Algoritmos de hormigas para un problema de equilibrado de líneas de montaje con restricciones temporales y espaciales

Joaquín Bautista, Jordi Pereira
Universitat Politècnica de Catalunya, Avda. Diagonal 647, 7ª Planta 08028 Barcelona
Joaquin.bautista, jorge.pereira @upc.es

Resumen

El presente artículo se centra en la aplicación de un procedimiento basado en colonias de hormigas para resolver un problema de equilibrado de líneas de montaje. Tras una introducción, se presenta el problema objeto de estudio: *Time and Space constrained Assembly Line Balancing Problem* (TSALBP), y se propone un modelo básico de una de sus variantes. Posteriormente, se presenta un algoritmo de hormigas que incorpora algunas ideas que han ofrecido buenos resultados con los problemas simples de equilibrado. Finalmente, se prueba la validez de los algoritmos presentados mediante una experiencia computacional que emplea instancias de referencia, y se establecen las conclusiones del presente trabajo.

1. Introducción

Una línea de montaje está constituida por un número de estaciones de trabajo, m, dispuestas en serie y en paralelo, a través de las cuales fluye la obra en curso de un producto. Las estaciones están vinculadas por un sistema de transporte que se encarga de aportar materiales al flujo principal y a mover las unidades de producto de una estación a la siguiente. Las unidades de producto pueden ser de un tipo (single-model) o de varios tipos (multi-model).

La fabricación de una unidad de producto se divide en un conjunto V de n tareas; cada estación k ($1 \leq k \leq m$) tiene asignadas un subconjunto de tareas S_k ($S_k \subseteq V$) denominado *carga* de la estación k; una tarea j sólo puede estar asignada a una estación. Cada tarea j requiere para su ejecución un tiempo de operación $t_j > 0$ que se determina en función de las tecnologías de fabricación y de los recursos empleados. También, la tecnología y la propia naturaleza del producto hacen que cada tarea j tenga un conjunto de tareas precedentes inmediatas, P_j, las cuales deben estar concluidas antes de que se inicie la tarea j. Estas restricciones suelen representarse mediante un grafo acíclico de precedencias cuyos vértices se asocian a las tareas y cada arco dirigido (i,j) representa que la tarea i debe finalizarse antes de que se inicie la tarea j en la línea, por tanto, si $i \in S_h$ y $j \in S_k$, se debe cumplir $h \leq k$.

Cada estación k presenta un tiempo de carga de estación $t(S_k)$ que es igual a la suma de las duraciones de las tareas asignadas a la estación k. Cuando se alcanza el régimen permanente en la fabricación, las unidades de producto fluyen por la línea a cadencia constante, y cada estación k dispone de un tiempo c, denominado tiempo de ciclo, para realizar las tareas que tiene asignadas. Normalmente, en las líneas de trim o de body de automoción, las unidades permanecen paradas en los espacios reservados a cada estación, allí se ejecutan las tareas correspondientes durante un tiempo menor o igual al tiempo de ciclo, y después, en un tiempo despreciable, las unidades se transfieren a la estación siguiente, iniciándose, así, un nuevo ciclo de producción.

El tiempo de ciclo c determina la tasa de producción r de la línea (r=1/c), y aquél no puede ser menor que el máximo tiempo de carga de estación: $c \geq \max_k\{t(S_k)\}$, ni debe ser mayor que la suma de las duraciones de las tareas de V: $c \leq \Sigma_k t(S_k) = t_{sum}$. Cada estación k presenta un tiempo muerto $I_k = c - t(S_k)$. La suma de dichos tiempos parciales da lugar al tiempo muerto total, $I_{sum} = \Sigma_k I_k = m \cdot c - t_{sum}$, el cual se vincula a la ineficiencia de la línea.

En general, los problemas de equilibrado de líneas de montaje o ensamblado ALBP (*Assembly Line Balancing Problem*) están enfocados a agrupar de manera eficiente y coherente las tareas del conjunto V en estaciones de trabajo. En definitiva, se trata de conseguir una agrupación de tareas que minimice la ineficiencia de la línea o su

Actas del IV Congreso Español sobre Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados, MAEB2005, pp.289-296
ISBN: Vol I:84-9732-440-4 Vol II: 84-9732-467-6

tiempo muerto total y que respete todas las restricciones impuestas a las tareas y a las estaciones.

Una primera familia de problemas, conocida como SALBP, *Simple Assembly Line Balancing Problem*, [3], se puede enunciar así: dados un conjunto de n tareas con sus atributos y un grafo de precedencias, cada tarea debe asignarse a una sola estación de manera que se satisfagan todas las restricciones de precedencia y que ningún tiempo de carga de estación, $t(S_k)$, sea mayor que el tiempo de ciclo c.

La familia SALBP presenta cuatro variantes: SALBP-1: minimizar el número de estaciones m dado un valor fijo del tiempo de ciclo c; SALBP-2 minimizar el tiempo de ciclo c (maximizar la tasa de producción r) dado un número de estaciones m; SALBP-E: minimizar simultáneamente c y m considerando su relación con el tiempo muerto total o la ineficiencia de la línea; SALBP-F: dados m y c determinar la factibilidad del problema, y en caso afirmativo hallar una solución.

Cuando se añaden otras consideraciones a las de la familia SALBP, la familia de problemas se denomina GALBP (*General Assembly Line Balancing Problem*). Esta familia incluye aquellos problemas con restricciones adicionales como las que consideran estaciones de trabajo en paralelo, [4], agrupaciones forzadas de tareas, [5] y posibles incompatibilidades entre tareas, [1], entre otras.

En cuanto a procedimientos de resolución, la literatura recoge procedimientos muy variados. Un primer grupo de algoritmos está formado por los denominados "greedy", basados en reglas de prioridad (enumerativos parciales), véase [15]. Un segundo grupo se compone por procedimientos enumerativos, básicamente bajo un esquema *branch and bound*, [8], [9] y [12], siendo lo más efectivos en la actualidad. Y un tercer grupo compuesto por aplicaciones de metaheurísticas diversas, véase [13]. Casi todos estos trabajos están orientados a la resolución de los problemas SALBP-1 o SALBP-2, por lo que se debe recurrir a procedimientos específicos cuando se aborda un problema que incluya diferencias respecto a dichos problemas.

El presente trabajo se ha organizado como sigue. En la sección 2 se presenta un problema detectado en el sector de automoción que tiene en cuenta restricciones adicionales relacionadas con el espacio disponible en el entorno de las líneas; aquí, se propone un modelo matemático y se establecen sus relaciones con SALBP. En la sección 3 se propone, para resolver el problema, un algoritmo de hormigas, basado en la heurística AS de Dorigo, Maniezzo y Colorni [6], que incluye elementos de otras metaheurísticas que han ofrecido buenos resultados en problemas de equilibrado. La sección 4 está dedicada a una experiencia computacional sobre una colección de instancias de referencia adaptadas al nuevo problema. Finalmente, las conclusiones del trabajo se presentan en la sección 5.

2. Time and Space constrained Assembly Line Balancing Problem (TSALBP)

En un sistema productivo constituido por varias líneas de fabricación y/o montaje ramificadas, el equilibrado de líneas es un problema frecuente. Este es el caso de la industria del automóvil en la que es habitual utilizar una misma línea para las variantes de un componente (p.e. bastidores, carrocerías, asientos, etc.), o una misma línea de pintura para las carrocerías de distintos vehículos con sus variantes, o una misma línea de vestido (body) para las variantes de un mismo vehículo. La necesidad de equilibrar se presenta en distintas situaciones: (1) el diseño de una nueva línea destinada a la fabricación de un nuevo producto, (2) un nuevo equilibrado de una línea ya existente que debe dedicarse a un nuevo producto y a los productos para los que fue diseñada, (3) sucesivos equilibrados a medio-largo plazo requeridos por la evolución de los productos a lo largo de sus ciclos de vida; (4) frecuentes equilibrados a medio-corto plazo ante variaciones de la demanda o del mix de producción, (5) equilibrados de emergencia ante incidencias como la falta de materiales o la reducción del nivel de recursos productivos, entre otras.

En este contexto, es obvio que las alteraciones de la demanda total diaria o, lo que es más frecuente, la variación del mix de producción de un día para otro afecta, por un lado, al tiempo de ciclo c y, por otro, a los tiempos de operación t_j $(1 \le j \le n)$ de las tareas, los cuales se determinan teniendo en cuenta los tiempos de operación de las tareas para cada variante, el mix de producción y los recursos empleados.

Estas alteraciones de c y t_j $(1 \le j \le n)$ son de carácter temporal y no añaden gran dificultad al problema de equilibrado de líneas, pues puede tratarse como un SALBP. Sin embargo, la variación de la demanda o del mix de producción afecta al ritmo de consumo de componentes y a su variedad y, en consecuencia, afecta a la asignación de superficies destinadas para éstos, tanto a ambos lados de la línea como a las zonas de transporte aéreo. Por tanto, si ya existe una instalación, con una distribución en planta definida, se deberá también tener en cuenta la limitación del espacio (lateral y aéreo) destinado a los materiales (piezas, componentes, etc.) y a los utillajes de fabricación y ensamblado.

Entre las causas que originan limitaciones de espacio aparecen:

- La longitud de las estaciones no puede ser ilimitada, ésta debe estar en consonancia con las posibilidades de desplazamiento de los operarios en su área de influencia. Tanto si el sistema de transporte desplaza las unidades de producto a cadencia constante como si se transfieren de una estación a la siguiente cada ciclo, la limitación de los desplazamientos del operario condiciona la longitud de su estación.
- Todos los materiales en contenedores y las herramientas e instrumental de soporte se deben distribuir linealmente a lo largo de ambas orillas de cada estación, de manera que éstos estén lo más cerca posible de la unidad de producto, evitando dobles filas y dejando las calles libres para los vehículos (trenes) de transporte; este hecho hace que el espacio útil disponible para equipos y materiales sea muy limitado.
- El caso más claro de conflicto a la hora de distribuir los espacios lo tenemos en las líneas de modelos mixtos (bastidores, carrocerías, motores, etc.). Normalmente, en automoción, se pretende regularizar el consumo de componentes a lo largo del tiempo, lo que conduce a secuencias de unidades muy distintas a las que resultarían al fabricar por lotes. Este hecho obliga a repartir los espacios disponibles en cada estación entre los contenedores de material y herramientas asociados a todos los tipos de producto que circulan por la línea.

Estas limitaciones de carácter espacial se pueden contemplarse asociando a cada tarea j un área requerida a_j (función del tiempo de ciclo c, del mix de producción y de la frecuencia de suministro de materiales) y asociando a cada estación k un área disponible A_k (función de S_k y del layout) que supondremos, para homogeneizar y simplificar, idéntica para todas las estaciones e igual a A: $A=A_k$ ($1 \le k \le m$). Cada estación k requiere un área de estación $a(S_k)$ que es igual a la suma de las áreas requeridas por las tareas asignadas a la estación k.

Esto nos conduce a una familia de problemas, que denominamos TSALBP: *Time and Space constrained Assembly Line Balancing Problem*, que se puede presentar así: dados un conjunto de n tareas con sus atributos temporales t_j y espaciales a_j ($1 \le j \le n$), y un grafo de precedencias, cada tarea debe asignarse a una sola estación de manera que: (1) se satisfagan todas las restricciones de precedencia, (2) ningún tiempo de carga de estación, $t(S_k)$, sea mayor que el tiempo de ciclo c, y (3) ningún área requerida por estación, $a(S_k)$, sea mayor que el área disponible por estación, A.

TSALBP presenta diversas variantes en función los elementos m, c y A. Aquí proponemos ocho variantes para TSALBP (ver Tabla 1), en función de los elementos m, c y A que pueden actuar como valores fijos o como variables a optimizar.

Nombre	m	C	A	Tipo
TSALBP-F	dado	dado	dado	F
TSALBP-1	Min	dado	dado	OP
TSALBP-2	dado	Min	dado	OP
TSALBP-3	dado	dado	Min	OP
TSALBP-1/2	Min	Min	dado	MOP
TSALBP-1/3	Min	dado	Min	MOP
TSALBP-2/3	dado	Min	Min	MOP
TSALBP-1/2/3	Min	Min	Min	MOP

Tabla 1. Tipología de problemas TSALBP. Las desinencias 1, 2 y 3 se refieren a la minimización de m, c y A, respectivamente.

La tabla 1 muestra ocho tipos de problemas diferentes, que pueden tratarse de problemas de factibilidad, indicados con F en la columna “Tipo”, de optimización mono-objetivo, se indica con OP, o de optimización multi-objetivo, que se indica con MOP. Cuando el problema es MOP, las desinencias 1, 2 y 3 se concatenan con “/” para nombrar el problema.

Por ejemplo, TSALBP-1 (una extensión del SALBP-1) consiste en minimizar el número de estaciones m dados unos valores fijos del tiempo de ciclo c y del área disponible por estación A, mientras que TSALBP-F es un problema de factibilidad dados unos valores fijos de m, c y A.

Para describir formalmente el modelo TSALB-F emplearemos la siguiente notación adicional:

E_j, L_j Primera y última estación a la que se puede asignar la tarea j

UB Cota superior del número de estaciones de trabajo.

x_{jk} variable de decisión igual a 1 si la tarea j se asigna a la estación k (0, en caso contrario)

En tales condiciones, las expresiones (1)-(6) establecen el modelo TSALBP-F.

$$\sum_{k=E_j}^{L_j} x_{jk} = 1 \qquad 1 \le j \le n \tag{1}$$

$$\sum_{k=1}^{UB} \max_{1\le j\le n} \{x_{jk}\} \le m \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^{n} t_j x_{jk} \le c \qquad 1 \le k \le UB \tag{3}$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_j x_{jk} \le A \qquad 1 \le k \le UB \tag{4}$$

$$\sum_{k=E_i}^{L_i} k x_{ik} \le \sum_{k=E_j}^{L_j} k x_{jk} \qquad (1 \le i, j \le n) \wedge (i \in P_j) \tag{5}$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \qquad (1 \le i \le n) \wedge (1 \le k \le UB) \tag{6}$$

Las igualdades (1) aseguran que cada tarea se asigna a una sola estación. Las inecuaciones (2), (3) y (4) aseguran, respectivamente, que el número de estaciones con carga no supere a las permitidas, que el tiempo de carga en cada estación no supere el tiempo de ciclo y que el área requerida en cada estación no supere el área disponible. Las inecuaciones (5) aseguran el cumplimiento de las ligaduras de precedencia entre tareas. Finalmente, las restricciones (6) definen las variables de decisión como binarias.

En TSALBP-F, los elementos m, c y A actúan como parámetros, mientras que en el resto de problemas, uno o más de uno de estos elementos actúan como variables a optimizar.

Las expresiones (7), (8) y (9) se corresponden con los objetivos de los problemas TSALBP-1, TSALBP-2 y TSALBP-3, respectivamente.

$$\min\ Z_1 = m = \sum_{k=1}^{UB} \max_{1\le j\le n} \{x_{jk}\} \tag{7}$$

$$\min Z_2 = c = \max_{1\le k\le UB} \left\{\sum_{j=1}^{n} t_j x_{jk}\right\} \tag{8}$$

$$\min\ Z_3 = A = \max_{1\le k\le UB} \left\{\sum_{j=1}^{n} a_j x_{jk}\right\} \tag{9}$$

Los objetivos de los problemas MOP (TSALBP-1/2, TSALBP-1/3, TSALBP-2/3 y TSALBP-1/2/3), se pueden formalizar fácilmente a partir de los objetivos elementales establecidos en las expresiones (7), (8) y (9).

3. Un algoritmo de hormigas para la resolución del TSALBP

Muchas especies de hormigas, para obtener su alimento, se apoyan en el seguimiento (rastreo) y depósito de una sustancia química denominada feromona. Dada una fuente de alimento, una colonia de hormigas tiende a encontrar de forma natural el camino más corto entre la fuente y su nido, a través de dos procesos. Primero, las hormigas depositan feromona en el trayecto; y, segundo, las hormigas siguen, normalmente, el camino donde encuentran más feromona depositada con anterioridad. Si las hormigas encuentran un camino más corto, más hormigas circularán por ese camino y más feromona se depositará por él. La adaptación de estas ideas al campo de la optimización se conoce como algoritmos de hormigas, los cuales aplican de forma iterativa las tres fases siguientes: (1) construcción de soluciones con un procedimiento aleatoriezado, (2) mejora local de soluciones y (3) depósito de feromona para reportar información a la construcción de nuevas soluciones.

Este apartado se centra en una aplicación de los algoritmos de hormigas para el problema de equilibrado de líneas de ensamblado con restricciones de tiempo y espacio en las estaciones. El algoritmo presentado se enmarca en el esquema Ant System (AS), [6]. A continuación se detalla el esquema global del algoritmo, para posteriormente mostrar las tres fases en que se divide un algoritmo de hormigas.

3.1. Esquema general del procedimiento

Si bien la generación de soluciones para la resolución de problemas semejantes al SALBP-1 es sencilla, es difícil definir un procedimiento eficiente de mejora local aplicable, véase en [2] un caso concreto, o [13] para una discusión más general de los problemas. Es por ello que se propone una estrategia de resolución semejante a la utilizada por los procedimientos de búsqueda tabú, [13], para el SALBP-1, basada en la resolución iterativa de instancias SALBP-2 cada vez más restringidas.

El procedimiento arranca con la construcción de una solución inicial para una instancia TSALBP-1 empleando la regla heurística presentada en el apartado 3.2; así se obtiene una solución válida para un número de estaciones igual a *m*. Posteriormente, se aplica un procedimiento AS para resolver la instancia TSALBP-2 con *m*-1 estaciones; si se obtiene una solución con tiempo de carga máximo y espacio requerido máximo iguales o inferiores a los valores concedidos para la instancia TSALBP-1 original, la solución hallada se considera mejor que la conocida, pues se reduce el número de estaciones requerido. Este proceso puede volver a aplicarse reduciendo de nuevo el número de estaciones hasta que se alcanza una condición de final. Para evitar el estancamiento en zonas no prometedoras del espacio de soluciones, se añade un mecanismo de diversificación basado en reiniciar la información de feromona cuando, tras generar un número de soluciones igual a 50 veces el número de tareas del ejemplar TSALBP-2, no se halla una solución válida para dicha instancia.

Si bien este esquema iterativo permite aplicar algoritmos de mejora local (véase apartado 3.3) mejor dirigidos que en un esquema basado en la resolución directa del TSALBP-1, la generación de soluciones iniciales es más complicada.

La propuesta consiste en aplicar de forma iterativa el procedimiento mostrado en el apartado 3.2, resolviendo instancias TSALBP-1, hasta alcanzar una solución factible para el TSALBP-2. Inicialmente se intenta construir una solución para la instancia a resolver con un tiempo y espacio concedidos iguales al tiempo de ciclo y al espacio disponible, respectivamente. En caso de que la solución ofrecida por el procedimiento requiera un número de estaciones mayor que el deseado, se incrementa el tiempo de ciclo y espacio disponible en un 1% del concedido inicialmente, o en una unidad en caso de que el porcentaje sea inferior a 1, y se construye una solución inicial compatible con el nuevo tiempo de ciclo y espacio concedidos. De igual forma, cuando se obtiene una solución compatible con el tiempo de ciclo y espacio modificados, éstos se reducen en el valor máximo entre un 1% de los valores concedidos y una unidad. Las soluciones con un número de estaciones iguales a la instancia TSALBP-2 en tratamiento se someten a la mejora local (véase apartado 3.3), y se deposita feromona para la construcción de futuras soluciones (apartado 3.4).

A continuación se muestra la forma de generar soluciones para el SALBP-1. Posteriormente se muestra la mejora local para el SALBP-2 y las técnicas para la gestión de rastro utilizadas por el procedimiento constructivo.

3.2. Generación de soluciones

La mayoría de procedimientos constructivos para la resolución de problemas de equilibrado se basan en la aplicación de reglas de prioridad o procedimientos enumerativos restringidos. Un estudio detallado de los procedimientos disponibles puede verse en [14].

Los procedimientos basados en reglas de prioridad se basan en la construcción de soluciones factibles para los problemas de tipo SALBP-1. Mediante unas reglas, se otorga a cada tarea un valor de prioridad que depende de su tiempo de proceso y sus relaciones de precedencia, véase [7]. Las prioridades concedidas se utilizan en el proceso constructivo para escoger las tareas a asignar a las estaciones.

La literatura recoge dos esquemas para la construcción de soluciones: uno orientado a estaciones y otro orientado a tareas. En este trabajo se utiliza el primero de ellos, debido a que diversos experimentos computacionales para el SALBP-1, véase [13], indican que el procedimiento orientado a estaciones ofrece, en general, mejores resultados.

El procedimiento se inicia con la apertura de una primera estación (k=1), y se asignan sucesivamente tareas a ella hasta que no se pueden asignar más tareas; en tal caso, se cierra dicha estación y se abre una estación nueva. En cada iteración, se asigna a la estación en curso la tarea candidata con mayor prioridad; una tarea es candidata cuando sus tareas precedentes han sido asignadas y requiere menos tiempo y espacio que los disponibles en la estación en construcción. Cuando no se pueden asignar más tareas a la estación abierta, ésta se cierra y se abre la estación siguiente k+1; el procedimiento finaliza cuando no quedan más tareas por asignar.

Los procedimientos constructivos propuestos en este trabajo emplean una regla que prioriza de forma conjunta la duración de una tarea y el número de sus tareas sucesoras. En dicha adaptación, se tiene en cuenta también el espacio requerido, y se normalizan los valores de los tres elementos que componen la regla (espacio, tiempo y sucesoras) para conseguir un rango de valores estable que sea útil para cualquier instancia del problema. Esto permite trabajar en el algoritmo de hormigas con valores de visibilidad semejantes en todas las instancias que se resuelven.

En general, el peso heurístico de una tarea j, η_j, es igual a:

$$\eta_j = \frac{a_j}{A} + \frac{t_j}{c} + \frac{\left|F_j^*\right|}{\max_{i \in V}\left|F_i^*\right|} \tag{10}$$

donde F_j^* es el conjunto de todas las tareas sucesoras a la tarea j.

En el caso de utilizar un esquema constructivo probabilístico, como es propio de los algoritmos de hormigas, es preciso adaptar el procedimiento anteriormente descrito. El criterio probabilístico de selección debe depender de la información heurística de la tarea, η_j, y de la información provista por la feromona depositada por anteriores soluciones, τ_{kj}. La feromona puede utilizarse de dos maneras, ya sea directamente, relacionando una tarea, j, con la estación, k, en construcción, o acumulativamente, relacionando una tarea, j, con la estación en construcción, k, y aquéllas ya cerradas ($h<k$), tal como en [10].

En caso de evaluación directa, la probabilidad de selección de la tarea candidata j perteneciente al conjunto D_k de tareas candidatas para ser asignadas a la estación k, se determina así:

$$p_{kj} = \frac{\left[\tau_{kj}\right]^{\alpha}\left[\eta_j\right]^{\beta}}{\sum_{i \in D_k}\left[\tau_{ki}\right]^{\alpha}\left[\eta_i\right]^{\beta}} \tag{11}$$

donde τ_{kj} y τ_{ki} corresponde a la feromona depositada por soluciones anteriores y η_j, η_i al peso heurístico de cada tarea.

En caso de evaluación acumulativa, la probabilidad de selección se determina así:

$$p_{kj} = \frac{\left(\sum_{h=1}^{k}\left[\tau_{hj}\right]\right)^{\alpha} \cdot \left[\eta_j\right]^{\beta}}{\sum_{i \in D_k}\left(\sum_{h=1}^{k}\left[\tau_{hi}\right]\right)^{\alpha} \cdot \left[\eta_i\right]^{\beta}} \tag{12}$$

donde h se refiere a las estaciones ya cerradas o a la abierta en la solución en curso.

En ambos casos, α y β son constantes que definen, respectivamente, la influencia del componente heurístico y la de la información del rastro, en la decisión de las hormigas.

3.3. Procedimiento de mejora local

A las soluciones ofrecidas por el procedimiento constructivo se les aplica una mejora local que transforma una solución factible en otras.

Los procedimientos de mejora para los problemas de equilibrado de líneas se basan en intercambios y movimientos, véase [11]. Para explicar estos procedimientos es necesario definir, para cada tarea j, la primera, ES_j, y última, LP_j, estación, de la iteración en curso, entre las cuales una tarea puede ser asignada en consonancia a la asignación de sus predecesoras y sucesoras inmediatas.

En general, un movimiento (j,k_1,k_2) describe el movimiento de la tarea j desde la estación k_1 hasta la estación k_2, donde $k_1 \neq k_2$ y $k_2 \in [ES_i,LP_i]$, mientras que un intercambio (j_1, k_1, j_2, k_2) mueve simultáneamente la tarea j_1 desde la estación k_1 hasta la k_2 y la tarea j_2 desde la estación k_2 hasta la k_1. Obviamente las tareas j_1 y j_2 no están relacionas por precedencia y las estaciones k_1 y k_2 son distintas, y dicho intercambio es factible si los movimientos (j_1, k_1, k_2), (j_2, k_2, k_1) son factibles.

Adicionalmente, el conjunto de tareas candidatas que pueden mejorar la solución del TSALBP-2 está formado por aquellas tareas que forman parte de las estaciones con mayor ocupación respecto al tiempo de ciclo o al espacio disponible, y, por ello, éstas son las únicas tareas que son tenidas en cuenta en el procedimiento de mejora local. En la implementación realizada, se identifica una de las estaciones críticas respecto a duración y otra respecto al espacio y se comprueban todas las posibles transformaciones tanto de movimientos como de intercambios, consolidando las transformaciones que mejoran el valor de la solución. El algoritmo de mejora se detiene si en el vecindario de una solución no se consiguen mejoras o cuando se obtiene una solución compatible con el espacio y el tiempo de ciclo concedidos a la instancia.

3.4. Mantenimiento de feromona

Inicialmente, la matriz de feromona contiene un valor constante e igual para todas las alternativas; en nuestro caso se ha fijado a 0.5.

Cada vez que se construye una solución con el número de estaciones deseado, y tras aplicarle el procedimiento de mejora local, se procede a la evaporación de una proporción fija, ρ, de la feromona depositada en la matriz de rastro; esto es:

$$\tau_{kj} \leftarrow (1-\rho)\cdot\tau_{kj} \tag{13}$$

Posteriormente se deposita feromona según la calidad de la solución obtenida e igual a:

$$\tau_{kj} \leftarrow \rho \cdot \frac{c^* + A^*}{c^c + A^c} + \tau_{kj} \tag{14}$$

Donde c^c y A^c representan el tiempo de ciclo y el área requerida por la solución que deposita feromona y c^* y A^* son el tiempo de ciclo y área disponible impuestas en la instancia.

4. Experiencia Computacional

Para evaluar la calidad de los resultados ofrecidos por los procedimientos propuestos, se realizan dos experiencias computacionales con la colección de instancias de referencia sita en http://www.bwl.tu-darmstadt.de/bwl3/forsch/projekte/alb/index.htm), constituida por 269 ejemplares.

La primera experiencia computacional, cuya utilidad es comprobar la validez de los algoritmos implementados, se basa en la resolución del problema SALBP-1 con el algoritmo presentado. Para ello, en todas las instancias, se iguala el espacio disponible (en cada estación) al tiempo de ciclo, y se igualan, para cada tarea, los espacios requeridos a las duraciones. En este caso, una solución al problema TSALBP-1 coincide con la solución del problema SALBP-1.

Previamente, se determinó el juego más efectivo de parámetros de control, así como la mejor forma de leer la feromona (acumulativa o directa), obteniendo como mejor combinación entre las probadas unos valores de α=5, β=1 y ρ=0.1, con lectura directa.

En la tabla 1 se muestra la comparación de resultados obtenidos por el algoritmo de hormigas propuesto, el procedimiento exacto SALOME y otros dos basados en búsqueda tabú, véase [14], con un tiempo de cálculo de 500 s.

Cada instancias de la colección se resuelve considerando su grafo de precedencias original (ANT-D) y su grafo de precedencias invertido (ANT-R), imponiendo dos condiciones de parada al algoritmo de hormigas: un máximo de 30 s para el tiempo de computación o la obtención de la solución óptima. También se tiene en cuenta la mejor solución entre las dos que resultan al considerar los arcos del grafo de precedencias en ambos sentidos (ANTS), y se registra, en este caso, un tiempo de computación igual a la suma de ambas resoluciones.

	#opt	Des.m	CPU s.
SALOME	227	0.46	98.9
PrioTabu	200	0.86	101.8
EurTabu	214	0.63	62.6
ANTS-D	218	0.7	6.53
ANTS-R	214	0.8	7.31
ANTS	227	0.6	13.84

Tabla 2. Número de óptimos, desviación media y máxima y tiempo medio de cálculo para cada algoritmo.

En la tabla 2, puede verse que el algoritmo de hormigas, obtiene soluciones semejantes a la mejor implementación presentada de un algoritmo exacto para el SALBP-1, y que obtiene resultados claramente superiores que la mejor metaheurística específica para el problema, incluyendo la heurística EurTabu que incorpora una etapa de enumeración implícita en la construcción de la solución inicial.

La segunda experiencia computacional se centra en la resolución del TSALBP-1. Para posibilitar la comparación del algoritmo propuesto con otros futuros (pues se trata de un problema inédito), se ha utilizado la misma colección de instancias añadiendo el espacio requerido por cada tarea $a_i = t_{n-i+1}$,($1 \leq j \leq n$) y un espacio disponible en cada estación igual al tiempo de ciclo.

En el experimento, se utilizan los mismos parámetros de control que los utilizados para el caso SALBP-1, con un tiempo máximo de computación igual a dos minutos por instancia, y se comparan los valores obtenidos con las mejores soluciones conocidas para el caso SALBP-1.

	ANTS-D	ANTS-R	ANTS
#opt	49	45	52
Desv.	11.47	12.02	11.06
Incr. m.	2.44	2.62	2.39
Incr. M.	14	14	14

Tabla 3. Número de óptimos (#opt), desviación media (Desv.), incremento medio (Incr. m.) y máximo (Incr. M.) para la colección de instancias.

Del análisis de los resultados mostrados en la tabla 3, puede verse que las instancias de TSALB-1 requieren más estaciones que las instancias de originales de SALBP-1 (un incremento máximo del número de estaciones igual a 14 para los tres procedimientos y un incremento entre 2 y 3 estaciones).

5. Conclusiones

El presente trabajo muestra una nueva familia de problemas de equilibrado de líneas de montaje detectado en el sector de automoción a la que hemos denominado Time and Space constrained Assembly Line Balancing Problems. Se formula un modelo para una de sus posibles variantes. Tras ello, se propone un algoritmo de hormigas para la resolución de dicho problema. Se comprueba la eficacia del algoritmo comparando las soluciones ofrecidas por éste con las presentes en la literatura para el SALBP-1 y posteriormente se analizan los resultados ofrecidos para el TSALBP-1 y se comprueba la mayor dificultad de resolución de dicho problema. También se muestra el impacto que se genera al considerar restricciones de compatibilidad de espacio (utilizado y disponible) en los problemas de equilibrado de líneas de montaje, requiriéndose más estaciones de trabajo que para el caso SALBP-1.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto DPI2004-03475 del MEC del Gobierno Español. Agradecemos también el apoyo dado por la empresa Nissan Motor Ibérica y por la Cátedra Nissan de la Universitat Politècnica de Catalunya a la realización de este trabajo.

Referencias

[1] Agnetis, A., A. Ciancimino, M. Lucertini y M. Pizzichella. Balancing Flexible Lines for Car Components Assembly. International Journal of Production Research (1995) 33, 333-350

[2] Bautista, J., J. Pereira, Ant Algorithms for Assembly Line Balancing. Lecture Notes in Computer Science (2002) 2463, Springer, Berlín 65-75.

[3] Baybars, I. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. Management Science (1986) 32 (8) 909-932.

[4] Daganzo, C.F y D.E. Blumfield Assembly System Design Principles and Tradeoffs, Interna-tional Journal of Production Research (1994) 32, 669-681

[5] Deckro, R.F. Balancing Cycle Time and Workstations. IIE Transactions (1989) 21, 106-111

[6] Dorigo M., V. Maniezzo y A. Colorni The Ant System: Optimization by a colony of cooper-ating agents. IEEE Transactions on Systems, Man., and Cybernetics – Part B, (1996) 26(1) 29-41

[7] Hackman, S.T. M.J. Magazine and T.S. Wee Fast, Effective Algorithms for Simple Assem-bly Line Balancing Problems. Operations Resarch (1989) 37, 916-924.

[8] Hoffmann, T.R. Eureka. A hybrid system for assembly line Balancing. Management Science, (1992) 38 (1), 39-47.

[9] Johnson R.V. Optimally balancing assembly lines with "FABLE". Management Science (1988) 34, 240-253

[10] Merkle, D., M. Middedorf, H. Schmeck Ant Colony Optimization for Resource Constrained Project Scheduling. GECCO-2000. (2000)

[11] Rachamadugu R., B. Talbot. Improving the equality of workload assignments in assembly lines, International Journal of Production Research (1991) 29, 619-633

[12] Scholl, A. y R. Klein. Balancing Assembly lines effectively – A computational comparison. European Journal of Operational Research (1999) 114,50-58

[13] Scholl A. y S. Voss Simple assembly line balancing – Heuristic approaches, Journal of Heuristics (1996) 2, 217-244.

[14] Scholl, A. Balancing and Sequencing of Assembly Lines, Physica-Verlag, Heidelberg (1999)

[15] Talbot,F.B., J.H. Patterson y W.V. Gehrlein A comparative evaluation of Heuristic Line Balancing Techniques, Management Science (1986) 32, 430-454.