

Equilibrado de puestos de cadenas de montaje en producción por lotes

Pedro Sánchez Martín¹, Santiago López de Haro², Andrés Ramos¹

¹ Dpto. de Organización Industrial. Universidad Pontificia Comillas. Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid. pedro.sanchez@iit.icaei.upcomillas.es, andres.ramos@iit.icaei.upcomillas.es

² Instituto de Investigación Tecnológica. Universidad Pontificia Comillas. Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid. santiago.lopezdeharo@iit.icaei.upcomillas.es

Resumen

En la actualidad la organización productiva de las cadenas de montaje puede orientarse hacia sistemas de tipo mixto o de tipo multimodelo. En esta ponencia se detalla el procedimiento de resolución de este segundo tipo de líneas basado en la hibridación de técnicas de programación matemática lineal y programación de restricciones. Se detallan los resultados obtenidos en el equilibrado de un módulo de montaje de una línea real.

Palabras clave: Palabras clave: Cadenas de montaje, equilibrado de puestos, automoción

1. El equilibrado de puestos de cadenas de montaje

Las cadenas de montaje son medios de producción de grandes series de productos. Desde los tiempos de Henry Ford las líneas de montaje han evolucionado desde sistemas de producción orientados a un único modelo y estrictamente periódicos hacia sistemas más flexibles incluyendo, entre otros, líneas con minicélulas de trabajo en paralelo fabricando simultáneamente múltiples modelos.

Dada la tendencia actual de personalización de los productos, la mayoría de los fabricantes emplean instalaciones donde se procesan modelos de productos cuya carga de trabajo puede variar notablemente. Baste considerar la gama de opciones posibles que puede incorporar un mismo modelo de vehículo, lo cual implica una variabilidad de la carga de trabajo de montaje repartida en la misma cadena.

En cualquier caso, un reto en la organización de la producción en este ámbito es el denominado equilibrado de líneas de montaje, Becker (2006). Surge cada vez que una línea de montaje ha de ser configurada bien por que cambie su diseño, bien porque cambie la mezcla de productos fabricados en ella. Esta labor consiste en distribuir la carga total de trabajo necesaria para fabricar un producto entre las estaciones de trabajo situadas a lo largo de la línea.

El estudio de los sistemas de producción por lotes se puede dividir en dos problemas fundamentales, la secuenciación de los lotes, Burns (1987) y la elaboración de equilibrados compatibles para cada lote. En este artículo se muestra un procedimiento híbrido (Programación entera, Brooke (1988) y de restricciones, Bockmayr (2001) y ILOG (2006)) para la resolución del equilibrado de líneas de montaje del tipo multi-modelo Mair (1998). El objetivo de este procedimiento es la minimización del tiempo no productivo de las estaciones

de trabajo, calculado como diferencia entre la máxima carga admisible en los puestos durante el procesado de cada tipo de modelo y la suma de las cargas de trabajo asignadas realmente a los puestos. A continuación se describen brevemente dos planteamientos diferentes de organizar la producción que afectan al equilibrado de los puestos de la línea.

1.1 Sistema de producción de tipo línea mixta

En el sector de la automoción está ampliamente extendido el sistema de producción de *línea mixta*, consistente en procesar consecutivamente vehículos con tiempos de montaje diferentes debido a que son modelos distintos o varían sustancialmente sus opciones de equipamiento. Este sistema de producción plantea dificultades al problema del equilibrado ya éste suele resolverse estableciendo un modelo “promedio”. Esto significa que, aunque en promedio los puestos no están sobrecargados, éstos pueden llegar a estarlo puntualmente durante el procesado de determinados modelos o versiones. Actualmente mediante procedimientos heurísticos de asignación se evitan en la medida de lo posible las variaciones de carga en las estaciones ante los diversos pedidos. Así por ejemplo se generan secuencias que intercalan productos con mayor tiempo de procesado con otros de menor tiempo de modo que se compensen mutuamente. Otra posibilidad consiste en utilizar personal multidisciplinar que permita reforzar los puestos que se encuentren sobrecargados temporalmente. En cualquier caso, el equilibrado resultante suele dar lugar a unas necesidades de personal en la línea de montaje que resultan mayores que las necesarias organizando la producción en pequeños lotes.

1.2 Sistema de producción multimodelo en pequeños lotes

Una de las implementaciones del sistema de producción de vehículos que más éxito está teniendo en la actualidad es la de Honda, cuyas prácticas son únicas en el sector de la automoción. Entre las características que diferencian el sistema de producción de Honda, la *producción multimodelo en pequeños lotes* despierta actualmente interés en el sector de automoción.

Según Mair (1998), en estas fábricas se ha implantado un sistema de producción de lotes pequeños donde se producen modelos diferentes con un ciclo aproximadamente igual a medio turno. Este método permite un mejor equilibrado de la línea de producción sin comprometer la flexibilidad de la misma. La posibilidad de segmentar la demanda en grupos que tengan similares características permite que el equilibrado resultante sea mucho más eficiente. Así, los productos son agrupados en lotes de 30 ó 60 vehículos semejantes en cuanto a sus características (ej, Modelo Civic con volante a la derecha). De este modo, algunas estaciones permanentes en la línea tienen trabajo asignado durante la ejecución de todos los lotes mientras que otras estaciones temporales tienen trabajo asignado sólo durante la ejecución de algunos lotes. El personal que tiene asignadas estaciones temporales puede por ejemplo realizar labores logísticas cuando en los lotes que se están elaborando en su puesto no tiene asignadas tareas.

Un ejemplo ilustrativo es la fábrica de Sayama, donde el tipo de modelo en producción se cambia 3 ó 4 veces al día, ejecutándose varios lotes de diferentes versiones del modelo Accord seguidos por otros tantos lotes de diferentes versiones del modelo Prelude.

2. Terminología

Índices:

- $t \in Tareas$ Tareas que deben ser asignadas
 $p \in Puestos$ Puestos a los que deben ser asignadas
 $m \in Modelos$ Modelos de productos que comparten tareas semejantes
 $h \in Altim$ Altimetrías en las que se ejecutan las tareas de ensamblaje de un vehículo
 $q \in Posic$ Posiciones de montaje en las que se ejecutan las tareas de montaje de un vehículo

Parámetros:

- $d_{t,m}$ Duración de la tarea t en el modelo m (0 cuando la tarea no se ejecuta en m)
 h_t Altimetría en la que se debe ejecutar la tarea t
 m_t Máquina necesaria para la ejecución de la tarea t
 q_t Posición del coche en la que se ejecuta la tarea t
 $Prec_t$ Conjunto de tareas que han de ser ejecutadas antes de la tarea t
 IM_p Máquinas instaladas en el puesto p
 IQ_p Posiciones en que se realizan las tareas asignadas al puesto p
 ct Tiempo de ciclo

Variables:

- $BP_{t,p}$ 1 si p es el puesto en el que se ejecuta la tarea t , 0 en caso contrario
 $BH_{p,h}$ 1 en el caso de que la altimetría del puesto p sea h , 0 en caso contrario
 $BPM_{p,m}$ 1 si la carga del modelo m en el puesto p es mayor que 0
 P_t Valor entero que indica el puesto asignado a la tarea t

3. Organización de la producción por lotes

La producción por lotes requiere de un análisis previo de las características de los productos de productos a fabricar con el fin de clasificarlos en diferentes modelos. Dichas características son piezas u operaciones que diferencian sustancialmente los productos entre sí. Normalmente, entre estas características se considera el tipo de vehículo a fabricar, el combustible o la posición del volante.

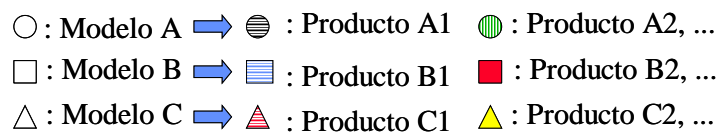


Figura 1. Modelos y productos

3.1 Lotes básicos y personalizados

Los productos montados en la cadena se agrupan en lotes según el modelo al que pertenezcan tal y como se muestra en la Figura 2. Los lotes en función de su modelo se clasifican en dos conjuntos: *básicos* y *personalizados*. Los modelos *básicos* son los más demandados por los clientes y contienen componentes principales en su diseño. El *dimensionamiento básico* determina las agrupaciones de estos modelos estableciendo los puestos *permanentes* en la cadena.

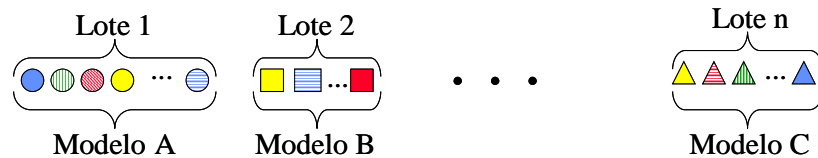


Figura 2. Secuenciación de lotes asociados a modelos

Aquellos productos programados de forma específica debido a requerimientos del cliente o previsiones específicas de la demanda se consideran productos *personalizados* y constituyen modelos personalizados. Los lotes de estos modelos requieren puestos en la cadena adicionales a los establecidos en el dimensionamiento básico. En la misma cadena se pueden montar lotes personalizados diferenciados por los modelos o los componentes específicos asociados a cada tipo de lote tal y como se muestra en la Figura 3.

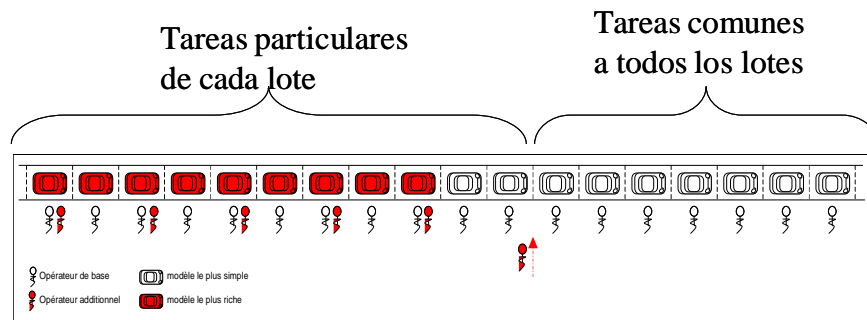


Figura 3. Puestos de montaje permanentes y temporales asociados a lotes

3.2 Función objetivo

La función objetivo mide la bondad de cada una de las posibles soluciones al problema de equilibrado. La Figura 4 muestra un ejemplo de distribución de tareas que representa un equilibrado deseable en un entorno de producción multi-modelo. El eje de abscisas está dividido en varias zonas, una para cada estación de la línea. En cada una de estas zonas se pueden distinguir tres columnas representando la carga de trabajo de esta estación cuando se procesan unidades de cada modelo.

El equilibrado es deseable porque las tareas se han distribuido de tal manera que para aquellas estaciones y modelos para los que la carga de trabajo no es nula, ésta toma valores cercanos al máximo admisible. De este modo, las estaciones donde la carga de trabajo no es nula en ninguno de los modelos son consideradas *permanentes* y las restantes son consideradas *temporales*.

Naturalmente, estos objetivos han de ser ponderados con la cuota de demanda de cada modelo. No es lo mismo conseguir un buen equilibrado para un modelo muy demandado que para otro que representa un mínimo porcentaje de la demanda.

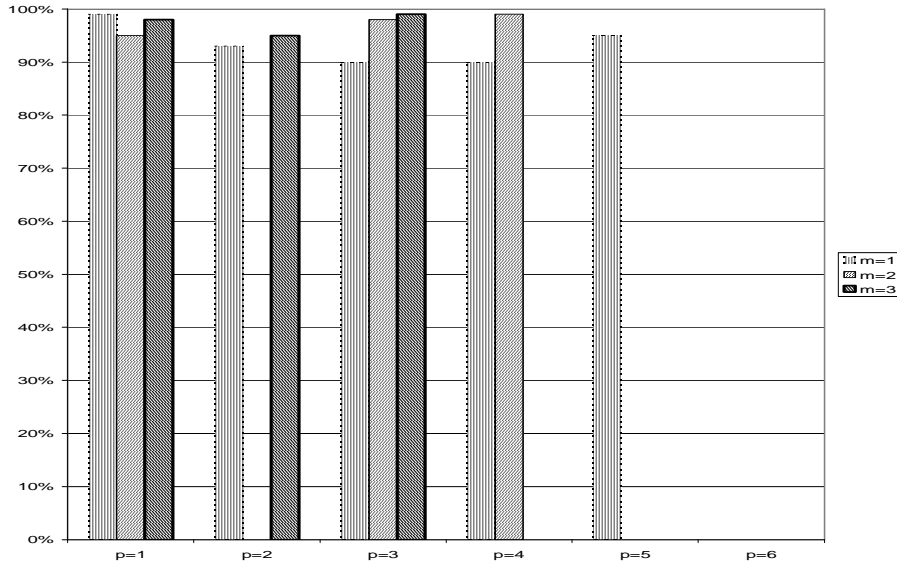


Figura 4. Ejemplo del Equilibrado Objetivo

Analíticamente, el objetivo del problema de equilibrado puede ser planteado con las siguientes ecuaciones:

$$FO: \min \sum_{p,m} \alpha_m \cdot BPM_{p,m} \quad (1)$$

Donde α_m es la cuota de pedidos del modelo m y $BPM_{p,m}$ es la variable binaria que toma valor 1 si el puesto p tiene asignada carga de trabajo en la ejecución del modelo m .

3.3 Restricciones del problema

La formulación matemática del problema de equilibrado de líneas multi-modelo se basa fundamentalmente en tres tipos de restricciones: las acumulativas, las de precedencia y las de zona.

3.3.1 Restricciones acumulativas

Este tipo de restricciones se encargan de garantizar que la carga de trabajo no es excesiva en ningún puesto de trabajo. Entonces las restricciones acumulativas están representadas por (2).

$$\sum_t BP_{t,p} \cdot d_{t,m} \leq ct \cdot BPM_{p,m} \quad \forall p,m \quad (2)$$

$$\sum_p BP_{t,p} = 1 \quad \forall t$$

Donde ct es el tiempo de ciclo considerado, $d_{t,m}$ es el tiempo de ejecución de la tarea t en el modelo m , $BP_{p,m}$ es la variable binaria que toma valor 1 si la tarea t es asignada al puesto p . Típicamente, $d_{t,m}$ tomará el mismo valor en todos los modelos excepto en aquellos en los que no sea necesario ejecutarla, en cuyo caso tomará valor nulo.

3.3.2 Restricciones de precedencias

Encargadas de garantizar que todas las tareas se ejecutan respetando la secuencia técnica del proceso. Sea P_t la variable que representa el puesto en el que se ejecuta la tarea t y $Prec_t$ el conjunto de tareas que preceden a la ejecución de la tarea t . Entonces, las restricciones de precedencias están representadas por

$$P_t \leq P_p \quad \forall t \in Prec_t, t \in Tareas \quad (3)$$

Existe una redundancia de información entre las variables $BP_{t,p}$ y las variables P_t . Este tema se aborda en el apartado 3.3.5.

3.3.3 Restricciones de zona

Se encargan de garantizar que determinadas tareas no sean asignadas a aquéllos puestos donde éstas no puedan ser procesadas.

$$\begin{aligned} P_t \neq p \quad \forall p, t \in Tareas \mid m_t \notin IM_p \\ P_t \neq p \quad \forall p, t \in Tareas \mid q_t \notin IQ_p \end{aligned} \quad (4)$$

El primer grupo de restricciones garantiza que la tarea t no será asignada a ningún puesto p en el que no esté instalada IM_p la máquina necesaria para llevar a cabo dicha tarea m_t . El segundo grupo de restricciones garantiza que la tarea t no será asignada a ningún puesto p que no esté adaptado IQ_p para que se ejecuten tareas en la posición q_t . Existen otras razones para la existencia de restricciones de zona, pero éstas no han sido consideradas en el algoritmo.

3.3.4 Restricciones de incompatibilidad

Este tipo de restricciones se encarga de que no se asignen al mismo puesto tareas que sean incompatibles entre sí.

$$\begin{aligned} \sum_{t \in Tareas \mid h_t = h} BP_{t,p} \leq BH_{p,h} \cdot \text{card}\{t \in Tareas \mid h_t = h\} \quad \forall p, h \\ \sum_h BH_{p,h} = 1 \quad \forall p \end{aligned} \quad (5)$$

Las restricciones de altimetría son comunes en la mayoría de entornos de producción. Cada tarea ha de ser ejecutada cuando el producto se ejecuta a una determinada altura respecto al suelo, lo que hace que las tareas que se realizan en altimetrías diferentes sean incompatibles. Nótese que la función $\text{card}\{t\}$ ha sido empleada para denotar el cardinal del conjunto t .

3.3.5 Relación entre las variables redundantes

Dado que la información representada por las variables $BP_{t,p}$ y P_t es redundante, la siguiente restricción garantiza que esta información es la misma.

$$BP_{t,p} = 1 \Rightarrow (P_t = p) \quad \forall t, p \quad (6)$$

3.4 Programación lineal y de restricciones y algoritmo de búsqueda

Atendiendo a las formulaciones anteriores, únicamente las restricciones acumulativas (2), de incompatibilidad (5) y la función objetivo son formuladas en el modelo de programación lineal. Las restricciones de precedencia y de zona, (3) y (4) respectivamente, están contenidas en el modelo de programación por restricciones.

La Tabla 1 y el diagrama de flujo de la Figura 5 representan el funcionamiento del algoritmo implantado. Se trata de un procedimiento iterativo que va asignando grupos de operaciones a cada puesto en las sucesivas iteraciones.

Tabla 1. Tabla descriptiva del algoritmo de equilibrado

No.	Descripción del paso
1.-	Determinar si existen tareas que no hayan sido asignadas, si no es así el algoritmo ha encontrado una solución.
2.-	Evaluar si todavía existen puestos a los que se puedan asignar tareas, si no es así, el algoritmo necesita que se extienda en conjunto de puestos disponibles para poder asignar las tareas restantes. Si es así, seleccionar uno de ellos al que se llamará p .
3.-	Ejecutar el modelo de programación lineal con la función objetivo, las restricciones acumulativas, las de incompatibilidad y los nuevos valores de las cotas actualizados por el modelo de programación de restricciones.
4.-	Determinar el conjunto de tareas asignables teniendo en cuenta las restricciones acumulativas, de zona y de incompatibilidad. Si no existen tareas asignables volver al punto 1, en caso contrario, ordenar estas tareas y seleccionar una tarea t por el procedimiento descrito en el apartado siguiente.
5.-	Tratar de asignar la tarea t al puesto p . Si la asignación de la tarea t al puesto p es aceptada ir al punto 5.1, si es rechazada ir al 5.2.
5.1.-	La restricción $P_{t=p}$ se incorpora a la bolsa de restricciones del modelo CP. Volver al punto 4.
5.2.-	La restricción $P_{t \neq p}$ se incorpora a la bolsa de restricciones del modelo CP. Se actualizan las cotas de las variables y se reejecuta el modelo de programación lineal. Volver al punto 4.

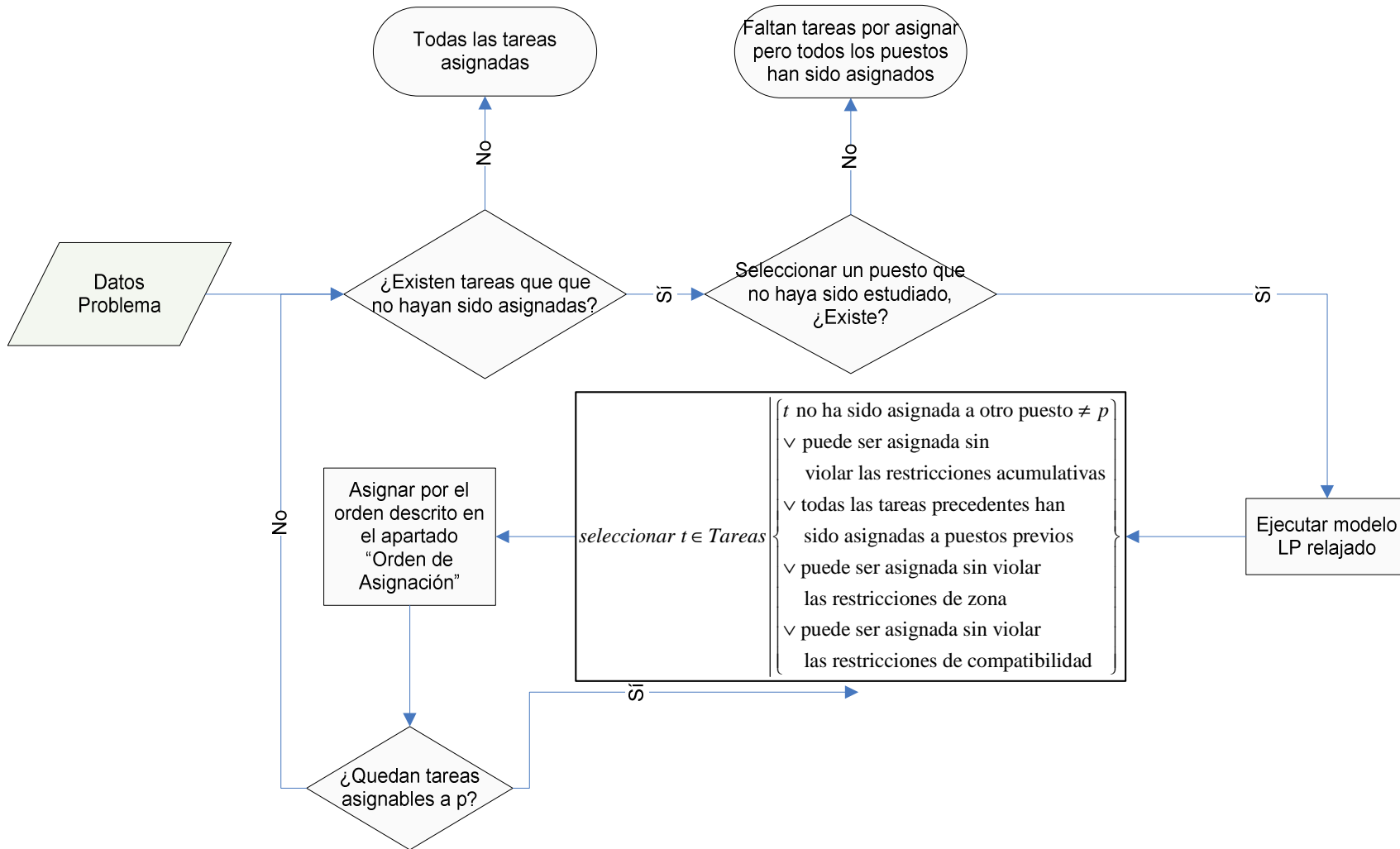


Figura 5. Diagrama de Flujo del Algoritmo de Equilibrado

4. Resultados para un problema de tamaño real

El algoritmo propuesto ha sido empleado para resolver el problema de equilibrado de uno de los módulos de la línea de montaje de la fábrica de Villaverde (Madrid) del grupo PSA. El problema considera 632 tareas y restricciones acumulativas, de zona y de compatibilidad. Las restricciones de precedencia no fueron suministradas a tiempo para la presente comunicación. En las Figura 6 y Figura 7 se muestran los equilibrados correspondientes al montaje de los modelos C3P y C3 en un módulo. El eje de abscisas muestra los puestos disponibles, y el de ordenadas, el tanto por uno de capacidad ocupada.

Como se puede observar en la Figura 6, existen algunos desequilibrios en cuanto a la carga de trabajo de los puestos. La mayoría de los puestos tienen ocupada en torno a un 98% de su capacidad. Sin embargo, algunos puestos situados a lo largo de la cadena (7, 19 y 23) y otros tantos situados al final de la misma (27, 28 y 29), no alcanzan el 50%. Estos equilibrios también se dan en el montaje del modelo C3. El problema reside en las características de dichos puestos (maquinaria instalada, altimetría,...), que hacen que la máxima carga de trabajo disponible para los mismos sea muy inferior a su capacidad. Por otro lado, es una práctica habitual en entornos de equilibrado el que a los puestos con menor carga de trabajo situados en los extremos de un módulo se les asigne carga de trabajo de los módulos contiguos para así aumentar su rendimiento.

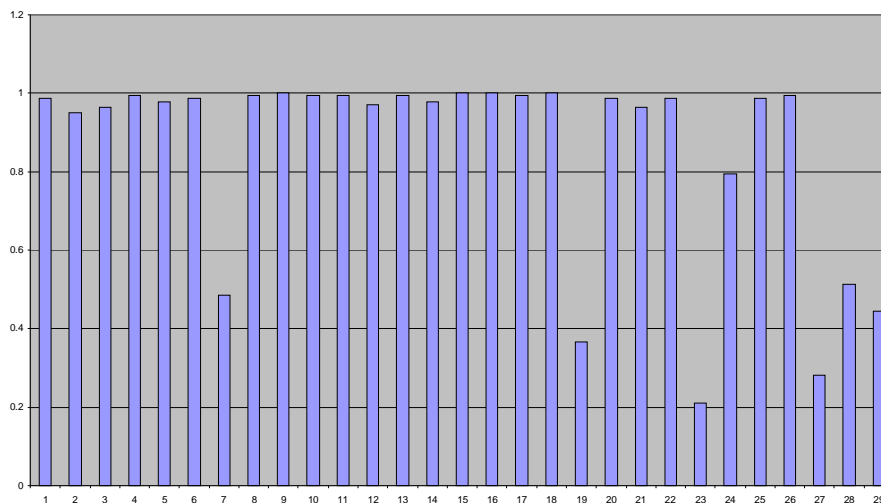


Figura 6. Equilibrado del módulo para el procesamiento del modelo C3P

Comparando las Figura 6 y Figura 7, se puede observar que el montaje del modelo C3 implica menos puestos de montaje (24) que el del modelo C3P (29). El equilibrado de la línea de montaje de tipo modelo mixto implantada en la fábrica emplea 27 puestos bajo las condiciones de demanda actuales (30% C3P, 70% C3). Sin embargo, el algoritmo propuesto anteriormente ha encontrado una solución basada en un entorno multi-modelo (la mostrada en la Figura 8) en la que todas las tareas comunes se realizan en el mismo puesto y, además, durante el procesamiento de los modelos de mínima carga de trabajo (los C3), cuatro puestos (el 6, el 16, el 19 y el 24) se quedan sin carga de trabajo. Por lo que el personal correspondiente a los mismos puede ser asignado a otras tareas.

De forma cuantitativa, el sistema de modelo mixto anterior emplea $27 \times 8 = 216$ horas/turno mientras que el de tipo multi-modelo emplea $(0.7 \times 24 + 0.3 \times 29) \times 8 = 204$.

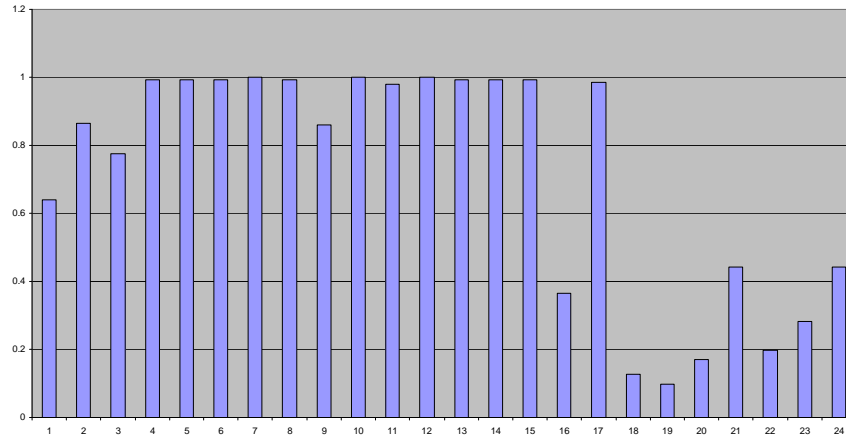


Figura 7. Equilibrado del módulo para el procesado del modelo C3

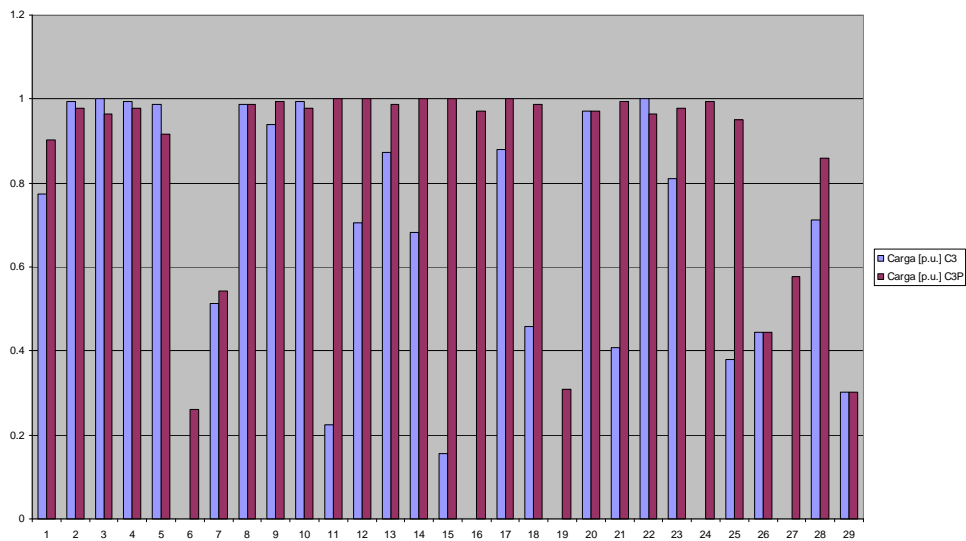


Figura 8. Equilibrado para el procesamiento de los modelos C3 y C3P conjuntamente

Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido realizado gracias a la colaboración del Centro de Madrid de la empresa PSA Peugeot-Citroën, agradeciendo especialmente la colaboración a D. Mariano Lázaro, D. José Manuel Pequeño, D. Gabriel Sánchez y a sus colaboradores.

Referencias

- Becker, C. and A. Scholl, *A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing*. European Journal of Operational Research, 2006. **168**(3): p. 694-715.
- Burns, L.D. and C.F. Daganzo, *Assembly Line Job Sequencing Principles*. International Journal of Production Research, 1987. **25**(1): p. 71-99.
- Brooke, A., D. Kendrick, and A. Meeraus, *GAMS Users Manual*, ed. S. Press. 1988.
- Bockmayr, A. and N. Pizaruk, *Solving Assembly Line Balancing Problems by Combining IP and CP*. 2001, University Henri Poincaré: Loria.
- ILOG, O., *Studio 3.5: The User's Manual*. OPL Studio 3.5 Language Manual, 2006.
- Mair, A., *Internationalization at Honda: transfer and adaptation of management systems*. 1998. 18p.