5	715.5	772.5	457.5	325.5	1030.5	400.5	130.5	415.5	589.5	619.5	445.5	490.5	550.5	925.5	352.5	277.5	877.5	505.5	172.5
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	2362.5	2506.5	2522.5	2282.5	2711.5	2487.5	2727.5	2301.5	2471.5	2951.5	2096.5	2468.5	2455.5	2550.5	2563.5	2411.5	2601.5	2551.5	2807.5	2157.5	2407.5	2871.5	2237.5
10	2422.5	2499.5	2632.5	2317.5	2544.5	2362.5	2677.5	2454.5	2229.5	2859.5	2409.5	2523.5	2431.5	2481.5	2573.5	2449.5	2549.5	2334.5	2782.5	2377.5	2257.5	2754.5	2482.5
11	0.0	0.0	122.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.5	214.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	62.5	0.0	0.0	0.0	182.5
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	2392.5	2358.5	2182.5	2497.5	2403.5	2542.5	2227.5	2313.5	2718.5	2088.5	2268.5	2294.5	2422.5	2402.5	2274.5	2378.5	2338.5	2613.5	2122.5	2347.5	2647.5	2193.5	2242.5
17	2332.5	2198.5	1992.5	2502.5	2098.5	2402.5	1892.5	2298.5	2608.5	1588.5	2398.5	2171.5	2310.5	2220.5	2081.5	2288.5	2108.5	2438.5	1722.5	2432.5	2572.5	1758.5	2262.5
18	2332.5	2374.5	2412.5	2292.5	2424.5	2342.5	2462.5	2324.5	2304.5	2544.5	2274.5	2372.5	2341.5	2371.5	2402.5	2344.5	2404.5	2344.5	2502.5	2282.5	2302.5	2504.5	2322.5
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	82.5	0.0	114.5	0.0	277.5	0.0	0.0	654.5	0.0	0.0	0.0	0.0	52.5	0.0	44.5	0.0	457.5	0.0	0.0	474.5	0.0
W_0	12315.0	12458.0	12210.0	12470.0	13012.5	12910.0	12722.5	12018.0	13363.0	13122.0	11792.5	12246.0	12551.0	12646.0	12393.5	12363.0	12597.5	13208.0	12810.0	11875.0	13065.0	13062.5	11902.5

Tabla B.33: Sobrecarga inevitable asociada a cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$) y a las condiciones de negociación de la compañía ($\eta_{med}^{\infty} = 0.95$), considerando un factor de activación medio igual a 1 ($\alpha_{i,k} = 1, \forall i \in I; \forall k \in K$), es decir, considerando que se trabaja a actividad normal durante toda la jornada laboral.

k	$w_0\left(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}\left(\overline{\alpha^S}\right), \eta^{\infty}_{med}\right)$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	838.3	977.7	993.2	760.9	1176.1	959.3	1191.5	779.3	943.8	1408.3	580.9	940.9	928.3	1020.3	1032.8	885.7	1069.6	1021.2	1269.0	639.9	881.9	1330.9	717.4
10	896.4	970.9	1099.6	794.8	1014.5	838.3	1143.2	927.4	709.6	1319.3	883.8	994.1	905.1	953.5	1042.5	922.5	1019.3	811.2	1244.8	852.8	736.7	1217.7	954.5
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	867.4	834.5	664.1	969.0	878.0	1012.5	707.7	790.9	1182.8	573.2	747.4	772.5	896.4	877.0	753.2	853.8	815.1	1081.2	606.1	823.8	1114.1	674.8	722.2
17	809.3	679.6	480.3	973.8	582.8	877.0	383.5	776.4	1076.4	89.3	873.2	653.5	788.0	700.9	566.4	766.7	592.5	911.9	219.0	906.1	1041.5	253.8	741.5
18	809.3	849.9	886.7	770.6	898.3	819.0	935.1	801.5	782.2	1014.5	753.2	848.0	818.0	847.0	877.0	820.9	879.0	820.9	973.8	760.9	780.3	975.7	799.6
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W_0	4220.6	4312.6	4123.9	4269.0	4549.7	4506.1	4361.0	4075.5	4694.8	4404.5	3838.4	4209.0	4335.8	4398.7	4271.9	4249.7	4375.5	4646.4	4312.6	3983.5	4554.5	4452.9	3935.2

Tabla B.34: Sobrecarga inevitable, asociada a cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$) y a las condiciones de negociación de la compañía ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$), considerando un factor de activación medio igual a $1.0\widehat{33}$ ($\alpha_{i,k} = 1.0\widehat{33}, \forall i \in I; \forall k \in K$), es decir, considerando que se trabaja según la función escalón para el factor de actividad.

k	$w_0\left(k, c, \vec{d}, \mathrm{P}, \mathrm{A}\left(\overline{\alpha^T}\right), \eta_{med}^{\infty}\right)$																					
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	112.5	249.6	264.9	36.3	444.9	231.5	460.1	54.4	216.3	673.5	0.0	213.5	201.1	291.5	303.9	159.2	340.1	292.5	536.3	0.0	155.4	597.3	0.0
10	169.6	243.0	369.6	69.6	285.8	112.5	412.5	200.1	0.0	585.8	157.3	265.8	178.2	225.8	313.5	195.4	290.6	85.8	512.5	126.8	12.5	485.8	226.8
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	141.1	108.7	0.0	241.1	151.5	283.9	0.0	65.8	451.5	0.0	23.0	47.7	169.6	150.6	28.7	127.7	89.6	351.5	0.0	98.2	383.9	0.0	0.0
17	83.9	0.0	0.0	245.8	0.0	150.6	0.0	51.5	346.8	0.0	146.8	0.0	63.0	0.0	0.0	42.0	0.0	184.9	0.0	179.2	312.5	0.0	17.3
18	83.9	123.9	160.1	45.8	171.5	93.5	207.7	76.3	57.3	285.8	28.7	122.0	92.5	121.1	150.6	95.4	152.5	95.4	245.8	36.3	55.4	247.7	74.4
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W_0	591.1	725.2	794.6	638.7	1053.8	872.0	1080.4	448.2	1071.9	1545.1	355.7	649.0	704.4	789.0	796.7	619.6	872.9	1010.1	1294.6	440.5	919.6	1330.8	318.5

Tabla B.35: Sobrecarga inevitable, asociada a cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$) y a las condiciones de negociación de la compañía ($\eta_{med}^{\infty} = 0.95$), considerando un factor de activación medio igual a 1.05 ($\alpha_{i,k} = 1.05, \forall i \in I; \forall k \in K$), es decir, considerando que se trabaja según la función triangular para el factor de actividad.

Tablas B.36 y B.37

Recogen la sobrecarga (en segundos) por estación (w_k) y la sobrecarga global de la línea (W) generada por los modelos $M3 \cup 4_\eta$ y $M4 \cup 3_\eta$, respectivamente, cuando se limita la saturación media de la línea a 0.95 (η_{med}^{∞}), para cada uno de los ejemplares de datos del *Bloque-I* del caso NISSAN-9ENG.

Tablas B.38, B.39, B.40 y B.41

Muestran la sobrecarga de trabajo (en segundos) por estación (w_k) y la sobrecarga global de la línea (W) dada por el modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ cuando se limita la saturación media de los procesadores ($\eta_{med} \leqslant \eta_{med}^{\infty} = 0.95$) y cuando se consideran las siguientes funciones para el factor de actividad:

Tabla B.38: El factor de actividad sigue la función escalón ($\dot{\alpha}^S$) a lo largo del tiempo.

Tabla B.39: El factor de actividad sigue la función triangular ($\dot{\alpha}^T$) a lo largo del tiempo.

Tabla B.40: Función lineal constante cuyo valor corresponde al valor medio de la función escalón ($\overline{\alpha^S} = 1.0\widehat{33}$).

Tabla B.41: Función lineal constante cuyo valor corresponde al valor medio de la función triangular ($\overline{\alpha^T} = 1.05$).

Tablas B.42, B.43, B.44 y B.45

Al igual que las tablas anteriores, estas tablas recogen la sobrecarga de trabajo (en segundos) por estación (w_k) y la sobrecarga global de la línea (W), pero en este caso dada por el modelo $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$ cuando se limita la saturación media de los procesadores ($\eta_{med} \leqslant \eta_{med}^{\infty} = 0.95$) y cuando se consideran las siguientes funciones para el factor de actividad:

Tabla B.42: El factor de actividad sigue la función escalón ($\dot{\alpha}^S$) a lo largo del tiempo.

Tabla B.43: El factor de actividad sigue la función triangular ($\dot{\alpha}^T$) a lo largo del tiempo.

Tabla B.44: Función lineal constante cuyo valor corresponde al valor medio de la función escalón ($\overline{\alpha^S} = 1.0\widehat{33}$).

Tabla B.45: Función lineal constante cuyo valor corresponde al valor medio de la función triangular ($\overline{\alpha^T} = 1.05$).

k	$W_{3\cup 4_\eta}$																						
	$\#1$	$\#2$	$\#3$	$\#4$	$\#5$	$\#6$	$\#7$	$\#8$	$\#9$	$\#10$	$\#11$	$\#12$	$\#13$	$\#14$	$\#15$	$\#16$	$\#17$	$\#18$	$\#19$	$\#20$	$\#21$	$\#22$	$\#23$
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	472.5	520.5	262.5	577.5	715.5	772.5	457.5	325.5	1030.5	400.5	130.5	415.5	589.5	619.5	445.5	490.5	550.5	925.5	352.5	277.5	877.5	505.5	172.5
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	2362.5	2506.5	2522.5	2282.5	2711.5	2487.5	2727.5	2301.5	2471.5	2951.5	2096.5	2468.5	2455.5	2550.5	2563.5	2411.5	2601.5	2551.5	2807.5	2157.5	2407.5	2871.5	2237.5
10	2422.5	2499.5	2632.5	2317.5	2544.5	2362.5	2677.5	2454.5	2229.5	2859.5	2409.5	2523.5	2431.5	2481.5	2573.5	2449.5	2549.5	2334.5	2782.5	2377.5	2257.5	2754.5	2482.5
11	0.0	0.0	122.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.5	214.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	62.5	0.0	0.0	0.0	182.5
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	2392.5	2358.5	2182.5	2497.5	2403.5	2542.5	2227.5	2313.5	2718.5	2088.5	2268.5	2294.5	2422.5	2402.5	2274.5	2378.5	2338.5	2613.5	2122.5	2347.5	2647.5	2193.5	2242.5
17	2332.5	2198.5	1992.5	2502.5	2098.5	2402.5	1892.5	2298.5	2608.5	1588.5	2398.5	2171.5	2310.5	2220.5	2081.5	2288.5	2108.5	2438.5	1722.5	2432.5	2572.5	1758.5	2262.5
18	2332.5	2374.5	2412.5	2292.5	2424.5	2342.5	2462.5	2324.5	2304.5	2544.5	2274.5	2372.5	2341.5	2371.5	2402.5	2344.5	2404.5	2344.5	2502.5	2282.5	2302.5	2504.5	2322.5
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	82.5	0.0	114.5	0.0	277.5	0.0	0.0	654.5	0.0	0.0	0.0	0.0	52.5	0.0	44.5	0.0	457.5	0.0	0.0	474.5	0.0
W	12315	12458	12210	12470	13012.5	12910	12722.5	12018	13363	13122	11792.5	12246	12551	12646	12393.5	12363	12597.5	13208	12810	11875	13065	13062.5	11902.5

Tabla B.36: Sobrecarga real de las estaciones, dada por el modelo $M3 \cup 4_\eta$, cuando se limita la saturación dinámica media de los procesadores a 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$), para cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$).

k	$W_{4\cup 3_\eta}$																					
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	472.5	520.5	262.5	577.5	715.5	772.5	457.5	325.5	1030.5	400.5	130.5	415.5	589.5	619.5	445.5	490.5	550.5	925.5	352.5	277.5	877.5	505.5	172.5
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	2362.5	2506.5	2522.5	2282.5	2711.5	2487.5	2727.5	2301.5	2471.5	2951.5	2096.5	2468.5	2455.5	2550.5	2563.5	2411.5	2601.5	2551.5	2807.5	2157.5	2407.5	2871.5	2237.5
10	2422.5	2499.5	2632.5	2317.5	2544.5	2362.5	2677.5	2454.5	2229.5	2859.5	2409.5	2523.5	2431.5	2481.5	2573.5	2449.5	2549.5	2334.5	2782.5	2377.5	2257.5	2754.5	2482.5
11	0.0	0.0	122.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.5	214.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	62.5	0.0	0.0	0.0	182.5
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	2392.5	2358.5	2182.5	2497.5	2403.5	2542.5	2227.5	2313.5	2718.5	2088.5	2268.5	2294.5	2422.5	2402.5	2274.5	2378.5	2338.5	2613.5	2122.5	2347.5	2647.5	2193.5	2242.5
17	2332.5	2198.5	1992.5	2502.5	2098.5	2402.5	1892.5	2298.5	2608.5	1588.5	2398.5	2171.5	2310.5	2220.5	2081.5	2288.5	2108.5	2438.5	1722.5	2432.5	2572.5	1758.5	2262.5
18	2332.5	2374.5	2412.5	2292.5	2424.5	2342.5	2462.5	2324.5	2304.5	2544.5	2274.5	2372.5	2341.5	2371.5	2402.5	2344.5	2404.5	2344.5	2502.5	2282.5	2302.5	2504.5	2322.5
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	82.5	0.0	114.5	0.0	277.5	0.0	0.0	654.5	0.0	0.0	0.0	0.0	52.5	0.0	44.5	0.0	457.5	0.0	0.0	474.5	0.0
W	12315	12458	12210	12470	13012.5	12910	12722.5	12018	13363	13122	11792.5	12246	12551	12646	12393.5	12363	12597.5	13208	12810	11875	13065	13062.5	11902.5

Tabla B.37: Sobrecarga real de las estaciones, dada por el modelo $M4 \cup 3_\eta$, cuando se limita la saturación dinámica media de los procesadores a 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$), para cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$).

k	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta\ (\dot{\alpha}^S)$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	923.05	1061.6	1071.0	849.4	1266.4	1049.9	1273.3	861.1	1041.1	1495.0	662.8	1023.0	1014.8	1106.1	1114.3	970.2	1153.0	1115.5	1351.0	722.6	976.2	1417.3	797.0
10	987.96	1062.2	1187.6	889.8	1108.9	933.4	1232.8	1018.0	808.6	1411.5	973.0	1084.3	997.7	1045.9	1132.5	1014.0	1110.4	908.0	1334.5	945.7	833.9	1309.8	1043.9
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	936.5	893.0	726.7	1033.8	927.7	1064.7	760.8	864.6	1228.4	626.3	834.1	836.6	956.8	930.4	810.2	919.3	866.6	1128.6	660.3	899.2	1168.3	726.8	802.0
17	908.1	782.3	589.2	1065.4	680.1	972.7	490.5	875.8	1165.0	191.8	967.2	757.2	887.2	802.7	672.7	866.9	697.8	1003.8	325.8	999.0	1131.8	356.5	841.8
18	846.1	893.6	934.7	811.1	946.7	861.6	986.5	840.0	823.6	1071.0	794.0	889.7	858.6	892.2	923.3	860.0	927.2	864.9	1029.0	803.4	818.9	1028.5	838.4
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W	4601.8	4692.7	4509.2	4649.5	4929.8	4882.2	4743.9	4459.6	5066.8	4795.6	4231.1	4590.8	4715.0	4777.3	4653.0	4630.4	4755.0	5020.7	4700.6	4370.0	4929.0	4838.9	4323.0

Tabla B.38: Sobrecarga real de las estaciones, dada por el modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$, cuando se limita la saturación dinámica media de los procesadores a 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$) y cuando el factor de actividad sigue la función escalón ($\dot{\alpha}_t = \dot{\alpha}^S\ \forall t$), para cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$).

k	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta\ (\dot{\alpha}^T)$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	160.13	297.5	299.5	86.3	491.6	284.2	502.9	100.1	274.7	716.3	0.0	254.6	250.4	341.0	345.6	206.9	383.6	348.5	575.6	0.0	210.3	637.9	38.8
10	225.07	296.5	413.6	128.0	335.2	169.6	461.4	254.1	47.2	632.6	207.3	317.1	233.6	280.0	363.9	250.3	341.1	144.7	557.9	178.9	72.3	529.8	277.9
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	166.2	131.5	0.0	261.2	174.4	296.5	11.7	99.2	455.6	0.0	65.5	79.5	189.2	169.1	58.1	151.5	115.9	358.0	0.0	132.3	393.8	0.0	41.6
17	131.8	5.9	0.0	289.9	0.0	195.8	0.0	101.0	387.4	0.0	193.5	0.0	110.5	25.9	0.0	90.6	0.0	228.6	0.0	224.3	354.2	0.0	68.2
18	112.9	153.5	182.3	77.7	201.7	126.4	236.1	102.7	93.3	311.5	54.5	149.9	123.3	152.2	178.9	124.6	181.7	130.4	269.9	64.3	89.7	272.8	97.5
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W	796.0	884.9	895.4	843.2	1202.9	1072.5	1212.2	657.1	1258.2	1660.4	520.8	801.1	907.0	968.3	946.6	823.9	1022.2	1210.2	1403.5	599.7	1120.4	1440.5	524.0

Tabla B.39: Sobrecarga real de las estaciones, dada por el modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$, cuando se limita la saturación dinámica media de los procesadores a 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$) y cuando el factor de actividad sigue la función triangular ($\dot{\alpha}_t = \dot{\alpha}^T\ \forall t$), para cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$).

k	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta\ (\overline{\alpha^S})$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	866.25	1010.3	1026.3	786.3	1215.3	991.3	1231.3	805.3	975.3	1455.3	600.3	972.3	959.3	1054.3	1067.3	915.3	1105.3	1055.3	1311.3	661.3	911.3	1375.3	741.3
10	926.25	1003.3	1136.3	821.3	1048.3	866.3	1181.3	958.3	733.3	1363.3	913.3	1027.3	935.3	985.3	1077.3	953.3	1053.3	838.3	1286.3	881.3	761.3	1258.3	986.3
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	896.2	862.2	686.3	1001.2	907.2	1046.3	731.3	817.2	1222.3	592.2	772.3	798.2	926.3	906.2	778.2	882.2	842.3	1117.2	626.3	851.3	1151.3	697.2	746.2
17	836.3	702.3	496.2	1006.2	602.2	906.3	396.2	802.3	1112.2	92.3	902.2	675.2	814.2	724.2	585.2	792.3	612.2	942.2	226.2	936.2	1076.2	262.3	766.2
18	836.3	878.3	916.3	796.3	928.2	846.3	966.3	828.2	808.3	1048.3	778.3	876.2	845.3	875.3	906.2	848.3	908.2	848.2	1006.3	786.3	806.2	1008.3	826.2
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W	4361.3	4456.3	4261.3	4411.3	4701.2	4656.3	4506.3	4211.2	4851.2	4551.2	3966.3	4349.2	4480.3	4545.3	4414.2	4391.3	4521.3	4801.2	4456.3	4116.3	4706.2	4601.2	4066.2

Tabla B.40: Sobrecarga real de las estaciones, dada por el modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$, cuando se limita la saturación dinámica media de los procesadores a 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$) y cuando el factor de actividad toma el valor promedio de la función escalón ($\dot{\alpha}_t = \overline{\alpha^S}\ \forall t$), para cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$).

k	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta\ (\overline{\alpha^T})$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	118.13	262.1	278.1	38.1	467.1	243.1	483.1	57.1	227.1	707.1	0.0	224.1	211.1	306.1	319.1	167.1	357.1	307.1	563.1	0.0	163.1	627.1	0.0
10	178.13	255.1	388.1	73.1	300.1	118.1	433.1	210.1	0.0	615.1	165.1	279.1	187.1	237.1	329.1	205.1	305.1	90.1	538.1	133.1	13.1	510.1	238.1
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	148.1	114.1	0.0	253.1	159.1	298.1	0.0	69.1	474.1	0.0	24.1	50.1	178.1	158.1	30.1	134.1	94.1	369.1	0.0	103.1	403.1	0.0	0.0
17	88.1	0.0	0.0	258.1	0.0	158.1	0.0	54.1	364.1	0.0	154.1	0.0	66.1	0.0	0.0	44.1	0.0	194.1	0.0	188.1	328.1	0.0	18.1
18	88.1	130.1	168.1	48.1	180.1	98.1	218.1	80.1	60.1	300.1	30.1	128.1	97.1	127.1	158.1	100.1	160.1	100.1	258.1	38.1	58.1	260.1	78.1
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W	620.6	761.5	834.4	670.6	1106.5	915.6	1134.4	470.6	1125.5	1622.4	373.5	681.5	739.6	828.5	836.5	650.6	916.5	1060.6	1359.4	462.5	965.6	1397.4	334.4

Tabla B.41: Sobrecarga real de las estaciones, dada por el modelo $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$, cuando se limita la saturación dinámica media de los procesadores a 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$) y cuando el factor de actividad toma el valor promedio de la función triangular ($\dot{\alpha}_t = \overline{\alpha^T}\ \forall t$), para cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$).

k	$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta\ (\dot{\alpha}^S)$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	923.05	1061.6	1071.0	849.4	1266.4	1049.9	1273.3	861.1	1041.1	1495.0	662.8	1023.0	1014.8	1106.1	1114.3	970.2	1153.0	1115.5	1351.0	722.6	976.2	1417.3	797.0
10	987.96	1062.2	1187.6	889.8	1108.9	933.4	1232.8	1018.0	808.6	1411.5	973.3	1084.3	997.7	1045.9	1132.5	1014.0	1110.4	908.0	1334.5	945.7	833.9	1309.8	1043.9
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	936.5	893.0	726.7	1033.8	927.7	1064.7	760.8	864.6	1228.4	626.3	833.3	836.6	956.8	930.4	810.2	919.3	866.6	1128.6	660.3	899.2	1168.3	726.8	802.0
17	908.1	782.3	589.2	1065.4	680.1	972.7	490.5	875.8	1165.0	191.8	967.1	757.2	887.2	802.7	672.7	866.9	697.8	1003.8	325.8	999.0	1131.8	356.5	841.8
18	846.1	893.6	934.7	811.1	946.7	861.6	986.5	840.0	823.6	1071.0	794.6	889.7	858.6	892.2	923.3	860.0	927.2	864.9	1029.0	803.4	818.9	1028.5	838.4
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W	4601.8	4692.7	4509.2	4649.5	4929.8	4882.2	4743.9	4459.6	5066.8	4795.6	4231.1	4590.8	4715.0	4777.3	4653.0	4630.4	4755.0	5020.7	4700.6	4370.0	4929.0	4838.9	4323.0

Tabla B.42: Sobrecarga real de las estaciones, dada por el modelo $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, cuando se limita la saturación dinámica media de los procesadores a 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$) y cuando el factor de actividad sigue la función escalón ($\dot{\alpha}_t = \dot{\alpha}^S\ \forall t$), para cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$).

k	$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta\ (\dot{\alpha}^T)$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	160.15	297.5	299.4	86.3	491.6	284.1	502.9	100.1	274.7	716.3	0.0	254.6	250.5	341.1	345.6	206.9	383.6	348.7	575.7	0.0	210.2	637.9	38.8
10	225.14	296.5	413.5	128.1	335.2	169.6	461.4	254.1	47.2	632.6	207.3	317.2	233.8	280.1	363.9	250.2	341.1	144.8	558.0	178.9	72.3	529.9	277.9
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	165.9	131.5	0.0	261.1	174.4	296.7	11.7	99.2	455.4	0.0	65.5	79.4	189.0	168.9	58.2	151.7	115.9	358.2	0.0	132.3	393.7	0.0	41.6
17	131.8	5.9	0.0	290.0	0.0	195.8	0.0	101.0	387.4	0.0	193.5	0.0	110.5	25.9	0.0	90.6	0.0	228.6	0.0	224.3	354.2	0.0	68.2
18	113.0	153.5	182.5	77.7	201.7	126.3	236.1	102.7	93.5	311.6	54.5	150.0	123.3	152.3	178.9	124.6	181.7	129.9	269.8	64.2	90.0	272.7	97.5
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W	796.0	884.9	895.4	843.1	1202.9	1072.5	1212.2	657.1	1258.3	1660.5	520.8	801.1	907.1	968.3	946.6	824.0	1022.2	1210.2	1403.5	599.7	1120.4	1440.5	524.0

Tabla B.43: Sobrecarga real de las estaciones, dada por el modelo $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, cuando se limita la saturación dinámica media de los procesadores a 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$) y cuando el factor de actividad sigue la función triangular ($\dot{\alpha}_t = \dot{\alpha}^T\ \forall t$), para cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$).

k	$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta\ (\overline{\alpha^S})$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	866.27	1010.3	1026.3	786.3	1215.3	991.3	1231.3	805.3	975.3	1455.3	600.3	972.3	959.3	1054.3	1067.3	915.3	1105.3	1055.3	1311.3	661.3	911.3	1375.3	741.3
10	926.27	1003.3	1136.3	821.3	1048.3	866.3	1181.3	958.3	733.3	1363.3	913.3	1027.3	935.3	985.3	1077.3	953.3	1053.3	838.3	1286.3	881.3	761.3	1258.3	986.3
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	896.3	862.3	686.3	1001.3	907.3	1046.3	731.3	817.3	1222.3	592.3	772.3	798.3	926.3	906.3	778.3	882.3	842.3	1117.3	626.3	851.3	1151.3	697.3	746.3
17	836.3	702.3	496.3	1006.3	602.3	906.3	396.3	802.3	1112.3	92.3	902.3	675.3	814.3	724.3	585.3	792.3	612.3	942.3	226.3	936.3	1076.3	262.3	766.3
18	836.3	878.3	916.3	796.3	928.3	846.3	966.3	828.3	808.3	1048.3	778.3	876.3	845.3	875.3	906.3	848.3	908.3	848.3	1006.3	786.3	806.3	1008.3	826.3
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W	4361.3	4456.3	4261.3	4411.3	4701.3	4656.3	4506.3	4211.3	4851.3	4551.3	3966.3	4349.3	4480.3	4545.3	4414.3	4391.3	4521.3	4801.3	4456.3	4116.3	4706.3	4601.3	4066.3

Tabla B.44: Sobrecarga real de las estaciones, dada por el modelo $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, cuando se limita la saturación dinámica media de los procesadores a 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$) y cuando el factor de actividad toma el valor promedio de la función escalón ($\dot{\alpha}_t = \overline{\alpha^S}\ \forall t$), para cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$).

k	$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta\ (\overline{\alpha^T})$																						
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16	#17	#18	#19	#20	#21	#22	#23
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	118.13	262.1	278.1	38.1	467.1	243.1	483.1	57.1	227.1	707.1	0.0	224.1	211.1	306.1	319.1	167.1	357.1	307.1	563.1	0.0	163.1	627.1	0.0
10	178.13	255.1	388.1	73.1	300.1	118.1	433.1	210.1	0.0	615.1	165.1	279.1	187.1	237.1	329.1	205.1	305.1	90.1	538.1	133.1	13.1	510.1	238.1
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	148.1	114.1	0.0	253.1	159.1	298.1	0.0	69.1	474.1	0.0	24.1	50.1	178.1	158.1	30.1	134.1	94.1	369.1	0.0	103.1	403.1	0.0	0.0
17	88.1	0.0	0.0	258.1	0.0	158.1	0.0	54.1	364.1	0.0	154.1	0.0	66.1	0.0	0.0	44.1	0.0	194.1	0.0	188.1	328.1	0.0	18.1
18	88.1	130.1	168.1	48.1	180.1	98.1	218.1	80.1	60.1	300.1	30.1	128.1	97.1	127.1	158.1	100.1	160.1	100.1	258.1	38.1	58.1	260.1	78.1
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
W	620.6	761.5	834.4	670.6	1106.5	915.6	1134.4	470.6	1125.5	1622.4	373.5	681.5	739.6	828.5	836.5	650.6	916.5	1060.6	1359.4	462.5	965.6	1397.4	334.4

Tabla B.45: Sobrecarga real de las estaciones, dada por el modelo $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, cuando se limita la saturación dinámica media de los procesadores a 0.95 ($\eta^{\infty}_{med} = 0.95$) y cuando el factor de actividad toma el valor promedio de la función triangular ($\dot{\alpha}_t = \overline{\alpha^T}\ \forall t$), para cada uno de los planes de producción ($\epsilon = \#1, \ldots, \#23$).

Tablas B.46 y B.47

Recogen los tiempos de CPU utilizados por Gurobi para resolver los 23 ejemplares de datos del caso NISSAN-9ENG.

En concreto la tabla B.46 muestra los tiempos del modelo con instantes de inicio absolutos ($M3 \cup 4_\eta$ y $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$). Mientras que la tabla B.47 presenta los tiempos de CPU utilizados por los modelos con instantes relativos ($M4 \cup 3_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$).

Tabla B.48

Finalmente, la tabla B.48 muestra el número de recursos humanos necesarios para contrarrestar el efecto de la limitación en la sobrecarga de trabajo y, por tanto, para completar el trabajo total requerido a la línea de motores.

En concreto, se ha calculado la cota inferior y la cota superior del número de recursos humanos, considerando por una parte que los operarios son polivalentes y, por otra, que están especializados en una única estación. Para este cálculo se han utilizado las ecuaciones (6.25) y (6.27).

$$\Delta\mathcal{H} = \lceil \mathcal{H} \cdot \Delta b \rceil$$

$$\widehat{\Delta\mathcal{H}} = \sum_{k=1}^{|K|} \lceil \mathcal{H} \cdot b_k \cdot \Delta b_k \rceil$$

Donde:

$$\Delta b = \sum_{k=1}^{|K|} b_k \cdot \text{máx}\left\{0, \eta_{med}(k, c, \pi(T), \text{V}, \dot{\text{A}}) - \eta_{med}^{\infty}\right\}$$

$$\Delta b_k = \text{máx}\left\{0, \eta_{med}(k, c, \pi(T), \text{V}, \dot{\text{A}}) - \eta_{med}^{\infty}\right\}$$

ϵ	$M3 \cup 4_\eta$	$M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$						
		$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\dot{\alpha}^Z$	$\dot{\alpha}^P$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$
#1	2.74	1.72	39.19	1.27	1.22	1.26	1.16	1.04
#2	2.91	1.78	10.10	1.32	1.26	1.24	1.20	1.04
#3	2.73	1.71	6827.79	1.37	1.28	1.21	1.14	1.05
#4	2.76	1.85	24.65	1.65	1.55	1.30	1.18	1.06
#5	2.96	1.90	63.71	1.73	1.28	1.28	2.96	1.09
#6	3.08	1.90	26.09	1.56	1.48	1.31	1.19	1.07
#7	2.84	1.96	2.47	1.33	1.51	1.22	1.15	1.06
#8	2.79	1.81	10.36	1.59	1.45	1.33	1.17	1.07
#9	2.40	1.83	41.72	1.84	1.67	1.38	1.32	1.10
#10	2.27	1.79	85.20	1.83	1.27	1.20	1.16	1.05
#11	2.29	1.80	52.57	1.35	1.19	1.24	1.17	1.04
#12	2.69	2.10	7.76	1.37	1.37	1.23	1.16	1.05
#13	3.19	1.84	31.05	1.52	1.41	1.30	1.16	1.06
#14	2.65	1.91	24.51	1.77	1.56	1.32	1.22	1.08
#15	3.74	1.89	2.75	1.36	1.25	1.22	1.16	1.05
#16	2.71	1.89	9.17	1.38	1.27	1.24	1.21	1.04
#17	3.31	1.88	9.93	1.66	1.50	1.23	1.19	1.05
#18	2.61	2.07	41.20	1.72	1.47	1.35	1.19	1.06
#19	2.65	1.88	60.07	1.30	1.24	1.22	1.18	1.06
#20	2.50	1.94	10.18	1.32	1.24	1.30	1.21	1.06
#21	2.74	1.87	41.91	1.64	1.59	1.35	1.27	1.03
#22	2.87	1.77	1930.53	1.81	1.37	1.35	1.24	1.13
#23	2.98	1.70	21.38	1.59	1.21	1.27	1.20	1.04
Mínimo	2.27	1.70	2.47	1.27	1.19	1.20	1.14	1.03
Máximo	3.74	2.10	6827.79	1.84	1.67	1.38	2.96	1.13
Promedio	2.80	1.86	407.58	1.53	1.38	1.27	1.27	1.06

Tabla B.46: Tiempos de CPU (s) requeridos por los modelos $M3 \cup 4_\eta$ y $M3 \cup 4_\dot{\alpha}I_\eta$ ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$ y $\overline{\alpha^Z}$ o $\overline{\alpha^P}$), para resolver los ejemplares de datos (ϵ) del *Bloque-I* del caso NISSAN-9ENG.

ϵ	$M4 \cup 3_\eta$	$M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$						
		$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\dot{\alpha}^Z$	$\dot{\alpha}^P$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\overline{\alpha^Z}$ y $\overline{\alpha^P}$
#1	2.90	1.78	39.48	1.50	1.32	1.25	1.12	1.02
#2	2.51	1.77	10.51	1.25	1.17	1.24	1.19	1.03
#3	2.67	1.68	6654.47	1.54	1.16	1.21	1.13	1.04
#4	2.80	1.78	10.42	1.68	1.33	1.27	1.19	1.03
#5	2.72	1.89	52.55	1.56	1.19	1.26	1.19	1.05
#6	3.16	1.78	8.74	1.57	1.35	1.25	1.22	1.07
#7	2.92	1.71	2.46	1.63	1.18	1.20	1.12	1.08
#8	2.62	1.91	10.42	1.30	1.17	1.24	1.17	1.07
#9	2.75	1.83	34.22	1.80	1.21	1.37	1.26	1.12
#10	2.49	1.58	177.05	1.41	1.18	1.18	1.11	1.14
#11	2.51	1.65	95.50	1.21	1.15	1.20	1.15	1.09
#12	2.74	1.75	8.54	1.26	1.16	1.20	1.16	1.09
#13	2.85	1.71	25.33	1.26	1.17	1.22	1.16	1.13
#14	2.47	1.78	20.89	1.45	1.20	1.27	1.22	1.12
#15	3.34	1.69	5.15	1.23	1.19	1.21	1.15	1.09
#16	2.45	1.82	9.55	1.46	1.31	1.24	1.17	1.05
#17	2.91	1.78	9.81	1.43	1.33	1.18	1.14	1.09
#18	2.69	1.55	41.08	1.65	1.37	1.35	1.20	1.07
#19	2.43	1.72	381.02	1.46	1.19	1.24	1.15	1.09
#20	2.31	1.76	34.94	1.39	1.20	1.23	1.13	1.06
#21	2.81	1.70	36.14	1.54	1.38	1.33	1.13	1.06
#22	2.45	1.63	740.39	1.67	1.30	1.33	1.25	1.17
#23	2.54	1.66	21.14	1.47	1.21	1.19	1.15	1.06
Mínimo	2.31	1.55	2.46	1.21	1.15	1.18	1.11	1.02
Máximo	3.34	1.91	6654.47	1.80	1.38	1.37	1.26	1.17
Promedio	2.70	1.74	366.51	1.47	1.23	1.25	1.17	1.08

Tabla B.47: Tiempos de CPU (s) requeridos por los modelos $M4 \cup 3_\eta$ y $M4 \cup 3_\dot{\alpha}I_\eta$, cuando se consideran diferentes funciones para el factor de actividad ($\dot{\alpha}^S$, $\dot{\alpha}^T$, $\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\alpha^S}$, $\overline{\alpha^T}$ y $\overline{\alpha^Z}$ o $\overline{\alpha^P}$), para resolver cada uno de los ejemplares de datos (ϵ) del *Bloque-I* del caso NISSAN-9ENG.

ϵ	$\Delta\mathcal{H}$ ($M3 \cup 4_\alpha I_\eta$=$M4 \cup 3_\alpha I_\eta$)						$\widehat{\Delta\mathcal{H}}$ ($M3 \cup 4_\alpha I_\eta$=$M4 \cup 3_\alpha I_\eta$)					
	$\dot{\alpha}^L$	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\alpha^Z}$, $\overline{\alpha^P}$	$\dot{\alpha}^L$	$\dot{\alpha}^S$	$\dot{\alpha}^T$	$\overline{\alpha^S}$	$\overline{\alpha^T}$	$\dot{\alpha}^Z$, $\dot{\alpha}^P$, $\overline{\alpha^Z}$, $\overline{\alpha^P}$
#1	4	2	2	2	2	0	24	20	20	20	20	0
#2	4	2	2	2	2	0	24	20	20	20	16	0
#3	4	2	2	2	2	0	32	20	12	20	12	0
#4	4	2	2	2	2	0	24	20	20	20	20	0
#5	4	2	2	2	2	0	28	20	16	20	16	0
#6	4	2	2	2	2	0	24	20	20	20	20	0
#7	4	2	2	2	2	0	28	20	16	20	12	0
#8	4	2	2	2	2	0	24	20	20	20	20	0
#9	4	2	2	2	2	0	24	20	20	20	16	0
#10	4	2	2	2	2	0	32	20	12	20	12	0
#11	2	2	2	2	2	0	28	20	16	20	16	0
#12	4	2	2	2	2	0	24	20	16	20	16	0
#13	4	2	2	2	2	0	24	20	20	20	20	0
#14	4	2	2	2	2	0	24	20	20	20	16	0
#15	4	2	2	2	2	0	28	20	16	20	16	0
#16	4	2	2	2	2	0	24	20	20	20	20	0
#17	4	2	2	2	2	0	28	20	16	20	16	0
#18	4	2	2	2	2	0	24	20	20	20	20	0
#19	4	2	2	2	2	0	32	20	12	20	12	0
#20	4	2	2	2	2	0	24	20	16	20	16	0
#21	4	2	2	2	2	0	24	20	20	20	20	0
#22	4	2	2	2	2	0	28	20	16	20	12	0
#23	4	2	2	2	2	0	28	20	20	20	12	0

Tabla B.48: Cota inferior ($\Delta\mathcal{H}$) y superior ($\widehat{\Delta\mathcal{H}}$) del número de operarios refuerzo, necesarios para eliminar la sobrecarga de trabajo dada por $M3 \cup 4_\dot{\alpha} I_\eta$ o $M4 \cup 3_\dot{\alpha} I_\eta$ en función del factor de actividad.

BIBLIOGRAFÍA

AIGBEDO, H. Y MONDEN, Y. (1997). A parametric procedure for multcriterion sequence scheduling for just-in-time mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* **35**, 2543–2564.

ALEMANY, M. M. E., ALARCÓN, F., LARIO, F.-C. Y BOJ, J. J. (2011). An application to support the temporal and spatial distributed decision-making process in supply chain collaborative planning. *Computers in Industry* **62**(5), 519–540.

BAUTISTA, J. (1993). *Procedimientos heurísticos y exactos para la secuenciación en sistemas productivos de unidades homogéneas (Contexto* JIT*)*. Tesis de Doctorado, Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona. UPC.

BAUTISTA, J., ALFARO, R. Y BATALLA, C. (2014a). Incorporando condiciones laborales a problemas de secuencias en líneas de productos mixtos. XXIV Congreso Nacional de ACEDE. Castellón.

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. Y CANO, A. (2013a). Incorporating the work pace concept into the MMSP-W. In: *Industrial Engineering and Complexity Management. Book of Proceedings*, ISBN: 978-84-616-5410-9. VII International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XVII Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid.

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. Y CANO, A. (2014b). Impact due to the saturation concept in assembly lines on the work overload. In: *Archivos de Prevención de riesgos laborales. Especial Congreso*, vol. 17 of *ISSN: 1138-9672*. XII Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales (ORP 2014). Zaragoza.

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. Y CANO, A. (2014c). Incorporating the work pace concept into the MMSP-W. In: *Managing Complexity: Challenges for Industrial Engineering and Operations Management. Series: Lecture Notes in Management and Industrial Engineering*, vol. 2 of *ISBN: 978-3-319-04704-1*. Springer.

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. Y CANO, A. (2014d). Modeling and solving the mixed-model sequencing problem to improve productivity. International Journal of Production Economics. Process of reviewing.

BAUTISTA, J., ALFARO, R., BATALLA, C. Y LLOVERA, S. (2014e). Mixed-Model Sequencing Problem improving labour conditions. In: *The global reach of industrial engineering. Enhancing synergies in a collaborative environment. Book of Abstracts*, ISBN: 978-84-617-0923-6. 8th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XX International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. International IIE Conference 2014. Málaga.

BAUTISTA, J., ALFARO, R. Y CANO, A. (2012a). Incorporating regularity of required workload to the MMSP-W with Serial Workstations and Free Interruption of the Operations. In: *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services*. International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2012). Rodas (Grecia). Proceedings (CD).

BAUTISTA, J., ALFARO, R. Y CANO, A. (2012b). Modelos para el MMSP-W con estaciones en serie, procesadores paralelos, libre interrupción de operaciones y homogeneidad del trabajo requerido. In: *XXXIII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. VII Jornadas de Estadística Pública, 41*. SEIO, Madrid. Comunicación, Actas.

BAUTISTA, J., ALFARO, R. Y CANO, A. (2013b). Incorporating regularity of required workload to the MMSP-W with serial workstations and free interruption of the operations. In: *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services IFIP Advances in Information and Communication Technology.*, vol. 397 of *ISBN: 978-3-642-40351-4 (Print) 978-3-642-40352-1 (Online)*. Springer.

BAUTISTA, J., BATALLA, C. Y ALFARO, R. (2012c). Incorporating ergonomics factors into the TSALBP. In: *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services*. International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2012). Rodas (Grecia). Proceedings (CD).

BAUTISTA, J., BATALLA, C. Y ALFARO, R. (2013c). Incorporating Ergonomics Factors into the TSALBP. In: *Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 397 of *ISBN: 978-3-642-40351-4 (Print) 978-3-642-40352-1 (Online)*. Springer.

BAUTISTA, J. Y CANO, A. (2011). Solving mixed model sequencing problem in assembly lines with serial workstations with work overload minimisation and interruption rules. *European Journal of Operational Research* **210**(3), 495–513.

BAUTISTA, J., CANO, A. Y ALFARO, R. (2011). A Bounded Dynamic Programming algorithm for the MMSP-W considering workstation dependencies and unrestricted interruption of the operations. In: *11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2011), Córdoba*, ISBN: 978-1-4577-1675-1.

BAUTISTA, J., CANO, A. Y ALFARO, R. (2012d). Incorporando regularidad del trabajo requerido al MMSP con mínima sobrecarga. In: *Industrial Engineering: Overcoming the Crisis. Book of Full Papers*, vol. 397 of *ISBN: 978-84-938642-5-5, 1562-1569.* VI International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XVI Congreso de Ingeniería de Organización, Vigo.

BAUTISTA, J., CANO, A. Y ALFARO, R. (2012e). Modeling and solving a variant of MMSP-W problem with Production Mix Restrictions. In: *Industrial Engineering: Overcoming the Crisis. Book of Full Papers*, ISBN: 978-84-938642-5-5. VI International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. XVI Congreso de Ingeniería de Organización, Vigo.

BAUTISTA, J., CANO, A. Y ALFARO, R. (2012f). Modeling and solving a variant of the mixed-model sequencing problem with work overload minimisation and regularity constraints. an application in Nissan's Barcelona Plant. *Expert Systems with Applications* **39**(12), 11001–11010.

BAUTISTA, J., CANO, A. Y ALFARO, R. (2012g). Models for MMSP-W considering workstation dependencies: A case study of Nissan's Barcelona Plant. *European Journal of Operational Research* **223**(3), 669–679.

BAUTISTA, J., CANO, A. Y ALFARO, R. (2014f). Modeling and solving a variant of MMSP-W problem with Production Mix Restrictions. In: *Annals of Industrial Engineering 2012. Industrial Engineering: overcoming the crisis. Part IV*, ISBN: 978-1-4471-5348-1. Springer.

BAUTISTA, J., CANO, A., ALFARO, R. Y BATALLA, C. (2013d). Solving the mixed model sequencing problem with workload minimization with Product Mix Preservation. In: *Industrial Engineering and Complexity Management. Book of Proceedings*, ISBN: 978-84-616-5410-9. VII International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XVII Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid.

BAUTISTA, J., CANO, A., COMPANYS, R. Y RIBAS, I. (2012h). Solving the Fm|block|Cmax problem using Bounded Dynamic Programming. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **25**(6), 1235–1245.

BAUTISTA, J. Y CANO, J. (2008). Minimizing work overload in mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Economics* **112**(1), 177–191.

BAUTISTA, J., COMPANYS, R. Y COROMINAS, A. (1996). Heuristics and exact algorithms for solving the Monden problem. *European Journal of Operational Research* **88**(1), 101–113.

BAUTISTA, J., COMPANYS, R. Y COROMINAS, A. (1997). Modelling and solving the production rate variation problem (PRVP). *TOP. Sociedad de Estadística e Investigación Operativa. Springer* **5**(2), 221–239.

BAUTISTA, J., COMPANYS, R. Y COROMINAS, A. (2000). Note on cyclic sequences in the product rate variation problem. *European Journal of Operational Research* **124**(3), 468–477.

BAUTISTA, J., PEREIRA, J. Y ADENSO-DÍAZ, B. (2008a). A beam search approach for the optimization version of the Car Sequencing Problem. *Annals of Operations Research* **159**(1), 233–244.

BAUTISTA, J., PEREIRA, J. Y ADENSO-DÍAZ, B. (2008b). A GRASP approach for the extended car sequencing problem. *Journal of Scheduling* **11**(1), 3–16.

BAUTISTA, J. Y SUÁREZ, R. (2009). Mixed-model sequencing problem with overload minimization considering workstations dependencies. In: *Proceedings of 2009 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing*, ISBN: 978-1-4244-4628-5.

BOLAT, A. (1997). Efficient methods for sequencing minimum job sets on mixed model assembly lines. *Naval Research Logistics* **44**(5), 419–437.

BOLAT, A. (2003). A mathematical model for selecting mixed models with due dates. *International Journal of Production Research* **41**(5), 897–918.

BOLAT, A. Y YANO, C. (2009). Scheduling algorithms to minimize utility work at a single station on paced assembly line. *Production Planning and Control: The Management of Operations* **3**(4), 393–405.

BOYSEN, N., FLIEDNER, M. Y SCHOLL, A. (2009a). The product rate variation problem and its relevance in real world mixed-model assembly lines. *European Journal of Operational Research* **197**(2), 818–824.

BOYSEN, N., FLIEDNER, M. Y SCHOLL, A. (2009b). Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research* **192**(2), 349–373.

BOYSEN, N., KIEL, M. Y SCHOLL, A. (2011). Sequencing mixed-model assembly lines to minimise the number of work overload situations. *International Journal of Production Research* **49**(16), 4735–4760.

CANO, J. (2006). *Modelos y algoritmos de secuenciación en líneas de ensamblaje de productos mixtos*. Tesis de Doctorado, Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona. UPC.

CANO, J., RÍOS, R. Y BAUTISTA, J. (2010). A scatter search based hyper-heuristic for sequencing a mixed-model assembly line. *Journal of Heuristics* **16**(6), 749–770.

CELANO, G., COSTA, A., FICHERA, S. Y PERRONE, G. (2004). Human factor policy testing in the sequencing of manual mixed model assembly lines. *Computers and Operations Research* **31**(1), 39–59.

COMPANYS, R. (1989). *Planificación y programación de la producción*. Ed. Marcombo.

DAHMALA, T. N. Y KUBIAK, W. (2005). A brief Survey of Just-In-Time Sequencing for Mixed-Model Systems. *International Journal of Operations Research* **2**(2), 38–47.

DING, F. Y., ZHU, J. Y SUN, H. (2006). Comparing two weighted approaches for sequencing mixed-model assembly lines with multiple objectives. *International Journal of Production Economics* **102**(1), 108–131.

DREXL, A., KIMMS, A. Y MATTHIESSEN, L. (2006). Algorithms for the car sequencing and the level scheduling problem. *Journal of Scheduling* **9**(2), 153–176.

ELMAGHRABY, S. E. (1978). The Economic Lot Scheduling Problem (ELSP): Review and extensions. *Management Science* **24**(6), 587–598.

EREL, E., GOCGUN, Y. Y SABUNCUOGLU, I. (2007). Mixed-model assembly line sequencing using beam search. *International Journal of Production Research* **45**(22), 5265–5284.

FATTAHI, P. Y SALEHI, M. (2009). Sequencing the mixed-model assembly line to minimize the total utility and idle costs with variable launching interval. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **45**(9-10), 987–998.

FATTAHI, P., TAVAKOLI, N. B., FATHOLLAH, M., ROSHANI, A. Y SALEHI, M. (2012). Sequencing mixed-model assembly lines by considering feeding lines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **61**(5-8), 677–690.

FLIEDNER, M. Y BOYSEN, N. (2008). Solving the car sequencing problem via Branch & Bound. *European Journal of Operational Research* **191**(3), 1023–1042.

GAGNÉ, C., GRAVEL, M. Y PRICE, W. L. (2006). Solving real car sequencing problems with ant colony optimization. *European Journal of Operational Research* **174**(3), 1427–1448.

GIARD, V. Y JEUNET, J. (2010). Optimal sequencing of mixed models with sequence-dependent setups and utility workers on an assembly line. *International Journal of Production Economics* **123**(2), 290–300.

GRAVEL, M., GAGNÉ, C. Y PRICE, W. L. (2005). Review and comparison of three methods for the solution of the car sequencing problem. *Journal of the Operational Research Society* **56**(11), 1287–1295.

HYUN, C., KIM, Y. Y KIM, Y. K. (1998). A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines. *Computers and Operations Research* **25**(7-8), 675–690.

KANYALKAR, A. P. Y ADIL, G. K. (2005). An integrated aggregate and detailed planning in a multi-site production environment using linear programming. *International Journal of Production Research* **43**(20), 4431–4454.

KIM, S. Y JEONG, B. (2007). Product sequencing problem in mixed-model assembly line to minimize unfinished works. *Computers and Industrial Engineering* **53**(2), 206–214.

KOTANI, S., ITO, T. Y OHNO, K. (2004). Sequencing problem for a mixed-model assembly line in the Toyota production system. *International Journal of Production Research* **42**(23), 4955–4974.

KUBIAK, W. (1993). Minimizing variation of production rates in just-in-time systems: A survey. *European Journal of Operational Research* **66**(3), 259–271.

LAWRENCE, S. A. (2001). *Measurement of work. In: Maynard's industrial engineering handbook, fifth edition*. McGraw-Hill, New York,.

LIN, S. W. Y YING, K. C. (2013). Minimizing makespan in a blocking flowshop using a revised artificial immune system algorithm. *Omega* **41**(2), 383–389.

MACASKILL, J. L. C. (1973). Computer simulation for mixed-model production lines. *Management Sciencie* **20**(3), 341–348.

MILTENBURG, J. (1989). Level Schedules for mixed-model assembly lines in Just-In-Time production systems. *Management Science* **35**(2), 192–207.

MIRZAPOUR AL-E-HASHEM, S. M. J., ARYANEZHAD, M. B. Y JABBARZADEH, A. (2011). A new approach to solve a mixed-model assembly line with a bypass subline sequencing problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **52**(9-12), 1053–1066.

MONDEN, Y. (1983). *Toyota Production System: Practical approach to production management*. Industrial Engineering and Management Press, Norcross, Georgia.

MOSADEGH, H., ZANDIEH, M. Y FATEMI GHOMI, S. M. T. (2012). Simultaneous solving of balancing and sequencing problems with station-dependent assembly times for mixed-model assembly lines. *Applied Soft Computing Journal* **12**(4), 1359–1370.

MUSE, L., HARRIS, S. Y FIELD, H. (2003). Has the inverted-u theory of stress and job performance had a fair test? *Human Performance* **16**(4), 349–364.

OHNO, T. (1988). *Toyota Production System. Beyond Large-Scale Production*. Productivity Press, New York.

OKAMURA, K. Y YAMASHINA, H. (1979). A heuristic algorithm for the assembly line model-mix sequencing problem to minimize the risk of stopping the conveyor. *International Journal of Production Research* **17**(3), 233–247.

PAN, Q.-K. Y RUIZ, R. (2013). A comprehensive review and evaluation of permutation flowshop heuristics to minimize flowtime. *Computers and Operations Research* **40**(1), 117–128.

PARRELLO, B. D., KABAT, W. C. Y WOS, L. (1986). Job-shop scheduling using automated reasoning: A case study of the Car-Sequencing Problem. *Journal of Automated Reasoning* **2**(1), 1–42.

PROTHIUS - CÁTEDRA ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL, WWW.PROTHIUS.COM/TSALBP (2007). TSALBP*: Problemas de equilibrado de líneas de producción y montaje con restricciones temporales y espaciales*. URL http://www.prothius.com/TSALBP. Último acceso: 17.09.2014.

RAHIMI-VAHED, A. Y MIRZAEI, A. H. (2007). A hybrid multi-objective shuffled frog-leaping algorithms for a mixed-model assembly line sequencing problem. *Computers & Industrial Engineering* **53**(4), 642–666.

RAHIMI-VAHED, A. R., RABBANI, M., TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R., TORABI, S. A. Y JOLAI, F. (2007). A multi-objective scatter search for a mixed-model assembly line sequencing problem. *Advanced Engineering Informatics* **21**(1), 85–99.

RAZA, A. S. Y AKGUNDUZ, A. (2008). A comparative study of heuristic algorithms on Economic Lot Scheduling Problem. *Computers and Industrial Engineering* **55**(1), 94–109.

RUIZ, R. Y VÁZQUEZ-RODRÍGUEZ, J. A. (2010). The hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research* **205**(1), 1–18.

SALVESON, M. (1955). The assembly line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering* **6**(3), 18–25.

SARKER, B. R. Y PAN, H. (1998). Designing a mixed-model assembly line to minimize the costs of idle and utility times. *Computers and Industrial Engineering* **34**(3), 609–628.

SCHOLL, A. (1999). *Balancing and Sequencing of Assembly Lines (Contributions to Management Science)*. Physica; 2nd edition.

SCHOLL, A., KLEIN, R. Y DOMSCHKE, W. (1998). Pattern based vocabulary building for effectively sequencing mixed-model assembly lines. *Journal of Heuristics* **4**(4), 359–381.

SOLNON, C., CUNG, V. D., NGUYEN, A. Y ARTIGUES, C. (2008). The car sequencing problem: Overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF'2005 challenge problem. *European Journal of Operational Research* **191**(3), 912–927.

TAMURA, T., LONG, H. Y OHNO, K. (1999). Sequencing problem to level part usage rates and work loads for a mixed-model assembly line with a bypass subline. *International Journal of Production Economics* **60-61**, 557–564.

THOMOPOULOS, N. T. (1967). Line Balancing-Sequencing for Mixed-Model Assembly. *Management Sciencie* **14**(2), 59–75.

TSAI, L. H. (1995). Mixed-model sequencing to minimize utility work and the risk of conveyor stoppage. *Management Science* **41**(3), 485–495.

XIAOBO, Z. Y OHNO, K. (1997). Algorithms for sequencing mixed models on assembly line in a JIT production system. *Computers and Industrial Engineering* **32**(1), 47–56.

XIAOBO, Z. Y OHNO, K. (2000). Properties of a sequencing problem for a mixed model assembly line with conveyor stoppages. *European Journal of Operational Research* **124**(3), 560–570.

XIAOBO, Z., ZHOU, Z. Y ASRES, A. (1999). Note on Toyota's goal of sequencing mixed models on an assembly line. *Computers and Industrial Engineering* **36**(1), 57–65.

XXI CONVENIO COLECTIVO DE TRABAJO DE LA EMPRESA NISSAN MOTOR IBÉRICA, S. (2012-2014). *Resolució de 3 de febrer de 2011, per la qual es disposa la inscripció i la publicació del Conveni col·lectiu de treball de l'empresa Nissan Motor Ibérica, SA (Centres de Barcelona-Zona Franca i Montcada) per als anys 2012-2014 (codi de conveni núm. 0806581)*.

YANO, C. A. Y BOLAT, A. (1989). Survey, development, and application of algorithms for sequencing paced assembly lines. *Journal of Manufacturing and Operations Management* **2**(3), 172–198.

YANO, C. A. Y RACHAMADUGU, R. (1991). Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options. *Management Science* **37**(5), 572–586.