

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTORA POR LA  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
*DOCTORADO EN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS*

Tesis Doctoral

***Aportaciones a problemas de secuencias en  
entornos productivos JiT mediante  
procedimientos heurísticos, exactos e híbridos***

Director: JORDI PEREIRA GUDE

Doctoranda: MARIONA VILÀ BONILLA

Departamento de Organización de Empresas

Barcelona, Julio 2014



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA



## **Resumen**

*Esta tesis doctoral titulada “Aportaciones a problemas de secuencias en entornos productivos JIT mediante procedimientos heurísticos, exactos e híbridos” está formada por tres publicaciones que presentan diversos métodos de resolución para varios problemas de secuenciación de actividades en sistemas productivos Just-in-Time. En primer lugar, se presenta un procedimiento exacto basado en Branch-and-Bound para la resolución del problema de equilibrado de líneas de montaje simples (SALBP). En segundo lugar, se aplica otro procedimiento exacto basado en Branch-and-Bound para la resolución del problema de equilibrado y asignación de trabajadores de líneas de montaje (ALWABP). Por último, se presenta un procedimiento heurístico y un algoritmo exacto para la secuenciación de actividades en una máquina, que penaliza tanto adelantos como retrasos. Todos los procedimientos presentados tienen buenos resultados en sus respectivas experiencias computacionales y aportan nuevas metodologías que pueden aplicarse a problemas similares.*

## **Abstract**

*This thesis, entitled “Contributions to sequencing problems in JIT productive environments using heuristic, exact and hybrid procedures” consists of three publications that address the resolution of job sequencing problems in Just-in-Time productive systems. Firstly, an exact Branch-and-Bound based procedure is presented for solving the simple assembly line balancing problem (SALBP). Secondly, a different Branch-and-Bound based procedure is applied to the assembly line worker assignment and balancing problem (ALWABP). Lastly, a heuristic procedure and an exact algorithm are devised for solving the one machine scheduling problem with earliness and tardiness penalties. All of the presented procedures obtain good results in their respective computational experiments and provide new methodologies that can be applied to similar problems.*



# ÍNDICE

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. PRODUCCIÓN JUST IN TIME
3. PROBLEMAS A TRATAR
  - 3.1.EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE SIMPLES
  - 3.2.EQUILIBRADO Y ASIGNACIÓN DE TRABAJADORES DE LÍNEAS DE MONTAJE
  - 3.3.SECUENCIACIÓN DE ACTIVIDADES EN UNA MÁQUINA
4. ESTADO DEL ARTE
  - 4.1.EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE SIMPLES
  - 4.2.EQUILIBRADO Y ASIGNACIÓN DE TRABAJADORES DE LÍNEAS DE MONTAJE
  - 4.3.SECUENCIACIÓN DE ACTIVIDADES EN UNA MÁQUINA
5. APORTACIONES AL EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE SIMPLES
6. APORTACIONES AL EQUILIBRADO Y ASIGNACIÓN DE TRABAJADORES DE LÍNEAS DE MONTAJE
7. APORTACIONES ALASecuenciación de actividades en una MÁQUINA
8. CONCLUSIONES
9. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS
- 10.BIBLIOGRAFÍA



## 1. INTRODUCCIÓN

Una empresa en un entorno industrial tiene como principal objetivo satisfacer las necesidades de sus clientes, mediante la transformación de uno o más bienes a los que aporta un cierto valor. Esta transformación se realiza en la llamada sección de producción de la empresa, cuya función es transformar una o varias materias primas o productos semi-acabados en el producto final que será destinado a sus clientes. Además, una empresa privada en el entorno socio-económico actual debe también generar beneficios para poder continuar su actividad, por lo que es importante que la sección de producción de la empresa funcione de la manera más eficiente posible.

Esto justifica la existencia y la importancia de la organización de la producción, una disciplina que se dedica al estudio de los problemas que aparecen en las operaciones logísticas y productivas de una empresa. Su objetivo es que estas operaciones se realicen de la manera más eficiente y con el mínimo coste posible. Entre otros, esta disciplina incluye problemas de diseño, planificación y secuenciación de operaciones, la resolución de los cuales puede maximizar la eficiencia de la producción y reducir los costes.

Los costes que desean minimizarse en este contexto son, principalmente, los costes de producción y de almacenaje. Los costes de producción pueden reducirse mediante el correcto diseño de los sistemas productivos, así como el correcto control de las operaciones de producción, una vez el sistema está en funcionamiento. Los costes de almacenaje pueden ser reducidos aplicando ciertas estrategias de producción, como el Just-in-Time, cuya prioridad es producir bajo pedido para eliminar (en medida de lo posible) los stocks. En el siguiente apartado se profundiza en el concepto de producción Just-in-Time y se relaciona con los diversos problemas de organización de la producción que se estudian en esta tesis.

## 2. PRODUCCIÓN JUST IN TIME

El Just-in-Time [25] es una estrategia de producción cuyo objetivo es aumentar la productividad y reducir los costes, especialmente los costes de almacenamiento. Se pretenden reducir los costes de posesión reduciendo al máximo el espacio dedicado tanto al almacenamiento de piezas como al almacenamiento de productos acabados. Para conseguir esto, la producción se realiza bajo pedido para servir la demanda “justo a tiempo”.

Dados los elevados volúmenes de producción y los procesos de producción homogéneos y estandarizados que se presentan en la industria en este contexto, la producción suele organizarse en sistemas orientados a producto. En un sistema de

producción orientado a producto, los operarios, maquinaria y herramientas que constituyen el sistema productivo se sitúan a lo largo del recorrido que realiza el producto inacabado por la planta. Una cinta transportadora, u otro sistema de transporte similar, transporta los productos inacabados de una estación de trabajo a la siguiente. En las estaciones de trabajo, los operarios o robots allí situados realizan sobre el producto inacabado una serie de operaciones que tienen como objetivo completar la transformación del producto.

Un sistema de producción orientado a producto, cuyo ejemplo más clásico son las líneas de montaje, puede ayudar a reducir el tiempo y los costes de producción. También puede simplificar las tareas de control y programación de la producción, haciendo que el proceso de montaje sea fácilmente automatizable [33].

A pesar de sus múltiples ventajas en términos de tiempo ahorrado en la producción y homogeneización de ésta, una línea de montaje es un sistema mucho menos flexible que un sistema de producción orientado a proceso. Dado que en un entorno Just-in-Time se suele trabajar bajo pedido, esta falta de flexibilidad que presentan las líneas de montaje debe tratar de paliarse con (1) un correcto diseño de la línea, que garantice una máxima eficiencia; y (2) una correcta gestión de la línea, incluyendo un control continuo de las operaciones que se realizan en ella una vez ha empezado su funcionamiento.

Con esto se justifica la importancia de los problemas de secuencia en entornos Just-in-Time, que son los problemas en los que se centran las publicaciones que forman parte de esta tesis.

En esta tesis se estudian dos problemas de diseño de líneas de montaje, que corresponden al equilibrado de la línea. Este problema consiste en la asignación de las diversas operaciones de transformación a las distintas unidades productivas (estaciones de trabajo). El equilibrado de líneas de montaje también se considera un problema de secuencia[1], puesto que una vez definida la asignación de las operaciones en las estaciones, también queda definido un orden relativo en que las operaciones deberán realizarse.

Dado que asimilar un sistema productivo complejo a un sistema de una sola máquina es una simplificación común para su estudio, el tercer problema que se presenta en esta tesis trata la secuenciación de operaciones en una máquina. En este problema se pretende obtener una secuencia en que deben realizarse las operaciones de transformación en una máquina para que las piezas se terminen en un instante lo más próximo posible a su fecha de entrega. Por lo tanto, se penalizan de forma cuadrática tanto las entregas adelantadas como los retrasos.



### 3. PROBLEMAS A TRATAR

En este apartado se pretende describir de forma breve los problemas que se tratan en esta tesis, contextualizándolos en un sistema productivo Just-in-Time como el descrito en el apartado anterior.

#### 3.1. Equilibrado de líneas de montaje simples

Una línea de montaje es un sistema de producción en continuo que se usa para la producción en masa de bienes a escala industrial. En una línea de montaje se dispone de diversas estaciones de trabajo, unidas por una cinta transportadora, donde se realiza una parte del proceso de producción. Estas estaciones se consideran independientes entre sí, ya que disponen de recursos (como operarios, maquinaria y herramientas) no compartidos con el resto de estaciones.

El trabajo de ensamblaje o transformación que debe realizarse para obtener como resultado el producto final se divide en operaciones elementales, llamadas tareas. Estas tareas tienen impuesto un orden relativo, dado por las relaciones de precedencia entre ellas (es posible que algunas tareas no puedan comenzar hasta que otra tarea haya finalizado).

El problema de equilibrado de líneas de montaje trata de encontrar un reparto o asignación de las tareas y/o recursos a las distintas estaciones, de manera que se optimice alguna medida de la eficiencia de la línea.

Las distintas características y particularidades que pueden presentar las líneas de montaje, así como los distintos objetivos que pueden tenerse en cuenta a la hora de equilibrar la línea, generan distintos problemas de equilibrado. Por lo tanto, el equilibrado de líneas de montaje no se considera un problema sino una familia de problemas, cuyas diferencias justifican su estudio por separado. Estas diferencias pueden deberse, por ejemplo, al *layout* de la línea, a la heterogeneidad de las estaciones o de los productos que se desean fabricar, al posible estudio de alternativas en los procesos de producción o a la posibilidad de trabajar en estaciones en paralelo.

Sin embargo, una parte sustancial de la literatura dedicada a los problemas de equilibrado de líneas de montaje estudia la formulación básica subyacente en la mayor parte de los problemas de esta familia. Esta formulación básica se conoce como el problema de equilibrado de líneas de montaje simples o SALBP (del inglés, *Simple Assembly Line Balancing Problem*).

El SALBP considera las siguientes hipótesis de trabajo[34]:

1. La producción en masa de un solo producto homogéneo.
2. Un proceso de producción único, conocido y fijo.

3. Una línea de montaje lineal cuya cinta transportadora funciona a velocidad constante. La velocidad de la cinta transportadora determina la tasa de producción, así como el tiempo del que disponen todas las estaciones para la realización de las tareas. Este tiempo es, por tanto, constante e igual para todas las estaciones y se conoce como tiempo de ciclo.
4. Una duración fija y determinista de las tareas.
5. Un juego de restricciones que corresponden a las relaciones de precedencia que existen entre las tareas.
6. Estaciones unilaterales y colocadas en serie a lo largo de la línea.
7. Estaciones independientes entre sí y equipadas para realizar cualquiera de las tareas.
8. La función objetivo es la maximización de una medida de eficiencia relacionada con el tiempo libre total de la línea (el tiempo libre de una estación se define como la resta entre el tiempo de ciclo y la suma de duraciones de las tareas asignadas a la estación). Esto se puede conseguir fijando el tiempo de ciclo y minimizando el número de estaciones (objetivo de tipo 1) o fijando el número de estaciones y minimizando el tiempo de ciclo (objetivo de tipo 2).

En la primera publicación presentada como parte de esta tesis, se estudia el SALBP-1, es decir, el problema de equilibrado de líneas de montaje simples con un objetivo de tipo 1.

El SALBP es un problema fundamentalmente teórico, pero su estudio permite la comparación de distintos métodos de resolución para problemas con distintas características. Su estudio también ha aportado nuevos procedimientos de resolución, que pueden ser aplicados a los problemas reales.

A continuación se presenta la definición y la formulación del SALBP-1.

Una instancia del SALBP-1 consta de (1) una serie de tareas en las cuales se ha dividido el proceso de fabricación o ensamblaje, (2) la duración de cada una de estas tareas (es decir, el tiempo necesario para realizar cada una de las tareas en una estación de trabajo), (3) las relaciones de precedencia que existen entre las tareas, que indicarían qué tareas deben completarse antes de poder realizar otra tarea concreta y (4) el tiempo de ciclo, es decir, el tiempo del que dispone cada estación para realizar las tareas que le han sido asignadas. Los datos (1), (2) y (3) pueden representarse en un grafo de precedencias (figura 1).

En este ejemplo, la tarea 1 dura 6 unidades de tiempo y precede las tareas 2 y 5.

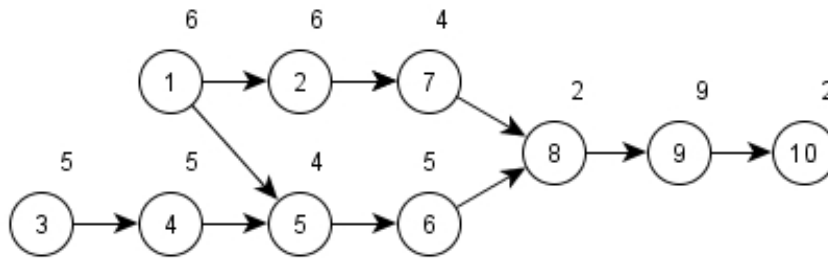


Figura 1: Grafo de precedencias ejemplo

El objetivo del problema es asignar cada una de las tareas a una estación de trabajo (las tareas son indivisibles, por lo que no será posible asignar una tarea a más de una estación). Esta asignación debe asegurar que no se sobrepase el tiempo de ciclo para ninguna estación, por lo que la suma de las duraciones de las tareas asignadas a cada estación debe ser siempre menor o igual al tiempo de ciclo.

Además, la asignación debe respetar las relaciones de precedencia entre las tareas. Dado que la línea de montaje tiene un *layout* lineal, las estaciones pueden ser numeradas de forma que una tarea siempre esté asignada a una estación de numeración igual o superior a la de sus predecesoras e igual o inferior a la de sus sucesoras.

Por ejemplo, en la instancia presentada en la figura 1, la tarea 5 debe ser asignada a la misma estación o a una de numeración superior que su predecesora, la tarea 4; y a la misma estación o de numeración inferior que su sucesora, la tarea 6. Por lo tanto, se podría asignar la tarea 4 a la estación 2 y las tareas 5 y 6 a la estación 3, pero no es posible asignar la tarea 4 y 6 en la estación 2 y la tarea 5 en la estación 3, porque esto viola la relación de precedencia que existe entre la tarea 5 y la tarea 6.

Además, si el tiempo de ciclo en el ejemplo fuese 10, las tareas 4 y 5 podrían compartir estación (la suma de sus duraciones es 9, por tanto, la estación dispone de tiempo suficiente para realizarlas), pero las tareas 1 y 2 no pueden compartir estación (la suma de sus duraciones es 12, lo cual es superior al tiempo del que dispone la estación).

Obviamente, no existe una única asignación posible de las tareas a las estaciones, sino que el número de posibles combinaciones es muy elevado. En el SALBP-1, se pretende encontrar la asignación que minimice los tiempos muertos en la línea (entendiendo como tiempo muerto de una estación la resta entre el tiempo de ciclo y la suma de las duraciones de las tareas asignadas a esta estación). Dado un tiempo de ciclo fijo, el tiempo muerto total puede reducirse minimizando el número de estaciones en la línea.

Suponiendo un conjunto de  $n$  tareas, cada tarea  $i$  ( $i=1, \dots, n$ ) con una duración  $d_i$ , una cota superior sobre el número de estaciones  $m$ , un tiempo de ciclo  $c$  y un grafo de precedencias  $G(V,A)$ , la formulación del problema viene dada por las ecuaciones (1)-(5)[29]. La formulación de este problema requiere la declaración de un conjunto de

variables que representen la asignación de las tareas  $i$  a las estaciones  $j$ ,  $X_{ij}$  (siendo  $X_{ij}$  una variable binaria con valor uno si la tarea  $i$  está asignada a la estación  $j$  y cero en caso contrario), y un conjunto de variables que indique las estaciones  $j$  que están en uso,  $Y_j$  (siendo  $Y_j$  una variable binaria que toma valor uno si la estación  $j$  tiene alguna tarea asignada y cero en caso contrario).

$$[MIN] \sum_{j=1}^m Y_j \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n d_i \cdot X_{ij} \leq c \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m j \cdot X_{ij} \leq \sum_{j=1}^m j \cdot X_{i'j} \quad \forall (i, i') \in G(V, A) \quad (4)$$

$$X_{ij} \leq Y_j \quad \forall j = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$X_{ij} \in [0,1], Y_j \in [0,1] \quad \forall j = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n \quad (6)$$

La función objetivo (1) minimiza el número de estaciones en uso. Los valores de las variables están sujetos a cuatro restricciones: el conjunto de restricciones (2) asegura que la suma de las duraciones de las tareas asignadas a cada estación no supere el tiempo de ciclo para ninguna estación; el conjunto de restricciones (3) garantiza que todas las tareas hayan sido asignadas exactamente a una estación; el conjunto de restricciones (4) asegura que se cumplan las relaciones de precedencia entre las tareas (por lo tanto, que todas las tareas se asignen en una estación de numeración superior o igual que la de sus precedentes, y a una estación de numeración inferior o igual a la de sus sucesoras); el conjunto de restricciones (5) tiene la función de asegurar que las estaciones estén en uso para poder asignar alguna tarea; y por último, el conjunto de restricciones (6) define las variables del problema como binarias.

### 3.2. Equilibrado y asignación de trabajadores de líneas de montaje

Los problemas de equilibrado que incluyen características adicionales de la línea, otras restricciones y/o objetivos distintos, se conocen como problemas generales de equilibrado de líneas de montaje (GALBP, del inglés *General Assembly Line Balancing*

*Problem*). Estos problemas se generan a partir de la formulación del SALBP añadiendo características que representan de manera más adecuada las líneas de montaje reales.

El problema de equilibrado y asignación de trabajadores de líneas de montaje se construye a partir de la formulación del SALBP teniendo en cuenta que las duraciones de las tareas pueden depender de las capacidades del trabajador o el robot que las realice [16]. Como solución a este problema se requiere no sólo la asignación de las tareas, sino también la asignación de los operadores de la línea (ya sean trabajadores o robots) a las estaciones de trabajo.

Este problema ha sido estudiado por varios autores, con diversos nombres y bajo distintas consideraciones. Rubinovitz et al. presentaron el primer trabajo [31] en que se pretende resolver el problema de equilibrado de la línea de montaje de manera simultánea con el problema de asignación de operadores a las estaciones. En este artículo, los autores consideran que existen distintos tipos de robot que pueden realizar las tareas, cuyas características modifican los tiempos de operación que necesitan para terminar las tareas. El número de robots que existen y que pueden escogerse de cada tipo no está limitado, ya que no se considera un diseño de la línea previo. El objetivo es, por lo tanto, encontrar una asignación de las tareas y los robots a la estaciones que, dado un tiempo de ciclo, minimice el número de estaciones y de robots necesarios. Este problema se conoce como el problema de equilibrado de líneas de montaje robóticas (o RALBP, del inglés *Robotic Assembly Line Balancing Problem*).

Más recientemente, Miralles et al. presentaron un trabajo [23] que estudia la asignación de tareas y de trabajadores en una línea de montaje en un centro de trabajo para personas discapacitadas. Los autores consideran una plantilla conocida y formada por trabajadores con distintos niveles de discapacidad, que altera el tiempo que estos trabajadores requieren para completar cada tarea. En este caso, la plantilla existente representa una restricción más, ya que el número de operarios (y por tanto, de estaciones) está limitado. Para diferenciarlo del RALBP, el problema descrito se conoce como problema de equilibrado y asignación de trabajadores de líneas de montaje (o ALWABP, del inglés *Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem*).

En el segundo artículo que conforma esta tesis doctoral se estudia el ALWABP (en que los operadores son únicos). En el trabajo que se presenta se pretende minimizar el tiempo de ciclo de la línea para una plantilla conocida (considerando que cada trabajador se asigna a una sola estación, esto es equivalente a un número de estaciones dado). Este problema recibe el nombre de ALWABP-2 y corresponde al reequilibrado de la línea. Esta situación se produce cuando el número de operadores procede de un diseño existente de la línea, pero por cambios de maquinaria o del mix de productos se han modificado los tiempos de operación.

El ALWABP-2 puede definirse formalmente usando una formulación muy similar a la presentada para el SALBP-1 y que utiliza la misma nomenclatura. Para la formulación del ALWABP es necesario definir un conjunto de operadores  $O$  que pueden realizar las tareas, y las duraciones de cada tarea  $i$  ( $i=1, \dots, n$ ) tienen un valor distinto,  $d_{ik}$ , para cada operador  $k$  ( $k=1, \dots, |O|$ ). Nótese que el número de operadores corresponde al número de estaciones de la línea, por lo tanto  $m=|O|$ . También se requiere la declaración de un conjunto de variables que represente la asignación de los operarios  $k$  a las estaciones  $j$ ,  $W_{kj}$  (donde  $W_{kj}$  es una variable binaria cuyo valor es uno si el operador  $k$  está asignado a la estación  $j$ ).

El problema de equilibrado y asignación de trabajadores de una línea de montaje puede formularse mediante las ecuaciones (7)-(13).

$$[MIN]c \quad (7)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m X_{ij} \cdot W_{kj} \cdot d_{ik} \leq c \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^m j \cdot X_{ij} \leq \sum_{j=1}^m j \cdot X_{i'j} \quad \forall (i, i') \in G(V, A) \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^m W_{kj} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^m W_{kj} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, m \quad (12)$$

$$X_{ij} \in [0,1]; W_{kj} \in [0,1] \quad \forall j = 1, \dots, m; \forall i = 1, \dots, n \quad (13)$$

La función objetivo (7) en este caso es minimizar el tiempo de ciclo, que queda definido por el conjunto de restricciones (8) como la máxima de las sumas de las duraciones de las tareas asignadas a una estación correspondientes al operador asignado a esa estación. En este problema encontramos de nuevo los dos conjuntos de restricciones (9) y (10), que son equivalentes a los conjuntos (3) y (4) en la formulación del SALBP-1 y que representan la necesidad de asignar todas las tareas y las relaciones de precedencia, respectivamente. Esta formulación también incluye los conjuntos de restricciones (11) y (12), que aseguran que cada operador sea asignado a una sola

estación y que cada estación tenga asignado un solo operador. Por último, las variables  $X_{ij}$  y  $W_{kj}$  se definen como binarias con el conjunto de restricciones (13).

### 3.3. Secuenciación de actividades en una máquina

En un sistema de producción Just-in-Time es usual trabajar bajo pedido con fechas de entrega poco flexibles. Es por ello que en este contexto se estudian problemas de secuenciación en que se penalizan tanto los adelantos (que suponen la necesidad de almacenar los productos finales hasta la fecha de entrega) como los retrasos (que representan entregas diferidas).

En el tercer y último artículo que forma parte de esta tesis doctoral se estudia un problema de secuenciación de actividades en una máquina en que se penalizan tanto los retrasos como adelantos de forma cuadrática. Penalizar con una función cuadrática tiene tres principales ventajas respecto a penalizar con una función lineal: (1) representa de forma más realista algunas penalizaciones que aumentan de manera no lineal; (2) ayuda a evitar secuencias solución en las que unas pocas actividades representan la mayor parte del retraso o del adelanto; y (3), penaliza con más dureza aquellas actividades que tienen un retraso o un adelanto elevado.

El artículo estudia un sistema productivo de una sola máquina, que puede usarse tanto para describir casos en que realmente hay una sola unidad productiva, como para estudiar sistemas de diversas máquinas en que una de ellas actúa como cuello de botella.

En el problema considerado no se permiten tiempos muertos, dado que los costes asociados a parar una máquina o mantenerla en punto muerto se consideran significativamente mayores que los costes que supone adelantar las entregas.

El problema planteado se define formalmente a continuación: un conjunto de  $n$  tareas independientes  $J=\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$  debe ser procesado en una sola máquina que no puede realizar más de una tarea a la vez. Cada una de las tareas requiere un tiempo de proceso  $p_j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) y tiene tres valores asociados que indican la fecha de entrega,  $d_j$ , la penalización por adelanto,  $h_j$ , y la penalización por retraso,  $w_j$ . Al no permitir tiempos muertos, el horizonte en que se pueden secuenciar las tareas se puede calcular como la suma de todos los tiempos de proceso,  $P$ . El objetivo es encontrar una secuencia para realizar todas las tareas que minimice una función cuadrática de penalización tanto de los adelantos como de los retrasos.

Dada una secuencia, una tarea  $j$  tiene un instante de finalización  $C_j$ , un adelanto  $E_j = \max\{0; d_j - C_j\}$  y un retraso  $T_j = \max\{0; C_j - d_j\}$ .

Para la formulación del problema debe declararse un conjunto de variables binarias  $x_{jt}$  ( $1 \leq j \leq n$  y  $p_j \leq t \leq P$ ), que tienen valor 1 si el instante de finalización de la tarea  $j$  es  $t$  y 0 en caso contrario. Considérese  $a_{jtt'}$  una constante con valor 1 si la tarea  $j$  con tiempo de finalización  $t$  se está procesando en el instante  $t'$  ( $t - p_j \leq t' < t$ ) y 0 en caso contrario. Finalmente, supóngase la aportación  $Q_{jt}$  a la función objetivo de asignar la tarea  $j$  para que se finalice en el instante  $t$ , tal y como se define en la ecuación (14).

$$Q_{jt} = h_j \cdot (\max\{0; d_j - t\})^2 + w_j \cdot (\max\{0; t - d_j\})^2 \quad (14)$$

El problema de secuenciación de actividades en una máquina en que se penalizan tanto los retrasos como adelantos de forma cuadrática puede formularse mediante las ecuaciones (15)-(18)[9]. Esto corresponde a una formulación con indexación temporal.

$$[MIN] \sum_{1 \leq j \leq n} \sum_{p_j \leq t \leq P} Q_{jt} \cdot x_{jt} \quad (15)$$

$$\sum_{1 \leq j \leq n} \sum_{p_j \leq t \leq P} a_{jtt'} \cdot x_{jt} \leq 1 \quad 0 \leq t' \leq P \quad (16)$$

$$\sum_{p_j \leq t \leq P} x_{jt} = 1 \quad 1 \leq j \leq n \quad (17)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\} \quad 1 \leq j \leq n; 0 \leq t \leq P \quad (18)$$

La función objetivo (15) minimiza la penalización cuadrática total. El conjunto de restricciones (16) asegura que sólo se procesa una de las tareas en un intervalo de tiempo dado y que no hay tiempos muertos. El conjunto de restricciones (17) asignan todas las tareas a la secuencia final y el conjunto (18) define el dominio del conjunto de variables.

## 4. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se pretenden revisar y analizar brevemente los trabajos publicados en la literatura especializada que tratan los problemas definidos en el apartado anterior y que resulten relevantes para la tesis que se presenta. En cada uno de los siguientes apartados se expone un estado del arte para cada uno de los problemas que componen esta tesis, centrándose en los métodos de resolución que se han aplicado a estos tres problemas. Estos métodos de resolución son múltiples y para su descripción se dividirán en tres categorías básicas: los métodos heurísticos, las metaheurísticas y los métodos exactos.



## 4.1. Equilibrado de líneas de montaje simples

El problema de equilibrado de líneas de montaje ha sido el objeto de estudios en la literatura científica desde mediados del siglo XX [17], con numerosos trabajos que tratan de resolver el problema mediante procedimientos de las tres categorías comentadas. En [34] puede consultarse un estado del arte completo de los mecanismos de resolución que se han aplicado al problema de equilibrado de líneas de montaje simples.

La resolución del SALBP mediante procedimientos heurísticos ha sido extensamente estudiada en el pasado [39], dada la facilidad de la implementación de los métodos heurísticos, así como la rapidez con la que obtienen soluciones factibles. Sin embargo, estos métodos de resolución han perdido importancia en la actualidad, debido a que la calidad de las soluciones que obtienen las heurísticas no está a la par con la calidad de las soluciones que ofrecen otros métodos. Por supuesto, existen algunas excepciones, entre las que destaca el método AVALANCHE [10], cuya particularidad es que se trata de un método lo suficientemente general como para ser aplicado a otros problemas de equilibrado de líneas, además del SALBP.

Por otra parte, los métodos metaheurísticos aplicados a la resolución del SALBP siguen teniendo importancia en la actualidad, dada la calidad de las soluciones que ofrecen, así como la posibilidad de adaptar la metaheurística para resolver otros problemas. Entre los múltiples métodos metaheurísticos que se han estudiado en la literatura para la resolución del SALBP, podemos destacar los algoritmos de colonia de hormigas [4][6], los algoritmos genéticos [15] y los procedimientos de búsqueda Tabú[36].

Por último, la aplicación de métodos y algoritmos exactos al SALBP sigue siendo un foco de atención en la literatura científica actual, ya que estos métodos aseguran el óptimo de las soluciones encontradas. Sin embargo, la resolución exacta mediante programación lineal entera [28] o mediante generación de columnas [30] no consigue resolver problemas de gran tamaño, por lo que la literatura actual suele centrarse en estudiar métodos de enumeración implícita.

Los métodos de enumeración implícita tratan de encontrar la solución óptima enumerando y explorando posibles soluciones mediante un grafo o un árbol. Los procedimientos basados en exploración de un grafo se basan en la programación dinámica y han sido aplicados al SALBP en diversas ocasiones, véase por ejemplo [5]. Por otra parte, los métodos basados en la exploración de un árbol de soluciones se conocen comúnmente como métodos Branch-and-Bound, o de ramificación y cota. Entre estos cabe destacar el algoritmo SALOME [35] y el trabajo de Liu et Al. [22], en el que los autores presentan diversos procedimientos Branch-and-Bound para el SALBP, tanto constructivos como destructivos. El algoritmo presentado en el primer artículo que conforma esta tesis doctoral forma parte de esta última categoría de

procedimientos exactos. En un trabajo más reciente, Sewell y Jacobson [37] presentan un procedimiento basado en una estrategia Branch-and-Bound, llamado Branch, Bound and Remember, que utiliza la memoria del ordenador para desarrollar y explorar el árbol de soluciones de manera rápida y eficiente. El algoritmo resultante es, hasta la fecha, el algoritmo exacto capaz de resolver de forma óptima más instancias del conjunto de instancias de referencia del SALBP-1.

Además de los procedimientos que pueden ser firmemente asignados a una de las categorías anteriormente descritas, existen diversos métodos estudiados en la literatura que pueden clasificarse como procedimientos híbridos. Es el caso del algoritmo propuesto en [13], que se basa en la heurística de Hoffmann[18]. Este algoritmo es un procedimiento de enumeración truncada que, a pesar de ser una heurística, resuelve localmente un problema de enumeración. Un estudio también basado en la misma propuesta de Hoffmann es el más reciente [38]. En este estudio se presenta una heurística enumerativa que, además de obtener buenos resultados para el SALBP, es lo suficientemente general como para aplicarse a otros problemas de equilibrado. Otro método híbrido, en este caso basado en Programación Dinámica, es el procedimiento presentado en [5]. Este método, a pesar de estar basado en un método exacto, relaja algunas condiciones necesarias para asegurar la optimalidad de una solución, convirtiéndose en una heurística en algunos casos.

## **4.2. Equilibrado y asignación de trabajadores de líneas de montaje**

El problema de equilibrado y asignación de trabajadores de líneas de montaje ha sido estudiado en la literatura tanto con su formulación RALBP (que supone operarios ilimitados de diversos tipos) como con su formulación ALWABP (que supone operarios limitados). Este estado del arte se centra en los trabajos con ambas formulaciones y, como en el apartado anterior, clasifica los métodos aplicados en heurísticas, metaheurísticas y algoritmos exactos. Para más información sobre la clasificación de éste y otros problemas generales de equilibrado, así como un estado del arte actualizado, puede consultarse [3].

Como en el caso del SALBP, los procedimientos heurísticos no son objeto de muchos estudios centrados en este problema en la actualidad. El trabajo de Moreira et Al. [26] sería una excepción, ya que presenta una heurística constructiva orientada a estaciones para el ALWABP. Esta heurística se basa en reglas de prioridad para el SALBP, en las cuales se introduce la asignación de operarios a las estaciones.

El uso de metaheurísticas para la resolución del problema de equilibrado y asignación de trabajadores sí que está mucho más estudiado en la literatura, con múltiples trabajos centrados en el desarrollo de algoritmos genéticos, entre otros. Es el caso del trabajo de Levitin et Al. [21], que estudia el RALBP con objetivo de tipo 2 (dado un número fijo de estaciones, minimizar el tiempo de ciclo) usando dos versiones de un algoritmo genético. En [14] se implementa otro algoritmo genético, en el que se hibridiza el procedimiento combinándolo con un método de búsqueda local para resolver el ALWABP-2. Blum y Miralles [7] presentan una búsqueda Beam-Search iterativa aplicada al ALWABP-2. Mutlu et Al. [27] presentan un algoritmo genético iterativo, también aplicado a la resolución del ALWABP-2. Por último, más recientemente, Borba y Ritt[8] presentan una heurística constructiva basada en un Beam-Search probabilístico.

En cuanto a los algoritmos exactos, Rubinovitz et Al. [31] presentan en su trabajo no solamente la formulación RALBP de este problema, sino que también proponen un algoritmo Branch-and-Bound orientado a tareas para su resolución. En [23] se presenta un modelo de programación entera para el ALWABP-2, aunque este modelo sólo es capaz de resolver las instancias más pequeñas. Es por esto que los mismos autores presentan en [24] un algoritmo Branch-and-Bound orientado a estaciones para resolver instancias de mayor tamaño del mismo problema. En su trabajo, Borba y Ritt[8] también presentan un algoritmo Branch-and-Bound orientado a tareas para el ALWABP-2 que se basa en la relación entre este problema y el problema de máquinas heterogéneas en paralelo (o UPMP, del inglés *Unrelated Parallel Machine Problem*).

Como en el caso del SALBP, algunos de los procedimientos aplicados a la resolución del problema de equilibrado y asignación de trabajadores pueden ser clasificados como procedimientos híbridos entre dos o más de las categorías básicas. Es el caso del trabajo de Rubinovitz et Al. [31], que además de un Branch-and-Bound, también presenta diversas reglas heurísticas para acotar el árbol de soluciones si el método exacto no encuentra la solución óptima en un tiempo limitado. En el trabajo de Miralles et Al. [24] también se presenta una heurística basada en Branch-and-bound, además del algoritmo exacto. Por último, la heurística constructiva presentada en [26] se usa como evaluador de la aptitud de las soluciones en un algoritmo genético.

### 4.3. Secuenciación de actividades en una máquina

Los problemas de secuenciación de una máquina han recibido la atención de numerosos estudios en la literatura, por lo que este estado del arte solamente se centrará en los trabajos que estudian casos con penalizaciones cuadráticas del adelanto y el retraso. Para un estudio más general de la literatura dedicada a los problemas de secuenciación de una máquina, ver [2].

En la literatura pueden encontrarse diversas aplicaciones de procedimientos heurísticos al tercer problema presentado en esta tesis. Valente y Alves presentan en [42] cuatro conjuntos de heurísticas basadas en una adaptación de las reglas clásicas de prontitud, que además mejoran las soluciones mediante intercambios en algunas posiciones consecutivas de la secuencia. Basándose en las mismas reglas de prontitud, Valente y Moreira presentan una heurística GRASP en [43].

En cuanto a los procedimientos metaheurísticos, Valente presenta en [41] un procedimiento de Beam-Search básico, un Beam-Search filtrado y una heurística Beam-Search con recuperación. Además, estos procedimientos utilizan las reglas de prontitud como parte de la función objetivo para evaluar sus efectos sobre el funcionamiento de los algoritmos. En [44] se estudia la aplicación de un algoritmo genético al problema estudiado.

Por último, se han aplicado al problema dos procedimientos exactos basados en Branch-and-bound. Valente presenta en [40] un algoritmo capaz de encontrar la solución óptima para instancias de hasta 20 tareas. Kianfar y Moslehi proponen en [20] un Branch-and-bound que, aplicando otros métodos de acotación, es capaz de resolver de forma óptima instancias de hasta 30 tareas.

## 5. APORTACIONES AL EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE SIMPLES

En el primer artículo que forma parte de esta tesis se presenta un procedimiento Branch-and-Bound orientado a estaciones para la resolución del problema de equilibrado de líneas de montaje simples dado un tiempo de ciclo (SALBP-1).

La principal aportación de este trabajo es un test lógico que se utiliza como cota inferior destructiva, comprobando si es posible obtener una solución con número de estaciones igual a la mejor cota inferior y aumentando el valor de la cota mientras el test lógico dé negativo. Este test lógico está basado en asimilar el SALBP-1 a un problema de flujos máximos y puede utilizarse como cota para otros problemas relacionados con el equilibrado de líneas.

Este procedimiento se basa en comprobar si es posible asignar todas las tareas entre la primera y la última estación donde cada tarea puede ser asignada (esta información la proporciona una cota ya conocida [33]), y domina las cotas clásicas basadas en la asimilación del SALBP-1 a un problema de empaquetado [33].

El algoritmo exacto desarrollado, en el que se aplica la cota descrita, junto con otras cotas, reglas de dominancia y mecanismos de reducción existentes en la literatura, es un Branch-and-bound orientado a estaciones que utiliza un método de búsqueda primero en profundidad. Su característica más destacable es que, al desarrollar un nodo del árbol de soluciones, se selecciona el nodo descendiente que tiene una mayor carga (es decir, el nodo con menor tiempo libre) para continuar ramificando.

Con esto, se consigue una búsqueda primero en profundidad (que encontrará soluciones factibles más rápidamente que otro tipo de búsqueda) que da prioridad a la exploración de los nodos más favorables. De esta manera se espera que el tamaño de los árboles de soluciones sean lo más pequeños posibles, y que el procedimiento encuentre la solución óptima rápidamente.

El procedimiento presentado se evalúa en una serie de experimentos computacionales sobre un conjunto de 269 instancias de referencia, en los que obtiene un total de 264 soluciones óptimas con un límite temporal de una hora.

## ATENCIÓN ¡

Las páginas 21 a 28 de la tesis contienen el artículo

Mariona Vilà, Jordi Pereira. *An enumeration procedure for the assembly line balancing problem based on branching by non-decreasing idle time*. European Journal of Operational Research, vol. 229, 2013 #1, p. 106-113

[doi:10.1016/j.ejor.2013.03.003](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.003)

que puede consultarse en el web del editor

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221713002117>

## 6. APORTACIONES AL EQUILIBRADO Y ASIGNACIÓN DE TRABAJADORES DE LÍNEAS DE MONTAJE

En el segundo artículo que conforma esta tesis doctoral, se estudia el problema de equilibrado y asignación de trabajadores de líneas de montaje. Este artículo aporta al estado del arte del ALWABP diversos procedimientos y adaptaciones para el cálculo de cotas inferiores para este problema y dos reglas de dominancia nuevas.

El primero de estos procedimientos es la adaptación de una cota existente para el SALBP: la cota basada en la asimilación del SALBP al problema de secuenciación de una máquina[33]. En este artículo, además de adaptar el método de cota también se añaden algunas reglas para el cálculo de la cota, basadas exclusivamente en las particularidades del ALWABP. La cota basada en la secuenciación de una máquina para el ALWABP con las nuevas reglas domina la cota extraída de la adaptación directa de la cota para el SALBP.

El segundo método de cota aportado por el este trabajo es una cota para el ALWABP basada en la relación entre este problema y el problema de asignación. Dado que la mayoría de cotas para el ALWABP basadas en cotas existentes para el SALBP usan el tiempo de proceso mínimo de cada tarea (esto es, la duración mínima que tiene la tarea para cualquier operador), este procedimiento de cota tiene como objetivo mejorar este valor siempre que sea posible. Para ello, se buscan las tareas que no pueden compartir estación y, si sus tiempos de proceso mínimos provenían del mismo operador, se resuelve un problema de asignación para encontrar unos tiempos mínimos de dos operadores distintos, que serán iguales o más restrictivos.

En este segundo artículo también se aportan dos reglas de dominancia basadas en una regla existentes para el SALBP [19]. De la regla de dominancia de Jackson se extrae una regla de dominancia entre tareas y una regla de dominancia entre operadores.

Estos mecanismos de cota y de dominancia se implementan en un algoritmo Branch, Bound and Remember (BB&R)[37]. El algoritmo presentado se evalúa mediante una serie de experimentos computacionales sobre un conjunto de instancias de referencia. Con estas pruebas se concluye que la calidad de las soluciones ofrecidas por el procedimiento presentado supera la de los mejores algoritmos existentes en la literatura y que verifica más soluciones óptimas que ningún algoritmo exacto existente para este problema.

## ATENCIÓN ¡

Las páginas 31 a 40 de la tesis contienen el artículo

Mariona Vilà, Jordi Pereira. *A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment and balancing problems*  
Computers and Operation Research. Vol 44, 2014 p. 105-114 .  
[doi:10.1016/j.cor.2013.10.016](https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.10.016)

que puede consultarse en el web del editor

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054813003110>



## 7. APORTACIONES A LA SECUENCIACIÓN DE ACTIVIDADES EN UNA MÁQUINA

En el tercer y último artículo que forma parte de esta tesis doctoral se estudia el problema de secuenciación de actividades en una máquina, en que no se permiten tiempos muertos y que penaliza de forma cuadrática tanto los adelantos como los retrasos. Se analiza la relación entre este problema y el problema de asignación. De esta relación se extraen dos cotas inferiores y un procedimiento heurístico para su resolución. También se estudia la aplicabilidad de la formulación basada en programación entera con índice temporal.

La primera aportación es un método de cota basado en trabajos anteriores para el problema de secuenciación de actividades en una máquina con el objetivo de minimizar el retraso total [32]. Para el cálculo de la cota, se asume que cada una de las tareas debe ser asignada a una posición en la secuencia y se suma la aportación que realiza cada tarea a la función objetivo si se asigna en la posición  $t$ . Este método de cota es muy rápido y también produce una cota superior.

La segunda aportación del artículo es una cota basada en descomponer cada tarea en operaciones unitarias, que se asignan entonces a los espacios libres en la secuencia, permitiendo el adelanto de las tareas. En esta segunda cota, el coste de asignar cada tarea corresponde a la aportación a la función objetivo que supone la finalización de la tarea, si una de sus operaciones unitarias está asignada a una posición de la secuencia. Esta cota obtiene valores muy próximos al óptimo.

Además de proporcionar un buen valor de cota, la segunda cota puede utilizarse para obtener relaciones de precedencia heurísticas, que se pueden introducir al programa dinámico del problema para reducir su espacio de estados. A pesar de que esto implica que la resolución del problema mediante esta formulación del programa dinámico ya no tiene porque dar la solución óptima, este método de resolución es una heurística eficiente, que constituye la tercera aportación de este trabajo.

La heurística basada en programación dinámica no es el único método de resolución que se ofrece en este trabajo: también se plantea su resolución mediante su formulación entera con índice temporal. Esta formulación se implementa en un solver comercial actual para la resolución exacta del problema de secuenciación.

Las cotas inferiores, la heurística y la formulación presentadas se evalúan en una serie de experimentos computacionales sobre un conjunto de instancias generadas aleatoriamente. Los resultados demuestran que una de las cotas inferiores propuestas obtiene valores muy próximos al óptimo, que la heurística presentada obtiene soluciones de alta calidad y que la formulación es aplicable para instancias pequeñas y medianas.

## ATENCIÓN ¡

Las páginas 43 a 52 de la tesis contienen el artículo

Mariona Vilà, Jordi Pereira. *Exact and heuristic procedures for single machine scheduling with quadratic earliness and tardiness penalties*. Computers and Operation Research. Vol 40, 2013 p. 1819-1828. Doi 10.1016/j.cor.2013.01.019

que puede consultarse en el web del editor

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054813000270>

## 8. CONCLUSIONES

Como conclusiones generales del trabajo realizado en las tres publicaciones que forman parte de esta tesis se extrae que se han presentado procedimientos eficientes para la resolución de problemas de secuencias en entornos productivos JIT.

En todos los trabajos se han presentado nuevos mecanismos de cota basados en el estudio de las propiedades de cada problema, así como su relación con otros problemas de optimización combinatoria, como por ejemplo el problema de asignación, el problema de máquinas heterogéneas en paralelo y el problema de empaquetados, entre otros. Se han desarrollado procedimientos exactos, heurísticos e híbridos para la resolución de los tres problemas de secuencias considerados, obteniendo resultados satisfactorios en sendas experiencias computacionales. En general, se han obtenido no sólo buenos resultados en cuanto a la calidad de las soluciones obtenidas, sino también nuevos procedimientos y metodologías aplicables a otros problemas de optimización combinatoria relacionados con la organización de la producción.

A pesar de que el artículo presentado por Sewell y Jacobson [37] mejora los resultados obtenidos por el algoritmo presentado en esta tesis para el SALBP-1, el procedimiento presenta nuevas metodologías que se están aplicando con éxito a la resolución de otros problemas de equilibrado. Se destaca especialmente la cota inferior basada en la asimilación con un problema de flujos máximos presentada en este trabajo, que puede ser generalizada y aplicada a otros problemas de equilibrado de líneas o incluso a otras variaciones del problema de empaquetamiento.

En el caso del ALWABP, el método presentado aporta diversos métodos de cota inferior, reglas de reducción y reglas de dominancia que demuestran un muy buen funcionamiento cuando se implementan en un procedimiento basado en Branch-and-bound. El algoritmo presentado no sólo obtiene más soluciones óptimas que cualquier algoritmo exacto presentado hasta la fecha para este problema, sino que además es capaz de competir en calidad de las soluciones obtenidas con las metaheurísticas más recientes.

Por último, en el caso del problema de secuenciación de actividades en una máquina, el trabajo realizado aporta dos cotas inferiores basadas en la relación entre los problemas de una máquina y el problema de asignación, una heurística y una formulación con índice temporal. Una de las dos cotas presentadas obtiene muy buenos resultados y puede utilizarse para desarrollar una serie de restricciones heurísticas que permiten solucionar el problema de manera rápida y eficiente mediante una formulación basada en programación dinámica. Esta heurística es aplicable a otros problemas en que un mecanismo de cota pueda facilitar información que permita reducir el espacio de estados de su programa dinámico. La formulación

con índice temporal que se presenta en este trabajo es capaz de resolver de forma óptima el 90% de las instancias de 70 actividades o menos. Esto supone una mejora significativa respecto a los algoritmos exactos que existían hasta la fecha para este problema, puesto que los algoritmos anteriores sólo eran capaces de resolver de manera óptima las instancias de la mitad de este tamaño.

## 9. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

Tras estudiar los resultados obtenidos con los procedimientos de resolución aplicados en los artículos presentados en esta tesis, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuras:

- El estudio de otros problemas de organización que se presentan en las líneas de montaje en un sistema productivo Just-in-Time. Por ejemplo, en una línea de montaje de productos mixtos (aquella que es responsable de la producción de diversas variaciones de un mismo producto) se presenta, entre otros, un problema de secuenciación consistente en obtener el orden en que la línea producirá las diferentes variantes. Teniendo en cuenta los objetivos del Just-in-Time, es especialmente relevante el problema de Monden o ORV (del inglés, *Output Rate Variation*) [25], que tiene como objetivo encontrar una secuencia de producción de los distintos modelos de manera que el consumo de piezas o componentes sea lo más regular posible. Se ha desarrollado un algoritmo exacto de tipo Branch-and-bound para la resolución de este problema, que aplica diversas cotas superiores e inferiores, así como reglas de dominancia que aumentan la eficiencia del procedimiento, eliminando en medida de lo posible las simetrías que presenta el problema. Los experimentos computacionales realizados en pruebas de 1 hora muestran que para las cinco colecciones de instancias usadas, con un total de 3442 instancias, el algoritmo presentado es capaz de demostrar el óptimo en el 98.93% de los casos (para un total de 3405 instancias). Este trabajo se encuentra en este momento en un proceso de revisión para su publicación.
- La aplicación de las cotas inferiores y reglas de reducción y dominancia estudiadas para el SALBP-1 a un procedimiento híbrido para la resolución del SALBP-2 y para el problema de equilibrado de líneas de montaje con tareas incompatibles entre sí. Se ha desarrollado un algoritmo genético que explora un espacio de instancias en las que se añaden incompatibilidades entre tareas a la instancia original. La aptitud de un individuo se evalúa solucionando la instancia modificada mediante un programa dinámico acotado [5]. El funcionamiento del algoritmo se ha probado sobre el conjunto de instancias de

referencia para el SALBP-2 (extraído de [www.assembly-line-balancing.de](http://www.assembly-line-balancing.de)) y en otro conjunto para los problemas de equilibrado con incompatibilidades entre tareas. El algoritmo desarrollado obtiene mejores resultados que los procedimientos existentes en la literatura para ambos problemas. Este trabajo se encuentra en fase de redacción.

- La aplicación del procedimiento Branch, Bound and Remember y las cotas inferiores estudiadas para el problema de asignación de trabajadores y equilibrado de líneas de montaje a otros problemas generales de equilibrado. En concreto, se propone una formulación general que engloba distintos problemas de equilibrado de líneas que tienen restricciones relacionadas con el consumo de recursos. Esta formulación describe, entre otros, problemas con restricciones de área y tiempo [4], algunos problemas de líneas de montaje mixtas [12], problemas con restricciones relacionadas con factores ergonómicos [11] y problemas con tareas incompatibles entre sí [45]. Para resolver este problema general se han desarrollado nuevas cotas inferiores y nuevas reglas de dominancia (algunas de ellas basadas en las cotas y reglas estudiadas para el SALBP-1 en esta tesis) que se han integrado en un algoritmo de tipo Branch, Bound and Remember. Este trabajo está en fase de implementación, por lo que aún no se dispone de resultados.
- Ampliar la propuesta realizada para la resolución del problema de asignación de trabajadores y equilibrado de líneas de montaje. Se han establecido contacto con los autores de la publicación [8], y se está trabajando en un algoritmo híbrido que combine su propuesta (un Branch-and-bound orientado a tareas) y la presentada como parte de esta tesis (un Branch, Bound and Remember orientado a estaciones). Además, se propuesto crear con estos autores un nuevo juego de instancias más difíciles y que representen de manera más realista una línea de montaje. Este trabajo está en fase de desarrollo e implementación.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Baker, K.R., Introduction to sequencing and scheduling. *Wiley*, New York (1974)
- [2] Baker, K.R., Scudder, G.D., Sequencing with earliness and tardiness penalties: a review. *Operations Research*, 38: 22-36 (1990)
- [3] Battaia, O., Dolgui, A., A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 142 (2): 259-277 (2013)
- [4] Bautista, J., Pereira, J., Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 177: 2016-2032 (2007)
- [5] Bautista, J., Pereira, J., A dynamic programming based heuristic for the assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 194: 787-794 (2009)
- [6] Blum, C., Beam-ACO for Simple Assembly Line Balancing, *INFORMS Journal on Computing*, 20 (4): 618-627 (2008)
- [7] Blum, C., Miralles C., On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search. *Computers & Operations Research*, 38(1): 328-339(2011)
- [8] Borba, L., Ritt, M., A heuristic and a branch-and-bound algorithm for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem. *Computers & Operations Research*, 45: 87-96(2014)
- [9] Bowman E.H., The schedule-sequencing problem. *Operations Research*, 7: 621-4 (1959)
- [10] Boysen, N., Fliedner, M., A versatile algorithm for assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 184: 39-56 (2008)
- [11] Carnahan, B.J., Norman, B.A., Redfern, M.S., Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. *lie Transactions*, 33(10): 875-887(2001)
- [12] Erel, E., Gokçen, H., Shortest-route formulation of mixed-model assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 116: 194-204 (1999)
- [13] Fleszar, K., Hindi, K.S., An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem, *European Journal of Operational Research* 145:606–620 (2003)

- [14] Gao, J., Sun, L., Wang, L., Gen, M., An efficient approach for type II robotic assembly line balancing problems. *Computers & Industrial Engineering*, 56(3):1065-1080 (2009)
- [15] Gonçalves, J.F., de Almeida, J.R., A hybrid genetic algorithm for assembly line balancing, *Journal of Heuristics* 8: 629-642 (2002)
- [16] Heimlern, C., Kolisch, R., Work assignment to and qualification of multi-skilled human resources under knowledge depreciation and company skill level targets. *International Journal of Production Research*, 48(13): 3759-3781(2010)
- [17] Helgeson, W.B., Salvesson, M. E., Smith W. W., How to balance an assembly line, *Technical Report, Carr Press, New Caraan, Conn* (1954)
- [18] Hoffmann, T.R., Assembly line balancing with a precedence matrix. *Management Science* 9: 551-562 (1963)
- [19] Jackson, J.R., A computing procedure for a line balancing problem. *Management Science*. 2: 261-271 (1956)
- [20] Kianfar K., Moslehi G., A branch-and-bound algorithm for single machine scheduling with quadratic earliness and tardiness penalties. *Computers & Operations Research*. 39: 2978–90 (2012)
- [21] Levitin, G., Rubinovitz, J., Shnits, B., A genetic algorithm for robotic assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168 :811-825(2006)
- [22] Liu, S.B.; Ng, K. M.; Ong, H. L., Branch-and-bound algorithms for simple assembly line balancing problem, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36: 196-177 (2008)
- [23] Miralles, C., García-Sabater, J.P., Andrés, C., Cardos, M., Advantages of assembly lines in Sheltered Work Centres for Disabled. A case study, *International Journal of Production Economic*, 110(1–2): 187–197(2007)
- [24] Miralles, C., García-Sabater, J.P., Andrés, C., Cardos, M., Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to sheltered work centres for disabled. *Discrete Applied Mathematics*, 156(3): 352-367(2008)
- [25] Monden, Y., Toyota production system (2nd ed) *Institute of Industrial Engineering*, Norcross, GA (1983)
- [26] Moreira, M.C.O., Ritt, M., Costa, A.M., Chaves, A.A., Simple heuristics for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Journal of heuristics*, 18(3): 505-524(2012)

- [27] Mutlu, Ö., Polat, O., Supciller, A.A., An iterative genetic algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem of type-II. *Computer & Operations Research*, 40: 418-426(2013)
- [28] Pastor, R., Ferrer, L., An improved mathematical program to solve the simple assembly line balancing problem, *International Journal of Production Research*, 47 (11): 2943-2959 (2009)
- [29] Patterson, J.H., Albracht, J.J., Assembly line balancing: 0-1 programming with Fibonacci search, *Operations Research*, 23: 166-174 (1975)
- [30] Peeters, M.; Degraeve, Z., A linear programming based lower bound for the simple assembly line balancing problem, *European Journal of Operational Research*, 168: 716-731 (2006)
- [31] Rubinovitz, J. Bukchin, J., Lenz, E., RALB – A Heuristic Algorithm for Design and Balancing of Robotic Assembly Lines, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42(1): 497–500 (1993)
- [32] Rynnoy Kan, A.H.G., Lageweg, B.J., Lenstra, J.K., Minimizing total costs in one-machine scheduling. *Operations Research*, 23: 908-927 (1975)
- [33] Scholl, A., Balancing and Sequencing of Assembly Lines, *Physica-Verlag* (1999)
- [34] Scholl, A., Becker, C., State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3): 666-693 (2006)
- [35] Scholl, A., Klein, R., SALOME: A bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing* 9: 319-334 (1997)
- [36] Scholl, A., Voss, S., Simple assembly line balancing—Heuristic approaches. *Journal of Heuristics* 2: 217-244 (1996)
- [37] Sewell, E.C., Jacobson, S.H., A Branch, Bound, and Remember Algorithm for the Simple Assembly Line Balancing Problem. *INFORMS Journal on Computing*, 24(3): 433-442(2012)
- [38] Sternatz, J., Enhanced multi-Hoffmann heuristic for efficiently solving real-world assembly line balancing problems in automotive industry. *European Journal of Operational Research*, 235(3): 740-754 (2014)
- [39] Talbot, F.B., Patterson, J.H., Gehrlein, W.V., A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques. *Management Science*, 32(4): 430-454 (1986)



- [40] Valente, J.M.S., An exact approach for single machine scheduling with quadratic earliness and tardiness penalties. *Porto: Faculdade De Economia, Universidade Do Porto* (2007)
- [41] Valente, J.M.S., Beam search heuristics for quadratic earliness and tardiness scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, 61: 620-31 (2010)
- [42] Valente, J.M.S., Alves R.A.F.S., Heuristics for the single machine scheduling problem with quadratic earliness and tardiness penalties. *Computers & Operations Research*, 35: 3696-713 (2008)
- [43] Valente J.M.S., Moreira, M.R.A., Greedy randomized dispatching heuristics for the single machine scheduling problem with quadratic earliness and tardiness penalties. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; 44: 995-1009 (2009)
- [44] Valente J.M.S., Moreira, M.R.A., Singh, A., Alves, R.A.F.S., Genetic algorithms for single machine scheduling with quadratic earliness and tardiness costs. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54: 251–65 (2011)
- [45] Vilarinho, P.M., Simaria, A.S., ANTBAL: An ant colony optimization algorithm for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 44: 291–303 (2006)