Aproximación a un procedimiento general para el diseño y la asignación de tareas en líneas de producción y montaje*

An approach to a general procedure for designing and assigning tasks to assembly lines

Albert Corominas y Rafael Pastor**

Institut d'Organizació i Control de Sistemes Industrials
Universitat Politècnica de Catalunya

Fecha de recepción: 26/04/2009

Fecha de aceptación: 02/06/2009

Resumen. Se discute el concepto de línea de producción y sus diferencias con otros tipos de sistemas productivos. De acuerdo con numerosos trabajos, se constata que el tratamiento académico de los problemas de diseño y asignación de tareas a las líneas adolece de falta de realismo, por lo que pocas empresas utilizan los resultados de la investigación. Se pone de manifiesto que los modelos y algoritmos habituales en la literatura se refieren sólo a aspectos parciales del diseño de las líneas y se propone un esquema de procedimiento general para tratarlo, de características parecidas a los que desde hace tiempo se han utilizado para el diseño de distribuciones en planta.

Palabras clave: líneas de producción y montaje, diseño de sistemas productivos.

Abstract. We discuss the concept of assembly lines and its differences with other types of productive systems. According to many works, we have verified that the academic treatment of the design and assignation of tasks in assembly lines suffers from lack of realism. Therefore, few commercial companies use the results of the academic research. We show that models and algorithms usual in the scientific literature refer only to partial aspects of the design of the assembly lines, and we propose, to deal with them, an outline of a general procedure which presents similar characteristics to those that for some time have been used for the layout design.

Key words: assembly lines, design of production systems.

I. Introducción

Las líneas de producción y de montaje (más adelante se discute brevemente la diferencia entre unas y otras pero en general nos referiremos a ellas simplemente como «líneas de producción», o incluso como «líneas») son un elemento muy importante y muchas veces el elemento esencial de muchos sistemas productivos, tanto en la industria como en los servicios.

No se trata aquí de entrar en una discusión detallada sobre el concepto de línea, por lo que nos basta, como punto de partida, definirla como un conjunto ordenado de estaciones de trabajo, separadas o no por espacios de almacenamiento intermedio del tra-

bajo en curso (*buffers*), por las que pasan unidades, de modo que cada unidad pasa por todas las estaciones en el orden establecido para estas.

La distinción entre líneas de montaje (*assembly lines*) y las de producción tiene sentido en sistemas de producción de bienes. Montaje es la acción de armar o poner en su lugar las piezas de cualquier aparato o máquina; es decir, en el montaje todas las piezas han sido producidas previamente y, por consiguiente, las actividades a realizar en la línea de montaje son únicamente las de mover y unir las piezas. El hecho de referirse a unas líneas como «de montaje» puede hacer pensar que son más aceptables que en las de producción las simplificaciones características de los mo-

* Este trabajo es una aportación al proyecto DPI2007-61905, subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia y FEDER.

** Corresponding author: Rafael Pastor; IOC - Institute of Industrial and Control Engineering, Av. Diagonal 647 (Edif. ETSEIB), 1th floor, 08028 Barcelona, Spain; e-mail: rafael.pastor@upc.edu

delos tradicionales para el tratamiento de líneas. Ciertamente, en una línea de producción pueden llevarse a cabo operaciones de mecanizado, sublimaciones, ensayos con aparatos complejos, etc. Pero el mero montaje puede implicar operaciones (como una soldadura electrógena) que requieran aparatos de costes apreciables y que pueden generar relaciones de incompatibilidad entre tareas (por ejemplo, imposibilidad de encolar y soldar en una misma estación, o incluso en estaciones contiguas). Es decir, incluso para una línea de montaje pueden resultar inaceptables supuestos como el de que todas las estaciones tienen el mismo coste o de que todas las tareas pueden llevarse a cabo en cualquier estación.

En cambio, en el campo de los servicios, en el que las unidades que reciben el tratamiento son personas o aparatos que son objeto de controles pero no experimentan modificación alguna (como sucede en la inspección técnica de vehículos) la denominación «línea de montaje» resulta simplemente inadecuada.

En ocasiones conviene distinguir entre estaciones de trabajo y áreas. Cuando se utiliza esta distinción, se entiende por área lo que hasta aquí hemos denominado estación de trabajo y por estación de trabajo un conjunto de áreas atendidas por una persona o por un equipo. Cuando, como es lo más habitual, cada estación de trabajo comprende una sola área, la distinción entre ambos términos es innecesaria.

Una definición informal como la recogida en un párrafo anterior, tomada de Hopp *et al.* (2007), requiere algunos ajustes, ya que da cabida a sistemas que no corresponden a lo que se entiende habitualmente por línea de montaje. De hecho, es una definición de los sistemas productivos de flujo regular, que comprenden los *flow-shops*, por una parte, y las líneas de producción por otra. Las dos diferencias entre ambos tipos de sistemas productivos son:

- (i) En el caso del *flow-shop* la tarea o conjunto de tareas a realizar en cada estación está prefijada por la naturaleza de la estación y las precedencias entre dichas tareas, o conjuntos de tareas, se corresponden con el orden de las estaciones. En cambio, en el caso de las líneas de producción, el proceso está descompuesto en tareas (habitualmente con, al menos, restricciones de precedencia) y se tiene que determinar en qué estación se va a realizar cada tarea y, en muchos casos, las características de las estaciones.
- (ii) En el *flow-shop*, las unidades pueden ser muy distintas en cuanto a los tiempos de proceso en ca-

da estación. En las líneas de producción se procesan sucesivamente unidades parecidas o incluso idénticas.

Evidentemente, la diferencia (ii) es menos nítida que la (i), ya que no puede establecerse una línea de separación clara entre lo «parecido» y lo «muy distinto». No obstante, en la práctica normalmente no presenta dificultad alguna saber cuál es el caso.

También es característico de lo que se entiende normalmente por línea de producción o de montaje que el tránsito de las unidades de una estación a la siguiente se lleva a cabo, tanto si se trata de un movimiento continuo como de uno intermitente, con recursos no compartidos (es decir, cuando una estación ha terminado el proceso de una unidad ésta no tiene que esperar a que esté disponible un recurso para trasladarla a la estación siguiente). Esto excluye de la definición, por ejemplo, las celdas robotizadas, en las que uno o varios robots se encargan de trasladar las unidades de una estación a otra o de un *buffer* a una estación o viceversa.

Por consiguiente, entendemos por línea de producción o de montaje un conjunto ordenado de estaciones, que pueden estar separadas por *buffers*, por las cuales, en el orden establecido para las estaciones, pasan consecutivamente, mediante recursos de transporte disponibles siempre que son necesarios, unidades parecidas, con el fin de ser sometidas a un proceso.

La existencia de las unidades puede ser previa a su entrada en la línea (por ejemplo, personas que van a someterse a una operación correctora de miopía) o pueden irse conformando a lo largo de la línea (un coche, un motor, una comida en un restaurante de autoservicio). Habitualmente, la secuencia de paso de las unidades por cada estación es la misma para todas las estaciones, pero esto no es esencial: si hay *buffers*, en algunos casos los cambios de secuencia son posibles.

Aun con estas precisiones, las líneas son sistemas con una gran variedad, lo que hace difícil proponer un procedimiento general para resolver los problemas de diseño y gestión relacionados con las mismas.

Y ello pese a que hace muchos años que en el ámbito académico se investiga sobre estos problemas y al gran número de publicaciones que esta investigación ha generado. Pero es que ha habido un divorcio, más claro en este caso que en otros, entre el objeto de la investigación académica (unas líne-

as de montaje, puede decirse, abstractas) y la realidad de los sistemas productivos. Incluso la terminología habitualmente utilizada (ALB, «assembly line balancing») es restrictiva, puesto que en muchos casos el objetivo no consiste en obtener una asignación equilibrada, por lo cual los algoritmos pueden dar e incluso pueden tender a dar una asignación significativamente desequilibrada (Rekiek y Delchambre, 2006). Afortunadamente, de unos años a esta parte, si bien todavía en ámbitos relativamente aislados y minoritarios, se ha tomado conciencia de este divorcio y se han dado pasos para establecer, en lo que respecta a este tipo de problemas, puentes entre el mundo académico y los sistemas productivos.

Plans (1999) incluye una descripción de la diversidad real de las líneas de producción, de la que deriva una clasificación que la refleja, y pone de manifiesto que muchos problemas que se presentan en la realidad industrial no han sido objeto de tratamiento académico.

Muchos otros autores abundan en consideraciones parecidas. Chase (1974) y Schöniger y Spingler (1989) ya detectaron que la proporción de empresas que utilizaban algoritmos formalizados para la configuración de sus líneas era muy baja. A juzgar por la falta de estudios publicados sobre la aplicación de los algoritmos, este estado de cosas no ha cambiado significativamente (Boysen *et al.*, 2007). En Milas (1990), tal como se recoge en Erel y Sarin (1998), se indica que las empresas diseñan manualmente sus líneas de montaje y que ello hace pensar que las técnicas disponibles son inadecuadas o carecen de flexibilidad para tener en cuenta las condiciones reales de las líneas. Lucertini *et al.* (1998) mostró que pocas empresas utilizaban las técnicas publicadas para equilibrar sus líneas e indicó que poco se había hecho para modelizar todas las consideraciones prácticas en el diseño de las líneas (Rekiek *et al.*, 2002a). En Rekiek *et al.* (2002b) y Rekiek y Delchambre (2006) se apunta como posibles causas del poco uso de los algoritmos académicos el hecho de que utilizan pocos datos y desperdician información y que los problemas que resuelven son más bien ficticios. Rekiek y Delchambre (2006) se refiere a las brechas entre teoría y práctica, por una parte y entre los métodos académicos de diseño y los reales.

Una parte de estas brechas cabe atribuirle (Becker y Scholl, 2006; Boysen y Fliedner, 2008; Boysen *et al.*, 2008) a que la investigación sobre las líneas se ha focalizado tradicionalmente, desde la primera formulación matemática en Salveson (1955), en el denominado SALBP (Baybars, 1986), que se define mediante supuestos muy restrictivos, en contraposición al problema o conjunto de problemas GALBP (S y G, por «simple» y «general», respectivamente). El SALBP sigue teniendo una presencia importante en la literatura (Scholl y Becker, 2006), ya que, aun con los con los supuestos sumamente restrictivos que lo caracterizan, SALBP-I (minimizar el número de estaciones) es un problema NP-duro (Wee y Magazine, 1982) que, para Boysen *et al.* (2007), tiene interés porque incluye características esenciales del problema real y porque otros problemas relacionados con las líneas requieren la resolución del SALBP o pueden verse como extensiones del mismo. Pero recientemente (Becker y Scholl, 2006; Capacho y Pastor, 2006; Andrés *et al.*, 2008) se han dedicado esfuerzos significativos a la investigación de problemas más realistas, tales como líneas en U o estaciones en paralelo (Becker y Scholl, 2006; Boysen *et al.*, 2008).

Los proyectos DPI2004-03472¹ y DPI2007-61905², ambos sobre el diseño y equilibrado de líneas de producción y montaje en entornos realistas, surgen como una respuesta a la situación descrita.

En resumen, se puede decir, en primer lugar, que durante mucho tiempo la investigación académica sobre las líneas de producción se ha centrado en problemas (básicamente los SALBP) definidos por supuestos tan restrictivos que los resultados obtenidos resultan poco o nada útiles para resolver los problemas tal como se presentan en la realidad de los sistemas productivos. En segundo lugar, que desde hace unos pocos años se extiende la conciencia de que, por lo dicho, la investigación debe abordar problemas en los que se relajen algunos de los supuestos restrictivos mencionados.

El enfoque de resolver problemas GALBP definidos a partir de SALBP por relajación de uno de los supuestos que lo caracterizan, se está imponiendo sensiblemente. Por ejemplo, considerar estaciones en paralelo, estaciones distintas (con distintos recursos y, por consiguiente, distintos costes), rutas alternativas, etc.

¹ DELIMER: Diseño y equilibrado de líneas de montaje en entornos realistas, subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia y FEDER.

² DELIPYMER: Diseño y equilibrado de líneas de producción y montaje en entornos realistas, subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia y FEDER.

Sin duda, el estudio de estos problemas está contribuyendo y contribuirá a la aproximación, en este ámbito, entre el mundo académico y la práctica de la producción. No obstante, el binomio SALBP-GALBP corresponde a una visión parcial del problema de diseño y asignación de tareas en líneas de producción.

En efecto, el marco en que se sitúa SALBP-GALBP es el de diseñar o asignar tareas a una línea única, en la que tiene lugar todo el proceso de producción (o de montaje), el cual se ha definido de una forma determinada entre las generalmente muchas formas posibles. Constituyen una excepción, a este respecto, Capacho y Pastor (2006) y Capacho (2008), que tratan el caso en que se consideran rutas de producción (o de montaje) alternativas.

Pero para encontrar una solución apropiada para un problema real hay que considerar otras posibilidades, como la implantación de varias líneas en paralelo (Lusa, 2008) en lugar de una sola, o la obtención de subconjuntos en líneas secundarias (por ejemplo, un motor eléctrico de un aparato se puede montar en la misma línea en que se monta el aparato o en una línea distinta, incorporándose en este caso a la línea principal como un elemento). En el caso multiproducto, se han de considerar la obtención de todos los productos en una sola línea o la utilización de varias líneas dedicadas a un producto o a un subconjunto de productos. Hasta donde sabemos, los trabajos publicados raramente adoptan un enfoque como el sugerido en este párrafo; la excepción más notable es, sin duda, el libro de Rekiek y Delchambre (2006).

El problema se puede presentar, en la realidad, de formas muy variadas y, en muchos casos, reviste una gran complejidad. Por añadidura, hasta ahora se ha abordado, generalmente, desde una visión parcial. Se plantea este trabajo, por consiguiente, como un primer paso hacia una definición detallada de un procedimiento general para el diseño y asignación de tareas en líneas de producción y de montaje.

El resto de este documento está organizado como sigue: en la sección 2 se introducen unas consideraciones generales sobre el proceso de diseño; la sección 3 se refiere al diseño y la asignación de tareas a una línea única; en la sección 4, se propone un método para abordar el caso en que se parte de unos requerimientos de capacidad y se admite la posibilidad de implantar líneas diversas, iguales o distintas; la sección 5 recoge las conclusiones y esboza líneas de investigación futuras.

2. El proceso de diseño, lógico y físico, de las líneas de producción

El término «diseño» corresponde, de hecho, a conceptos bastante distintos, aunque, desde luego, relacionados. Lo que nos importa es la diferencia entre lo que se entiende por diseño en el ámbito de la organización, que a veces se denomina diseño funcional o diseño lógico, y el diseño físico. Muchas veces se procede como si uno, el diseño lógico, tuviera que establecerse en primer lugar y el diseño físico fuera una consecuencia obligada del mismo; pero lo cierto es que ambos diseños se condicionan mutuamente (también es cierto, por supuesto, que muchas veces se elabora el diseño físico sin un estudio previo suficiente del diseño funcional). Esta distinción entre la configuración lógica y la configuración física, así como su dependencia mutua están muy presentes en Rekiek y Delchambre (2006).

El diseño (de un producto, de un proceso, de una instalación) es, en general, un proceso complejo, que requiere un gran número de decisiones interrelacionadas con repercusiones sobre objetivos múltiples. De ello se desprenden algunas consecuencias importantes.

En primer lugar, que el proceso de diseño, salvo en casos muy particulares, es difícil de formalizar y de automatizar. Requiere la intervención de personas, que toman decisiones basándose en sus conocimientos y su experiencia y, en algunos casos, con la información que les proporcionan algoritmos de optimización o de simulación. Así pues, en un proceso de diseño una o varias personas, siguiendo los pasos establecidos en un método formalizado con grados muy variables de precisión, interactúan con las herramientas de que disponen. Dado que el desarrollo de modelos y algoritmos necesita tiempo y recursos, es importante elegir y priorizar adecuadamente las fases del proceso para las que se van a elaborar herramientas de apoyo. En Rekiek y Delchambre (2006) se observa que no tiene sentido confiar a un ordenador tareas que un ser humano puede hacer mejor y que es una pérdida de tiempo resolver problemas para los que el ordenador necesita una gran cantidad de datos para obtener soluciones que una persona puede encontrar sin dificultad.

En segundo lugar, que, no obstante el hecho de que para conseguir una solución óptima todas las decisiones deben adoptarse simultáneamente y no secuencialmente, en la práctica se aplica un procedimiento jerárquico, en que unas decisiones se toman antes que otras y las condicionan.

De todos modos, en lo que respecta a jerarquizar las decisiones hay que tener en cuenta que, a veces, la consideración simultánea de decisiones, frente a la opción de establecer una jerarquía con posibilidad de reiteración, puede ser contraproducente. Por ejemplo, es obvio que, como se propone en De Lit *et al.* (1999) y se recoge en Rekiek y Delchambre (2006), el diseño del producto y el del sistema en que éste se ha de producir se han de considerar, idealmente, de forma concurrente si la vida de uno y otro van a tener duraciones parecidas. Pero si el sistema productivo (la línea, por ejemplo) va a tener una vida muy superior a la del producto, un diseño del sistema que se base en las características actuales del producto puede ser poco flexible en relación con cambios en el diseño del producto. En cualquier caso, si se dispone ya de un sistema productivo que es difícil de modificar, es el diseño del producto el que estará condicionado por el del sistema productivo y no viceversa.

3. Diseño o asignación de tareas a una línea única

Incluso en el caso monoproducción, el sistema productivo puede constar de una o varias líneas y la decisión sobre el número de líneas, que se discute más adelante, es sin duda una de las más importantes en el proceso de diseño. Pero la mayor parte de la literatura se refiere al caso que se trata en esta sección: el de línea única.

Se puede considerar que en la literatura se encuentran los elementos para enfocar adecuadamente este tipo de problema, aunque en muchos casos no pueda resolverse de forma exacta a causa de su complejidad. Quedan, desde luego, aspectos por investigar, en todo o en parte, tales como: la influencia del aprendizaje de los trabajadores en la realización de las tareas y, como consecuencia, la disminución del tiempo de proceso de las mismas; el re-equilibrado de la línea considerando los recursos actuales y su disposición en las estaciones de trabajo; la fiabilidad, según la cual será necesario tener recursos (herramientas, máquinas y trabajadores) de reserva por si alguno de ellos deja de ser operativo; la estabilidad y sensibilidad de la solución ante acontecimientos aleatorios; las diferentes disposiciones de la línea de montaje, por ejemplo en S o secuencias de líneas en U; la posibilidad de realizar inversiones para aumentar la productividad de la línea, mediante la reducción del tiempo de proceso de alguna tarea; la existencia de operarios que, después de realizar las tareas que les son asignadas, pueden ayudar en otra esta-

ción de trabajo; o la consideración de otros criterios como, por ejemplo, el reparto equitativo de la fatiga asociada a las diferentes tareas a realizar.

En el caso más general, para el diseño se parte de:

- Relación de productos y producción deseada de cada uno.
- Para cada producto:
 - Relación de tareas indivisibles.
 - Recursos necesarios y tiempo (puede ser una variable aleatoria) para realizar cada tarea (puede haber alternativas, en cuyo caso el tiempo puede ser función de la alternativa elegida).
 - Restricciones entre tareas y entre tareas y estaciones.
- Costes (unitarios) del personal y de los equipos.

Con esta información se calcula el valor máximo admisible para el tiempo ciclo y, con tiempos deterministas y con un solo producto, se puede plantear un modelo de programación lineal entera mixta para el problema, para determinar la configuración de la línea y la asignación de tareas a las estaciones de la misma. De hecho, en la etapa de diseño, la asignación de tareas no tiene interés por sí misma, pero no se pueden separar las decisiones de diseño de las de asignación de tareas; es decir, en esta fase, la asignación de tareas se obtiene como un subproducto: una vez implantada la línea, la asignación óptima de tareas podrá ser distinta, puesto que a lo largo del tiempo pueden ir variando los datos y los objetivos. El modelo se puede plantear con las técnicas habituales de programación lineal entera mixta (PLEM), pero esta labor se facilita recurriendo a trabajos como Plans (1999), Pastor *et al.* (2007) o Pastor y Ferrer (2008), en los que se encuentra la forma de modelizar las funciones objetivo y las restricciones para una diversidad de problemas. Dado que para la modelización de algunas restricciones existen alternativas, conviene consultar los trabajos en que se expone la comparación de las mismas (Pastor *et al.*, 2004).

Estos modelos pueden tener un gran número de variables (la mayoría binarias) y de restricciones. Los enormes progresos en las técnicas e instrumentos de resolución de dichos modelos (Bixby, 2002), permiten, en muchos casos, obtener una so-

lución óptima con tiempos de cálculo aceptables [por ejemplo, en Corominas *et al.* (2006) se resuelve de forma exacta un problema real de equilibrado de líneas]. En otros, en cambio, la obtención de una solución óptima, e incluso, en algunos casos, de una solución meramente factible, puede requerir un tiempo excesivo. Se puede recurrir entonces a heurísticas tales como *relax&fix* (ver Plans, 1999, o Fernández y Pastor, 2007) con las que habitualmente se pueden encontrar, con tiempos aceptables, soluciones factibles de buena calidad, que pueden mejorarse mediante algoritmos de optimización local.

Ahora bien, incluso en el caso monoproducción, los modelos de PLEM no pueden incorporar, sin dejar de ser manejables (con el nivel actual de desarrollo de la teoría y de los instrumentos de cálculo), dos características importantes:

- *La fiabilidad.* Aunque en todas las introducciones a la distribución en planta, al comparar las distribuciones orientadas a producto con las orientadas a proceso, se indica la menor fiabilidad como uno de los inconvenientes principales de las primeras, raramente aparece esta cuestión en la literatura relativa a los modelos para el diseño de líneas. En el caso de estaciones iguales (por ejemplo, operaciones manuales realizadas por personas con la misma cualificación), para obtener un determinado nivel de fiabilidad (probabilidad de funcionamiento de la línea igual o mayor que un valor dado) se debe disponer de personal adicional, cuyo número depende del número de estaciones de la línea (y que crece, menos que proporcionalmente, con dicho número). En el caso de estaciones distintas (sea porque requieren personal con cualificaciones distintas o porque los equipos disponibles en unas u otras estaciones son distintos), no es fácil (y no conocemos publicaciones al respecto) incorporar una restricción de fiabilidad en el modelo de PLEM. Ello se debe a que no se sabe a priori cuántas personas de cada tipo ni cuántos equipos de cada tipo serán necesarios (supóngase, por ejemplo, que se tiene que hacer, varias veces a lo largo del proceso, un tipo de medida que requiere un instrumento de precisión de coste significativo; a priori no sabemos cuántas estaciones deberán equiparse con dicho instrumento, ya que ello depende de la asignación de tareas a las estaciones; por consiguiente, no podemos saber cuántos instrumentos hemos de tener en reserva para alcanzar una fiabilidad dada). Estas

consideraciones implican que, en general, deberán evaluarse, teniendo en cuenta la fiabilidad, configuraciones distintas de la línea y no se puede ignorar que en muchos casos el número de configuraciones razonables puede ser muy elevado, lo que puede hacer prohibitivo asegurarse de que la solución adoptada es óptima.

- *La dispersión de los tiempos necesarios para la realización de cada tarea,* que se puede modelizar mediante variables aleatorias. Este hecho tiene como consecuencia que se necesiten *buffers* entre las estaciones, para evitar, hasta cierto punto, el bloqueo y la inactividad de las estaciones. Desde este punto de vista, el tamaño ideal de los *buffers* es infinito, pero el espacio tiene asociado un coste, por lo cual hay que determinar el tamaño óptimo, finito, de cada *buffer*. Para ello se necesita saber qué tareas se asignan a cada estación, lo que permite representar el tiempo total en cada estación con una variable aleatoria; con esta información, la teoría de colas, para una primera aproximación, y la simulación permiten dimensionar las propias estaciones y los *buffers*. Es decir, determinar la longitud de la línea requiere un cálculo posterior a la resolución del modelo que establece su configuración y la asignación de tareas (Dolgui *et al.*, 2002; Yamada y Matsui, 2003), por lo cual, no se puede garantizar la optimalidad de la solución así obtenida (una solución óptima para tiempos deterministas puede no serlo si se tienen en cuenta los efectos de la dispersión aleatoria de los mismos).

En el caso multiproducción el problema se complica, especialmente cuando los tiempos dependen mucho del tipo de producto, ya que la secuencia en que las unidades de producto pasan por la línea determina la evolución a lo largo del tiempo de la carga de trabajo en las estaciones, de la cual se puede deducir el dimensionamiento óptimo de las mismas.

Una vez configurada la línea se ha de determinar la asignación óptima de tareas a las estaciones, ya que puede no coincidir con la que se ha obtenido con la solución del modelo aplicado para el diseño. Ello obedece a dos motivos:

- El primero es que en la fase de diseño se impone que el tiempo de cada estación no supere el tiempo ciclo máximo y generalmente no se establece ninguna otra condición que relacione los tiempos de unas y otras estaciones; ello puede dar lugar, por ejemplo, a un gran desequilibrio entre los tiempos de las estaciones. Por razones la-

borales, por ejemplo, puede interesar que los tiempos de las estaciones sean lo más parecidos posible entre sí. O bien que el tiempo ciclo efectivo, es decir, el de la estación o estaciones más cargadas sea el menor posible, lo que equivale a maximizar la capacidad de producción de la línea. No obstante, es posible a veces resolver un modelo que tenga en cuenta, en la función objetivo, las propiedades deseadas para la asignación de tareas (por ejemplo, se puede plantear una función objetivo con un término de desempate —proporcional, por ejemplo, al tiempo de ciclo efectivo o a una medida de las discrepancias del tiempo de trabajo en las estaciones con respecto a su valor medio— para elegir la más adecuada entre todas las configuraciones que minimizan el número de estaciones o el coste total; o adoptar como función objetivo la eficiencia, que en el caso más simple es igual al producto del número de estaciones, supuestas iguales, por el tiempo de ciclo efectivo, tal como en Plans y Corominas, 1999).

- El segundo, que una vez implantada la línea puede ser costoso y largo modificar su configuración, en tanto que a lo largo del tiempo es normal que se produzcan variaciones en el método y en los tiempos, por lo que la asignación de tareas debe revisarse.

4. Diseño o asignación de tareas a líneas múltiples

Considerar la posibilidad de llevar a cabo la producción en más de una línea complica notablemente la toma de decisiones de diseño y asignación, incluso en el caso monoproducción. Ello multiplica el número de soluciones y hace muy difícil plantear formalmente un modelo cuya resolución, en todo caso, sería muy costosa.

Si la capacidad de producción requerida se obtiene con varias líneas, las decisiones tienen consecuencias sobre aspectos que muy difícilmente se pueden incorporar en el modelo, y que sólo son evaluables una vez se han definido otros elementos de la solución, y sobre aspectos que en que la evaluación cuantitativa no resulta apropiada.

Efectivamente, utilizar varias líneas implica un aumento del tiempo ciclo y, por consiguiente, un aumento del número de tareas por estación. El aumento de espacio necesario en la estación misma y en su entorno (por ejemplo, para que pueda recibir

los materiales necesarios para llevar a cabo las tareas) puede ser considerable y su evaluación requiere un estudio que sólo se puede llevar a cabo si se sabe qué tareas se asignan a la estación. El aumento del número de tareas puede involucrar asimismo un aumento de la variedad de las mismas, lo que puede hacer inevitable una consideración explícita de tiempos de *setup* entre tareas.

Pero lo más importante es que un gran aumento del tiempo ciclo puede poner en cuestión el propio origen de las líneas de producción, a saber, las ventajas de la extrema división del trabajo, que Adam Smith puso de manifiesto en *An Inquiry Into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*, y cuyos inconvenientes analizó también el economista escocés. El aumento en el número y variedad de tareas supone una pérdida de destreza y tal vez una mayor satisfacción de la persona asignada a la estación: ¿Cómo evaluar este inconveniente y esta ventaja? ¿Cuál es el nivel óptimo de integración de tareas? Obviamente, no cabe dar una respuesta general a estas preguntas, por lo cual en cada caso deberán establecerse las condiciones que deberán cumplir las soluciones (por ejemplo, una cota superior para el tiempo ciclo máximo o un número máximo de tareas por estación o incluso ambas condiciones simultáneamente).

La dificultad del problema es análoga a la que presenta el diseño de una distribución en planta (de hecho, se trata de dos problemas con muchos puntos de contacto) y, como es sabido, para la distribución en planta se han propuesto métodos como el SLP (Muther, 1973), que son una descripción, más o menos formalizada, de las etapas en el proceso de diseño y un conjunto de instrumentos a utilizar en cada una de ellas. Para algunas de estas etapas se han propuesto modelos y algoritmos para resolverlos. Es decir, el diseño de una línea, en general, como el diseño de una distribución en planta, requiere el trabajo de un equipo, que ha de seguir un método y ayudarse con los instrumentos oportunos. Así pues, algo muy distinto a la utilización de un paquete de *software* que a partir de unos datos obtiene, ya sin intervención directamente humana, un resultado.

De acuerdo con estas observaciones, el esquema de nuestra propuesta de método o procedimiento para el diseño de líneas de producción tiene un cierto parecido con un método para el diseño de distribuciones en planta. En la Figura 1 pueden verse las fases del método y su secuencia. El contenido de cada fase se comenta a continuación.

Figura I
Fases del procedimiento

a) Datos sobre productos y procesos

El primer paso consiste en la recopilación de datos sobre productos y procesos:

- Relación de productos.
- Definición del proceso o procesos alternativos para cada uno de ellos:
 - Descomposición para cada proceso en tareas indivisibles.
 - Para cada tarea:
 - Recursos necesarios y tiempo de proceso. Si hay formas alternativas de realizar la tarea (por ejemplo, con una herramienta manual o con una herramienta motorizada), el tiempo de proceso depende de ellas. El tiempo de proceso puede ser determinista o aleatorio.
 - Restricciones entre tareas (precedencias, incompatibilidades) y entre tareas y estaciones (a qué estaciones o tipos de estación puede asignarse cada tarea).
- Datos sobre los recursos (personal y equipos): costes fijos y variables y superficie que ocupan (así como características específicas relevantes, tales como si requieren un ambiente especial, generan calor, etc.).

Debe evitarse tomar decisiones prematuramente. Si hay alternativas en la descomposición en tareas o rutas alternativas (Capacho y Pastor, 2006) conviene no descartarlas en esta fase.

En De Lit *et al.* (1999) se indica que el diseño del producto y el de la línea no deben considerarse como dos procesos independientes y consecutivos, sino que debe tenerse en cuenta la interacción entre los mismos.

b) Cantidades

Se refiere a las previsiones de demanda de los productos, de las que se ha de deducir la capacidad del sistema.

Habitualmente, las previsiones de demanda incluyen tendencia y estacionalidad, por lo que en el diseño se ha de especificar; idealmente, la evolución del sistema a lo largo del tiempo, lo que puede implicar, por ejemplo, reserva de espacios para aumentar el número de estaciones (temporalmente, para hacer frente a la demanda en períodos punta, o permanentemente, si la tendencia creciente exige un aumento de la capacidad).

c) Restricciones específicas y criterios de evaluación de las soluciones

En esta fase se trata de enumerar, por una parte, las restricciones específicas de cada caso (distintas de las de precedencia e incompatibilidad entre tareas, ya identificadas en la fase **a**), como por ejemplo cota superior del tiempo ciclo máximo, cota superior del número de tareas por estación, limitación de espacio o fiabilidad mínima admisible. Por otra, los criterios, algunos de los cuales pueden estar relacionados con las restricciones (por ejemplo, entre las soluciones que alcancen la fiabilidad mínima exigida, será preferible la más fiable, lo cual puede tenerse en cuenta adicionalmente a la evaluación del coste asociado a cada nivel de fiabilidad). En Lusa (2008) se encuentra una discusión más extensa sobre los criterios de evaluación de las soluciones y se recogen los que han sido propuestos en la literatura, como son el número total de estaciones, el número total de trabajadoras y trabajadores, el tiempo de respuesta del sistema, el coste, el beneficio y el tiempo de ciclo efectivo. Aunque en algunos trabajos se menciona la mayor fiabilidad y la mayor flexibilidad como ventajas de los sistemas multilínea (Rekiek *et al.*, 2002b; Becker y Scholl, 2006; Chiang *et al.*, 2007), así

como la satisfacción del personal y la calidad del producto (Ellegard y Jonsson, 1992), estas propiedades no se incluyen en los modelos, probablemente por la dificultad de formalizar su relación con las variables de decisión e incluso por la dificultad de cuantificarlas.

d) Generación de configuraciones alternativas

Se trata, en esta etapa, de generar todas las configuraciones del sistema que serán evaluadas en fases siguientes del procedimiento.

Se ha de considerar la posibilidad de establecer líneas secundarias para la obtención de componentes del producto o productos. Los productos, por ejemplo, pueden ser, modelos distintos de lavavajillas; los componentes, motores eléctricos, bombas de desagüe, etc. En Rekiek y Delchambre (2006) se encuentran indicaciones sobre la forma de abordar esta cuestión.

Dada la relación de productos y de componentes a obtener en el sistema se pueden definir *clases* de líneas. Cada clase se caracteriza por el subconjunto de productos y componentes que puede obtener; dicho de otro modo, dos líneas pertenecen a una misma clase si cada una de ellas puede obtener exactamente el mismo subconjunto de productos y de componentes que la otra.

Establecidas las clases de líneas, se ha de determinar el número de líneas de cada clase y la capacidad mínima deseada para cada una de las líneas.

e) Evaluación agregada de las configuraciones propuestas y selección de configuraciones

Como quiera que, por una parte, interesa generar soluciones variadas y numerosas y, por otra, la evaluación detallada de todas ellas resultaría, en general, muy costosa, se propone evaluarlas de forma aproximada (ejemplos: utilizar valores medios para las magnitudes aleatorias, calcular cotas en lugar de valores exactos —mediante relajación de alguna condición o por aplicación de heurísticas en vez de algoritmos exactos—). La selección se efectuará sobre la base de estas evaluaciones: con el fin de retener un número reducido de configuraciones (digamos, unas tres). Deberá establecerse previamente un umbral para cada criterio y se eliminarán aquellas configuraciones que no los alcancen. Si el número de configuraciones que subsisten es aún excesivo de-

berá aplicarse un procedimiento de decisión multicriterio (en muchos casos bastará con que un grupo de trabajo analice las configuraciones y decida las que van a ser objeto de desarrollo posterior).

f) Evaluación detallada de las configuraciones seleccionadas en la fase E y selección de la configuración a implementar

Es en esta fase donde son aplicables la mayoría de modelos y algoritmos que se han propuesto hasta ahora en la literatura o los análogos que pueden desarrollarse para cada caso específico. El proceso será específico de cada caso particular, pero se puede apuntar que habitualmente se deberán aplicar de forma sucesiva y tal vez iterativa modelos de:

- Configuración de las líneas (número de estaciones y características de cada una de ellas).
- Asignación de tareas.
- Consideración de los aspectos aleatorios.

En algunos casos, la configuración de las líneas y la asignación de tareas pueden obtenerse en un solo paso. El procedimiento *Avalanche* (*A Versatile Assembly Line Algorithm for Numerous Characteristic Extensions*) descrito en Boysen y Fließdner (2008) es el más flexible propuesto hasta el momento para esta fase.

Todo ello se refiere al que puede denominarse diseño funcional de la línea o de las líneas. Dicho diseño funcional constituye la base del proyecto técnico.

5. Conclusiones y perspectivas

En este trabajo se considera el problema de diseño de líneas de producción y asignación de tareas a las estaciones de las mismas, desde un punto de vista más general que el adoptado habitualmente en la literatura. Se pone de manifiesto que en ésta el problema se ha simplificado en exceso, no sólo porque el tipo de problema más tratado, el SALBP, es únicamente un caso muy particular del denominado GALBP, sino también, y principalmente, porque el binomio SALBP-GALBP se refiere a un tipo de problema al que se llega después de tomar, explícita o implícitamente, muchas decisiones relevantes (tales como el número de líneas y su forma). El hecho de que el proceso de adopción de estas decisiones no se mencione siquiera en la mayor parte de textos

sobre las líneas de producción, da lugar a la falsa y poco fructífera idea de que los problemas a resolver en la realidad son, como mucho, variantes del GALBP, en tanto que lo cierto es que son problemas mucho más amplios y menos formalizables. Los modelos matemáticos y los algoritmos correspondientes son útiles e incluso indispensables para resolver correctamente los problemas relativos a las líneas de producción, pero no son suficientes, ya que su uso es pertinente sólo en algunas fases del proceso de toma de decisiones.

En consecuencia, se propone un método para tratar, incluso en el caso más general (multilíneas) el diseño de las líneas y la asignación de tareas. El desarrollo de este método, mediante la precisión del contenido de las etapas del mismo y de los instrumentos aplicables en cada una de ellas, configura una línea de investigación futura con múltiples derivaciones.

6. Referencias

- ANDRÉS, C.; MIRALLES, C., y PASTOR, R. (2008). «Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup times». *European Journal of Operational Research*, 187, 1212-1223.
- BAYBARS, I. (1986). «A survey on exact algorithms for the simple assembly line balancing problem». *Management Science*, 32, 909-932.
- BECKER, C., y SCHOLL, A. (2006). «A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing». *European Journal of Operational Research*, 168, 694-715.
- BIXBY, R.E. (2002). «Solving real-world linear programs: a decade and more of progress». *Operations Research*, 50, 3-15.
- BOYSEN, N., y FLIEDNER, M. (2008). «A versatile algorithm for assembly line balancing». *European Journal of Operational Research*, 184, 39-56.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M., y SCHOLL, A. (2007). «A classification of assembly line balancing problems». *European Journal of Operational Research*, 183, 674-693.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M., y SCHOLL, A. (2008). «Assembly line balancing: Which model to use when?» *International Journal of Production Economics*, 111, 509-528.
- CAPACHO, L. (2008). «ASALBP: the alternative subgraphs assembly line balancing problem. Formalization and resolution procedures». Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- CAPACHO, L., y PASTOR, R. (2006). «The ASALB problem with processing alternatives involving different tasks: definition, formalization and resolution». *Lecture Notes in Computer Science*; 3982, 554-563.
- CHASE, R.B. (1974). «Survey of paced assembly lines». *Industrial Engineering*, 6, 14-18.
- CHIANG, W.C.; KOUVELIS, P., y URBAN, T.L. (2007). «Line balancing in a just-in-time production environment: balancing multiple U-lines». *IIE Transactions*, 39, 347-359.
- COROMINAS, A.; PASTOR, R., y PLANS, J. (2006). «Balancing assembly line with skilled and unskilled workers». *OMEGA, The International Journal of Management Science*. (In Press, Corrected Proof, Available online 9 May 2006).
- DE LIT, P.; REKIEK, B.; PELLICHERO, F.; DELCHAMBRE, A.; DANLOY, J.; PETIT, F.; LEROY, A.; MARÉE, J.-F.; SPINEUX, A., y RAUCENT, B. (1999). «A new philosophy for the design of a product and its assembly line». *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, 381-386.
- DOLGUI, A.; EREMEV, A.; KOLOKOLOV, A., y SIGAEV, V. (2002). «A genetic algorithm for allocation of buffer storage capacities in production line with unreliable machines». *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 1, 89-104.
- ELLEGARD, K., y JONSSON, D. (1992). «Reflective production in the final assembly of motor vehicles: an emerging Swedish challenge». *International Journal of Operations and Production Management*, 12, 117-133.
- EREL, E., y SARIN, S.C. (1998). «A survey on the assembly line procedures». *Production Planning & Control*, 9, 414-434.
- FERNÁNDEZ, V., y PASTOR, R. (2007). «Resolución del problema del equilibrado de líneas de montaje con Relax-and-Fix y diferentes grados de profundidad». *VII Evento Internacional de Matemática y Computación (COMAT2007)*. Cuba, 12 al 15 de junio de 2007.
- HOPP, W.J.; IRAVANI, S.M.R., y Shou, B. (2007). «A diagnostic tree for improving production line performance». *Production and Operations Management*, 16, 1, 77-92.
- LUCERTINI, M.; PACCIARELLI, D., y PACIFICI, A. (1998). «Modelling an assembly line for configuration and flow management». *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 11, 15-24.
- LUSA, A. (2008). «A survey of the literature on the multiple or parallel assembly lines balancing problem». *European Journal of Industrial Engineering*, 2, 50-72.
- MILAS, G. (1990). «Assembly line balancing... Let's remove the mystery». *Industrial Engineering*, 22, 31-36.
- MUTHER, R. (1973). *Systematic layout planning*. Cahnern Books, Boston.
- PASTOR, R.; COROMINAS, A., y LUSA, A. (2004). «Different ways of modelling and solving precedence and incompatibility constraints in the Assembly Line Balancing Problem». *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 113, 359-366.
- PASTOR, R., y FERRER, L. (2008). «An improved mathematical program to solve the simple assembly line ba-

- lancing problem». *International Journal of Production Research*. (aceptado para su publicación).
- PASTOR, R.; FERRER, L., y GARCÍA, A. (2007). «Evaluating Optimization Models to Solve SALBP». *Lecture Notes in Computer Science*, 4705, 791-803.
- PLANS, J. (1999). «Classificació, modelització i resolució dels problemes de disseny i assignació de tasques en línies de producció». Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- PLANS, J., y COROMINAS, A. (1999). «Modelling and solving the SALB-E problem» *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, 356-360.
- REKIEK, B., y DELCHAMBRE, A. (2006). *Assembly Line Design. The Balancing of Mixed-Model Hybrid assembly Lines with Genetic Algorithms*. Springer-Verlag.
- REKIEK, B.; DELCHAMBRE, A.; DOLGUI, A., y BRATCU, A. (2002a). «Assembly line design: a survey». *IFAC 15th Triennial World Congress*.
- REKIEK, B.; DOLGUI, A.; DELCHAMBRE, A., y BRATCU, A. (2002b). «State of the art of optimization methods for assembly line design». *Annual Reviews in Control*, 26, 163-174.
- SALVESON, M.E. (1955). «The assembly line balancing problem». *The Journal of Industrial Engineering*, 6, 3, 18-25.
- SCHOLL, A., y BECKER, C. (2006). «State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing». *European Journal of Operational Research*, 168, 666-693.
- SCHÖNIGER, J., y SPINGLER, J. (1989). «Planung der Montageanlage». *Technica*, 14, 27-32.
- WEE, T.S., y MAGAZINE, M.J. (1982). «Assembly line balancing as generalized bin packing». *Operations Research Letters*, 1, 56-58.
- YAMADA, T., y MATSUI, M. (2003). «A management design approach to assembly line systems». *International Journal of Production Economics*, 84, 193-204.