

**ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS
INDUSTRIALS DE BARCELONA (UPC)**
Departament d'Enginyeria Química

**CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE
PLANTAS QUIMICAS
MULTIPRODUCTO DE PROCESO
DISCONTINUO**

Autor: Antonio España Camarasa

Barcelona, septiembre de 1994

4. Planificación de la producción y secuenciación de tareas

4.1. Introducción

En cualquier planta donde se contemple la fabricación de más de un producto y/o exista una cierta flexibilidad en la asignación de recursos, debe establecerse una metodología para la determinación del plan de producción a seguir en cada momento, en función de circunstancias como las condiciones de mercado o la situación de los equipos. La utilización sistemática de herramientas de cálculo y optimización en los procedimientos de planificación de la producción permitirá mejorar la gestión de los recursos disponibles y, en consecuencia, el rendimiento de la planta.

Pero además de su utilidad como herramienta de explotación, la información que suministran estos sistemas permite revisar y complementar los resultados obtenidos por los procedimientos de diseño preliminar descritos en el capítulo anterior: determinando la mejor forma de utilizar los recursos de producción en diferentes escenarios de fabricación se podrá verificar la validez de las hipótesis de diseño, comprobar la flexibilidad de la planta y disponer de la información necesaria para, en su caso, establecer las modificaciones oportunas.

En este capítulo se describirá una sistemática de planificación de la producción capaz de incorporar funciones objetivo y restricciones que reflejan situaciones de trabajo reales, aplicable a la gestión rutinaria de la producción y que permite además su integración en estudios de diseño y remodelación (capítulo 5).

4.2. El problema de planificación

El estudio de sistemas de planificación de la producción se encuentra tradicionalmente en el ámbito de la investigación operativa. Hace más de 30 años que se investiga en técnicas de planificación de la producción, pero solamente el auge y consolidación de la ciencia y tecnología de la información ha hecho posible una aplicación sistemática de dichas técnicas en la práctica industrial.

Por lo que respecta a la industria química de proceso discontinuo, este problema ha permanecido hasta hace poco en segundo plano¹², frente a la necesidad de estudiar y resolver previamente aspectos de regulación y control (mejorar los sistemas de control físico del proceso, aumentar el grado de automatización y repetibilidad de las

¹²En muchos casos, la planificación de la producción se ha limitado a cálculos aproximados sobre capacidades globales de producción, fechas de entrega estimadas o previsión de compras.

operaciones, mejorar la seguridad en el manejo de las sustancias involucradas, etc.). La instalación de sistemas de adquisición, supervisión y manipulación de información de proceso, imprescindible para resolver correctamente dichos problemas de regulación y control, se ha visto incentivada en los últimos años por unos costes más asequibles y la mejora simultánea en las prestaciones que ofrecen.

La disponibilidad de información detallada sobre lo que ocurre en la planta permite identificar las pérdidas provocadas por situaciones imprevistas o anómalas en las líneas de producción. En muchas ocasiones se observa que estas pérdidas pueden evitarse utilizando sistemáticamente la información disponible en los procedimientos de planificación. Por otra parte, la aparición de situaciones mucho más competitivas ha modificado el escenario productivo, imponiendo márgenes de beneficio mucho más ajustados y exigencias de servicio mucho más estrictas. Por ello, en la última década ha crecido enormemente el interés industrial en disponer de una herramienta capaz de generar órdenes de fabricación a partir de la información disponible, utilizando criterios objetivos y consensuados entre los diferentes departamentos de la empresa.

La utilización de estas herramientas permite además introducir una serie de mejoras cualitativas en la gestión del proceso productivo, entre las que destacan:

- Utilizar de forma óptima la flexibilidad de la planta, agilizando su adaptación a nuevos escenarios de fabricación.
- Reducir la dependencia del elemento humano (el departamento de planificación), evitando que quede colapsado por las incidencias rutinarias y permitiendo que pueda dedicar su atención a resolver de forma adecuada situaciones especialmente conflictivas.
- Mantener actualizada y disponible la información de planificación.
- Permitir una discusión objetiva entre diferentes departamentos sobre la forma óptima de organizar la producción.
- Asegurar un análisis exhaustivo y sistemático de la producción, evitando soluciones poco razonables "porque siempre se ha hecho así".

4.3. Clasificaciones

Dentro de un planteamiento multiproducto, se pueden distinguir diferentes situaciones que, si bien corresponden al perfil de este tipo de plantas, requieren que los sistemas de decisión y operación utilizados sean completamente diferentes. Cada una de estas situaciones queda identificada por la utilización de ciertos criterios que se exponen a continuación:

Estructura de la planta. Uno de los factores fundamentales para determinar la estrategia de planificación más adecuada a cada caso es la estructura de la planta. Se pueden distinguir dos tipos de estructuras límite: las formadas por un conjunto de unidades en serie y las que presentan una etapa única con múltiples unidades en paralelo. El tratamiento de un caso general, formado por un sistema en serie con múltiples unidades no idénticas en paralelo en cada etapa, es mucho más complejo que el de cualquiera de los dos casos extremos.

Política de almacenaje intermedio. Una utilización correcta de los recursos de almacenaje intermedio es fundamental para optimizar la productividad de la planta, por lo que los sistemas de planificación deberán prestar especial atención a este factor. La disponibilidad de equipos de almacenamiento intermedio y la forma de utilizarlos permite distinguir diferentes casos, utilizándose normalmente como criterio de clasificación las situaciones tipificadas en la sección 2.4.4.

Disponibilidad de recursos. La importancia de las limitaciones en la utilización de recursos compartidos (mano de obra, servicios generales, o incluso, como se acaba de comentar, los equipos de almacenaje intermedio) permite distinguir dos situaciones límite: si es posible asumir que estos recursos comunes son ilimitados, la productividad solamente quedará restringida por la disponibilidad de los equipos de proceso, mientras que, en el extremo opuesto, la productividad puede quedar limitada precisamente por el consumo de recursos compartidos. En un caso general todos los recursos (compartidos o no compartidos) puedan ejercer de limitantes según las condiciones de trabajo de cada momento.

Horizonte de planificación. En la mayoría de las publicaciones sobre planificación de la producción se distingue entre la situación en la que el horizonte de tiempo es relativamente corto y la planificación a largo plazo. En el primer caso no es necesario considerar términos referentes a políticas de producción a largo plazo en la función objetivo, mientras que en estudios a largo plazo el problema se suele simplificar secuenciando las campañas en función de ciertos parámetros globales, sin tener en cuenta la ocupación de los equipos en cada instante concreto, o incluso considerando únicamente campañas de un único producto¹³.

Estructura de la demanda. La naturaleza de la función de demanda permite distinguir de nuevo dos situaciones límite:

- Fabricación “contra pedido”: cada pedido incluye su fecha de entrega y presenta una serie de características específicas que probablemente no se repetirán en bastante tiempo. En estos casos suele ser suficiente plantear el plan de producción a corto plazo.
- Fabricación “contra stock”: Se debe cubrir la demanda global de la forma más eficiente posible.

¹³Estas simplificaciones, como se verá más adelante, pueden dar lugar a problemas de coordinación al intentar aplicar las soluciones obtenidas.

La mayor parte de los casos se sitúan entre ambos extremos, existiendo una previsión de venta global, parte de la cual está confirmada a través de pedidos firmes.

Sistema de evaluación del plan. La función objetivo utilizada para valorar el plan de producción condiciona la aplicabilidad de los diferentes sistemas de optimización. Los criterios de idoneidad más utilizados se basan en:

- El tiempo necesario para completar la fabricación de todos los productos (en inglés *makespan*).
- El tiempo de producción promedio para completar la fabricación de todos los productos (en inglés, *mean flow time*).
- Criterios en función de las fechas de entrega: el retraso máximo (o el promedio, o la suma de retrasos), la suma de adelantos (para evitar los costes de *stock*), etc.
- Una función objetivo compuesta por varios términos heterogéneos que identifican los diferentes intereses contrapuestos en la elaboración del plan de producción.

4.4. Antecedentes

En el ámbito de la planificación de la producción de plantas de proceso discontinuo, el caso de las plantas multiproducto ha sido uno de los más frecuentemente se han estudiado: la utilización de la misma secuencia de tareas para todos los productos permite realizar simplificaciones que facilitan enormemente la resolución del problema. Por otro lado, es frecuente encontrar situaciones multiproducto en la realidad industrial.

A continuación se comentan algunas de las soluciones propuestas para planteamientos específicos del problema de planificación, agrupadas según las características estructurales de planta que se contemplan:

4.4.1. Sistemas multiproducto con unidades en serie

Dada la naturaleza de este tipo de plantas, las reglas de transferencia de materia entre tareas (sección 2.4.4) suelen influir de forma determinante en la complejidad de resolución del problema. Optimizar el uso de los equipos de almacenaje intermedio cuando éstos no son ilimitados es, en sí mismo, un problema complejo, aunque estudios relativamente recientes [79, 88] indican algoritmos aplicables a estos casos cuando el objetivo es minimizar el tiempo total de proceso. De estos y otros estudios se deduce que, en función de las distintas situaciones de almacenaje planteadas, la forma de resolución y los resultados obtenidos pueden ser radicalmente diferentes. La mayoría de los métodos desarrollados hasta el momento, tanto rigurosos como aproximados, se hallan orientados hacia la resolución de formas UIS o ZW del problema, mientras que

otras formas (especialmente FIS) han recibido mucha menor atención.

Sin realizar una enumeración explícita o implícita de todas las posibilidades, únicamente se han descrito procedimientos que garantizan la solución óptima en casos muy sencillos. Son casos en los que solamente se presentan dos o tres etapas y que utilizan criterios simples de minimización (tiempo total de producción, tiempo de flujo medio, etc.) en operación UIS, ZW o NIS (por lo que no es necesario tratar explícitamente la ocupación de los equipos de almacenaje). Un ejemplo típico de tales soluciones es el algoritmo de Johnson [38], aplicable al caso de minimizar el tiempo total de producción en sistemas de dos etapas unidas por un sistema de almacenaje ilimitado.

Por su parte, utilizando procedimientos de enumeración, aunque sea implícita como en el método de bifurcación y acotación (en inglés *branch and bound*), el tiempo de cálculo necesario para asegurar la solución de un problema de optimización crece de forma más que polinómica con las dimensiones que caracterizan el problema¹⁴. Este hecho los hace inaceptables para su aplicación sistemática en casos industriales, pero presentan la particularidad de disponer en cualquier momento de una “cota superior” que es una solución factible y cuya calidad se puede estimar a partir de la “cota inferior”. La evolución de los valores de estas cotas depende de la formulación utilizada, por lo que es posible encontrar formulaciones que, en determinados casos, permiten obtener resultados suficientemente aproximados en tiempos de cálculo aceptables.

Como alternativa a los métodos exactos, se utilizan con éxito reglas heurísticas para obtener secuencias subóptimas. Algunas de estas reglas se basan en la extrapolación de procedimientos aplicables a casos sencillos:

- Campbell y colaboradores [10] proponen utilizar el algoritmo de Johnson [38] mencionado anteriormente para estudiar el caso general de M tareas, aplicándolo sucesivamente a cada par de unidades y construyendo después la secuencia de proceso óptima a partir de estos resultados parciales.
- Tandom y colaboradores [100] también proponen una heurística basada en el algoritmo de Johnson, y la aplican para obtener soluciones aproximadas al caso en el que se permite alterar el orden en el que los equipos procesan los diferentes lotes. La no exigencia de que el orden de paso de los productos se mantenga para todos los equipos hace que las soluciones obtenidas sean superiores, aunque para ello se requiera la existencia de equipos de almacenaje intermedio.
- Birewar y Grossmann [7] muestran un procedimiento para generar campañas con tiempo de ciclo mínimo, a partir del cual se pueden generar fácilmente planes de producción con tiempos totales de proceso muy cercanos a los valores óptimos.

En otros casos se intenta explotar el conocimiento del sistema para obtener soluciones que permitan reproducir o mejorar el procedimiento de toma de decisiones en

¹⁴Se habla entonces de problemas NP-completos (*Non-Polynomial-Complete*).

las situaciones rutinarias.

Aunque en general no será posible conocer la calidad de la solución proporcionada por un procedimiento heurístico, siempre es posible realizar estudios sistemáticos que permitan estimarla con un grado de confianza adecuado. Ku y Karimi proponen una estrategia de *simulated annealing* para reducir las penalizaciones por retrasos [47] y analizan su eficacia frente a otros procedimientos heurísticos [48]. Los resultados obtenidos confirman que este tipo de estrategias generales, aplicables a muchos problemas de optimización que no admiten otro tipo de soluciones más rigurosas, permiten, en la mayoría de los casos, obtener soluciones aceptables en situaciones industriales [16, 72]. Lo mismo ocurre con los llamados "algoritmos genéticos" [2].

4.4.2. Redes de producción compuestas por una única etapa limitante con varias unidades de proceso en paralelo para realizarla

Con frecuencia, la productividad de plantas multiproducto reales queda limitada por una única etapa, por lo que, a efectos de cálculo, el problema de planificación se reduce a determinar la secuencia de paso de los productos por dicha etapa. Sin embargo, si existen varios equipos alternativos para realizar la etapa limitante, se plantea un problema de asignación junto al de secuenciación propiamente dicho, por lo que el procedimiento de resolución se complica. El problema es muy parecido si la etapa limitante no es discontinua, sino que está formada por líneas de producción continuas operando de forma semicontinua. En el caso de etapas semicontinuas, el tamaño de los lotes en los que se dividirá el pedido es uno de los factores a optimizar, mientras que en el caso de etapas discontinuas este factor quedará restringido por el tamaño de carga asociado a cada equipo.

Existen algunos casos en los que es posible aplicar métodos exactos, especialmente si es posible descomponer un pedido en diferentes lotes de tamaños arbitrarios y se utilizan funciones objetivo sencillas. Algunos de estos casos pueden encontrarse en las recopilaciones realizadas por Reklaitis [83] o por Graham y colaboradores [31], y aparecen resumidas en la tabla 4.1.

En general, si se desea asegurar que la solución encontrada sea la óptima, de nuevo es necesario recurrir a procedimientos de enumeración [3,37], con lo que no se puede asegurar una solución exacta en tiempos de cálculo razonables incluso en el caso de disponer únicamente de 2 equipos en paralelo [31].

Uno de los procedimientos aproximados más conocidos para minimizar el tiempo máximo de ocupación de los equipos cuando no es posible dividir arbitrariamente la producción en diferentes lotes consiste en ordenar los lotes según tiempos de proceso decrecientes y asignarlos sucesivamente a la unidad que en cada momento presente menor carga (LPT, del inglés *Longest Processing Time*). En [31] se demuestra que:

Tabla 4.1. Resumen de los resultados obtenidos para el problema de secuenciación sobre unidades en paralelo.

Unidades	Makespan		Tiempo de Flujo Medio	
	Divisible	No divisible	Divisible	No divisible
Idénticas	[58]	NP-completo	SPT[58]	SPT [4]
Uniformes	[29]	NP-completo	[30]	SPT modificado
Distintas	[52]	NP-completo	NP-completo	[9]

SPT: ordenación de los lotes por tiempos de proceso crecientes (del inglés *Shortest Processing Time*) y asignación sucesiva a las diferentes unidades.

$$\frac{makespan]_{LPT}}{\min \{makespan\}} \leq \frac{4}{3} - \frac{1}{3m} \quad (4.1)$$

y, si el número de productos a planificar es suficientemente grande, un límite inferior bastante aproximado viene dado por la expresión desarrollada para el caso de lotes divisibles [58]:

$$\min \{makespan\} = \max \left\{ \max_i \{t_i\}, \frac{1}{m} \cdot \sum_i t_i \right\} \quad (4.2)$$

Una estrategia para reducir la magnitud del problema de planificación consiste en descomponerlo según un sistema jerarquizado: en un nivel superior, un plan que abarca varios periodos (“multiperiodo”) contempla la minimización de costes de producción e inventario (que, en sus forma más simple, puede plantearse como una optimización lineal); en un nivel inferior la resolución de varios problemas de estructura entera permite obtener la asignación y secuenciación de tareas, optimizando en cada periodo el criterio de producción requerido y cumpliendo con los requisitos de producción fijados por el nivel superior. En todo caso, estas estrategias no permiten asegurar que la solución encontrada sea el óptimo global del problema.

4.4.3. Sistemas serie con unidades en paralelo

En el caso más general, las plantas discontinuas multiproducto pueden disponer de múltiples unidades en paralelo en cada etapa serie del proceso. Esta estructura puede considerarse la extensión natural del sistema de unidades paralelo y del sistema serie. La complejidad del problema de planificación en estos casos se pone de manifiesto en algunos de los estudios más recientes:

- Kondili y colaboradores [46] plantean el problema discretizando la variable “tiempo” y asumiendo que el estado de la planta es constante dentro de cada uno de los intervalos de tiempo considerados. A partir de esta hipótesis, los autores desarrollan diferentes formulaciones que permiten incluir diferentes reglas de

transferencia de materia entre unidades, asignación flexible de equipos a tareas y diferentes funciones objetivo, llegando siempre a un problema de optimización lineal entera que en los casos más sencillos se puede solucionar utilizando procedimientos de optimización estandar.

Siguiendo esta misma forma de representación, Shah y colaboradores [93] y Sahinidis y Grossmann [89] reformulan el problema para reducir el tiempo de cálculo, y Rapacoulias y colaboradores [80] aplican esta misma metodología cuando existen órdenes de fabricación específicas con fechas de entrega concretas.

- Pinto y Grossmann [74] analizan el caso bajo el objetivo de cubrir las órdenes de producción, que llegan sin una secuencia regular o previsible, minimizando los *stocks* de productos acabados y cumpliendo con los plazos de entrega establecidos (producción *just in time*). Para simplificar el tratamiento matemático convierten en restricción uno de los objetivos (cumplir los plazos de entrega), por lo que el problema no tendrá solución si no se pueden cumplir todos los plazos de entrega.

Después de reconocer la imposibilidad práctica de resolver rigurosamente casos de dimensiones industriales con la instrumentación de cálculo actual, los autores proponen la combinación de métodos de descomposición junto con simplificaciones basadas en las características del problema.

- Estos procedimientos también son aplicables a líneas de producción continuas multiproducto. Sahinidis y Grossmann [88] tratan el problema de minimización de los costes de producción, supuestos conocidos pero dependientes de la asignación de productos a las líneas, y los costes de cambio de producto, supuestos también conocidos pero dependientes de la secuencia de producción. La solución propuesta consiste en un sistema de cálculo de cotas superiores e inferiores que, a través de un procedimiento iterativo, converge eventualmente en la solución buscada. El procedimiento, aplicado a un caso con 26 productos, muestra una reducción considerable en requisitos de cálculo respecto a procedimientos de bifurcación y acotación equivalentes, aunque de todas formas supone la utilización de sistemas de cálculo extraordinariamente potentes (22 minutos de CPU en un ordenador IBM-3090, y el agotamiento de memoria de los sistemas de gestión de los paquetes de optimización utilizados).

Un grado adicional de complejidad en el problema aparece al introducir restricciones en la disponibilidad de recursos compartidos (potencia eléctrica, caudal de vapor disponible u otros servicios generales, límites de demanda o en las fluctuaciones de inventario a corto plazo, etc.). La forma de integrar estas nuevas restricciones en el planteamiento general implica la utilización de reglas desarrolladas específicamente para cada caso concreto. Además del ya citado [74], en [19] y [54] se describen algunas aproximaciones a esta situación.

4.4.4. Aplicación a casos industriales

La elaboración de un plan de producción adecuado para una planta de proceso

discontinuo/semicontinuo implica el manejo de un volumen de información importante y resolver un problema matemático muy complejo en cuanto a forma y dimensiones.

Musier y Evans [63] destacan las siguientes causas como origen de muchos de los fracasos en la implantación de sistemas de planificación en casos industriales:

- Hipótesis de trabajo no realistas.
- Necesidad de hacer desarrollos a medida de cada caso.
- Falta de flexibilidad del sistema desarrollado.
- Elevada importancia de factores “externos” en las decisiones de planificación.

Adicionalmente, la falta de experiencia del usuario final en la utilización de sistemas de decisión asistidos por ordenador, los elevados costes de formación y las dificultades para cuantificar los beneficios de la implantación de tales sistemas, pueden convertirse en obstáculos adicionales en este proceso de implantación, aunque con la progresiva introducción de sistemas informáticos a todos los niveles de la empresa y la mayor competitividad del mercado, estos obstáculos tienden a desaparecer.

Para solventar estas dificultades, una posibilidad prometedora consiste en un sistema interactivo integrado con un procedimiento de optimización. Musier y Evans [63] identifican algunas de las características que deberían presentar estos sistemas, entre las que destacan la necesidad de disponer de un modelo que reproduzca fielmente el comportamiento de la planta y de información correctamente actualizada.

Basándose en estos principios, los mismos autores han desarrollado procedimientos aproximados para resolver el caso consistente en una única etapa con unidades no idénticas en paralelo, bajo una función objetivo que contempla los retrasos sobre las fechas de entrega y con tiempos de cambio de producto variables. El procedimiento propuesto analiza todos los movimientos de un lote y todos los intercambios posibles entre todos los pares de lotes, acabando el rastreo cuando un determinado plan no puede ser mejorado por estos movimientos e intercambios [62]. El sistema anterior es ampliado [64] para contemplar la posibilidad de descomposición de un pedido en varios lotes, donde el tamaño de cada lote depende del equipo al que sea asignado.

Al penalizar únicamente los retrasos en los plazos de entrega, despreciando el efecto de otros factores como la reducción de costes de cambios de producto, la utilización correcta de los equipos, etc., esta función objetivo no mejorará la eficiencia de la producción en situaciones donde no existan problemas por retrasos. El procedimiento puede generalizarse para tratar funciones objetivo más complejas, pero entonces no serán aplicables las heurísticas indicadas por los autores para reducir el espacio de búsqueda y simplificar el cálculo de la función objetivo.

En general, los programas de planificación actualmente disponibles en el mercado se basan en métodos sencillos (de programación lineal o muchas veces puramente

heurísticos) para obtener soluciones a problemas simples, a los que en determinadas ocasiones se añade un sistema de gestión manual del plan que permite al usuario adaptarlo a sus necesidades [35]. Aunque actualmente no existen dificultades formales para implantar con éxito estos procedimientos en la mayoría de las situaciones reales [84], el coste asociado suele ser todavía excesivo, debido a que siempre acaba siendo necesario realizar adaptaciones al caso concreto.

4.4.5. Conclusiones

La resolución de problemas de la planificación de la producción es, como ya se ha indicado, uno de los principales objetos de estudio dentro del ámbito de la investigación operativa y constituye una de las principales aplicaciones industriales de diversas técnicas de optimización matemática.

A pesar de ello, las soluciones rigurosas propuestas hasta el momento, o bien solamente son aplicables a casos elementales, o bien requieren esfuerzos de cálculo que crecen de forma exponencial con las dimensiones del problema, por lo que no resultan aceptables en la práctica. Como señala Reklaitis en un reciente resumen [84], un análisis adecuado de la estructura del problema puede conducir, en ciertos casos específicos, a procedimientos de acotación que permitan la solución rigurosa de problemas de grandes dimensiones, con ventaja incluso sobre procedimientos heurísticos generales (Pekny y Miller [72]), pero las características del entorno de trabajo industrial siguen imponiendo las ventajas de los sistemas heurísticos (Kudva y colaboradores [49]).

Adicionalmente, al intentar implantar en un caso real un sistema de cálculo que permita la obtención automática del plan de producción, pueden aparecer una serie de problemas técnicos y humanos que incrementan enormemente la dificultad de resolución:

- La identificación y formulación del problema se debe basar en la descripción de la planta y del proceso productivo obtenida a través de los responsables de los diferentes departamentos afectados. Esta descripción depende esencialmente de la función de la persona que la realiza.
- El procedimiento de planificación debe adaptarse a las incidencias que pueden llegar a suceder en la planta a medio y largo plazo (cambios en el mercado, en la organización de los recursos productivos, en las políticas de empresa, etc.).
- La implementación del sistema de planificación, además de realizar los cálculos necesarios, debe integrarse en el sistema de tratamiento de información de la empresa.
- Por último, pero no por ello menos importante, todo proceso de innovación provoca ciertos problemas de adaptación en el personal afectado que puede, con su actitud, dificultar la obtención de los resultados esperados.

Por ello, a pesar de que el esfuerzo de investigación que se está realizando para hallar técnicas prácticas de secuenciación en sistemas de proceso multiproducto generalizados ofrece resultados recientes muy esperanzadores, la solución actual de aplicaciones industriales, tanto por lo que respecta a las condiciones de trabajo como a las dimensiones del problema, debe plantearse a partir de métodos heurísticos, aunque los algoritmos resultantes sean muy específicos para cada aplicación concreta.

4.5. Enfoque del problema

Al abordar el problema de asignación de recursos y planificación de la producción en situaciones industriales, suelen distinguirse varios niveles de decisión, en función del horizonte de tiempo y del grado de detalle contemplado:

- El nivel más alto (*planning*) tendrá en cuenta un amplio horizonte de tiempo (típicamente anual, o incluso mayor), fijando objetivos de producción a partir de estimaciones de demandas o bien de objetivos de ventas. Las decisiones se toman a nivel de planta o incluso de empresa, coordinando la producción entre distintos centros de trabajo sin analizar el detalle de los equipos o de los productos. Como resultado de este análisis se pueden tomar decisiones que afecten a compras y expediciones, modificaciones o reestructuraciones de equipos o líneas de producción, contratación de personal, etc., que afectan a la producción a medio o largo plazo. Cuanto mayor es la complejidad de la estructura productiva, menor suele ser el grado de detalle del análisis y mayor es la importancia estratégica de las decisiones tomadas.
- En los niveles intermedios se suele fijar la asignación de productos a líneas de producción y su secuencia de proceso, atendiendo a criterios técnicos y comerciales, y siguiendo los objetivos marcados por los niveles superiores. Se trabaja con horizontes de tiempo que suelen oscilar entre los varios días y las pocas semanas, en función del tiempo de proceso de los productos involucrados, y se dispone de una aproximación muy precisa de las necesidades reales (demanda) y de los recursos disponibles.
- En el nivel inferior (*scheduling*), las asignaciones anteriores quedan totalmente especificadas, tanto a nivel de producto (se trabaja para cubrir una demanda específica de un cliente concreto, con fechas de entrega, prioridades, etc.) como de recursos necesarios (se identifican las máquinas que serán utilizadas, las materias primas que se consumirán, los operarios, etc., y los tiempos previstos de utilización), generándose las órdenes de fabricación correspondientes.

Cuando el proceso de toma de decisiones se realiza de forma manual, basándose en el criterio y la experiencia de las personas involucradas, la división entre estos niveles es, en la práctica, muy flexible: las decisiones tomadas en niveles superiores

pueden quedar matizadas en niveles inferiores, al ponerse de manifiesto las crecientes discrepancias entre las previsiones (o los objetivos) y la realidad del mercado o de la situación de los equipos. En caso necesario, cada nivel podrá modificar las decisiones tomadas en niveles superiores (si dispone de suficiente iniciativa, información y criterio para ello) o informará de los problemas detectados, para que sean los propios niveles superiores los que las revisen adecuadamente.

Para ganar en flexibilidad y capacidad de respuesta, una alternativa consiste en automatizar (informatizar) estos procedimientos de toma de decisiones. Planteada esta posibilidad, la primera aproximación suele ser la de intentar reproducir la situación anterior mediante un conjunto de programas que serán utilizados en un ordenador. Sin embargo, para lograr que esta solución sea realmente eficaz se presentan dos problemas claves:

1. Es muy difícil emular la flexibilidad mencionada anteriormente en los procesos de revisión de decisiones, por lo que se puede llegar a situaciones donde determinadas soluciones, seguidas de forma inflexible por niveles inferiores, conduzcan a estados poco adecuados, incorrectos o incluso incoherentes con los criterios básicos de producción.
2. Por otra parte, en muchos de casos reales será imposible establecer claramente los criterios de agregación y disgregación de la información. Estos criterios, imprescindibles para establecer en cada nivel de decisión el grado de detalle a considerar en el modelo utilizado, suelen presentar un gran número de situaciones excepcionales en las que será necesario considerar algún aspecto generalmente ignorado.

En consecuencia, debe existir una comunicación entre los diferentes niveles de forma que todos ellos tengan la posibilidad de "entender" los criterios empleados por el resto, por lo que:

1. Se debe disponer en todos los niveles de la misma función objetivo, que contemple todos los criterios a utilizar en cualquier nivel, para evitar tomar decisiones que quedarán descartadas en otros niveles, o rectificar decisiones correctas por falta de información.
2. En todos los niveles de decisión se debe trabajar con un modelo de la planta con el mismo grado de detalle, para evitar definir casos excepcionales contemplados en otros niveles de decisión.

Por tanto, para poder aplicar correctamente una sistemática de planificación, será necesario unificar los diferentes aspectos considerados en cada nivel de decisión de la empresa y utilizar un procedimiento de planificación que los integre en una única función objetivo aplicable a un único modelo de planta.

De esta forma se facilitará también el tratamiento de otro de los problemas básicos que se pretende resolver a través de sistemas de planificación de la producción: la adaptación del plan a las condiciones cambiantes de la planta y de su entorno. Para resolver este aspecto del problema, se debe determinar qué decisiones deberían ser revisadas en función de los diferentes cambios que han podido ir ocurriendo, de forma que los objetivos generales se sigan cumpliendo. Por su parte, uno de estos objetivos puede ser el minimizar el impacto de los cambios sobre los planes ya establecidos, enfrentado, a través de la formulación matemática adecuada, al resto de objetivos habituales, como pueden ser los de minimizar los retrasos en las fechas de entrega, aumentar la productividad, etc.

Como contrapartida, es evidente que la adopción de un modelo único detallado a todos los niveles implicará aumentar enormemente la complejidad del problema a resolver.

En cualquier caso, una solución realista al problema de planificación y secuenciación de la producción debe incluir también la coordinación con otros aspectos de gestión de planta y de política comercial, como por ejemplo:

- Los sistemas de abastecimiento de la planta (suministro de materias primas, niveles de seguridad en los *stocks*, etc.).
- Las estimaciones de ventas y el tratamiento de la incertidumbre en la demanda a medio y largo plazo.
- Las necesidades de mantenimiento y los procedimientos seguidos para elaborar los programas de mantenimiento preventivo.
- El tratamiento de incidencias no previstas en el plan (llegada de nuevos pedidos, averías o retrasos en el proceso, etc.).

En ocasiones el plan de producción deberá adaptarse a las restricciones impuestas al considerar estos puntos, mientras que en otros casos será la forma de trabajar (la propia planificación) la que determinará la viabilidad de un programa de mantenimiento, la necesidad de un aprovisionamiento de materias primas o incluso una estrategia comercial que permita un incremento de ventas de alguno de los productos.

Las necesidades concretas de coordinación entre los aspectos mencionados y el sistema de planificación de operaciones depende de cada situación y es parte de la política general de funcionamiento de la empresa. Por ello, el problema de planificación, tal como va a ser analizado en este capítulo, no contempla explícitamente esta coordinación. Sin embargo, el procedimiento propuesto puede admitir fácilmente las restricciones y/o costes adicionales relacionados con esta problemática. En el ejemplo que se presenta al final de este capítulo (sección 4.12) se ilustra la forma de incorporar algunos de estos factores.

4.6. Modelos de planificación

El problema de planificación de la producción a medio o largo plazo en una planta que fabrique varios productos se puede plantear mediante un modelo simplificado en el que la instalación se considere como una entidad única que trabaja durante un horizonte de tiempo indefinido y bajo demanda conocida. Dividiendo este horizonte de tiempo en periodos más cortos, en función de la resolución disponible en datos sobre productividades, demandas, etc., suponiendo una productividad media (tiempos de ciclo reducidos respecto al horizonte de tiempo con el que se trabaja) y despreciando las interrupciones por cambios de producto u otras incidencias, la única variable es la cantidad X de cada producto $i = 1, \dots, N$ a fabricar en cada periodo $t = 1, \dots, T$, X_{it} , cuyo valor debe expresarse en función del número de lotes programados y del tamaño de lote utilizado en cada uno de ellos. A partir de estas variables se podrán calcular los inventarios de cada producto al final de cada periodo, I_{it} , y los recursos comunes (mano de obra, materias primas, servicios generales, etc.) de cada clase $g = 1, \dots, G$ consumidos en cada periodo, Y_{gt} [53].

Si la función objetivo es una medida simple de la forma de fabricación y las restricciones son fácilmente calculables (por ejemplo, minimizar los costes de inventario, supuestos proporcionales a las cantidades respectivas $C_t = \sum_i c_i \cdot I_{it}$, manteniendo dichos inventarios positivos $I_{it} \geq 0$), se podrán utilizar modelos matemáticos sencillos para formular este tipo de problemas, y resolverlos mediante la aplicación de procedimientos que, en muchas ocasiones, se pueden encontrar en el mercado en forma de programas informáticos.

En una planta multiproducto el caso es todavía más sencillo, especialmente si se producen un gran número de lotes de cada producto y la operación se organiza en forma de campañas largas, en las que la planta trabaja de forma cíclica (esta es una de las hipótesis planteadas en el capítulo 3). Sin embargo, cuando el comportamiento discontinuo es preponderante, las hipótesis anteriores suelen dar lugar a resultados erróneos debido a la importancia que adquieren factores como:

- Las paradas y puestas en marcha de los equipos o de la propia instalación.
- Los solapamientos puntuales en las demandas de servicios generales que provocan tiempos muertos y desfases en el ciclo de trabajo.
- Los tiempos improductivos por operaciones de limpieza, cambios de producto, esperas debidas a falta de disponibilidad de equipos adecuados, etc.

Aún en el mejor de los casos, suponiendo que todas las variables que presentan una cierta incertidumbre (demanda, disponibilidad de los equipos y de los servicios generales, etc.) evolucionen según estaba previsto, estos factores darán lugar a diferencias notables entre lo planificado y lo realmente fabricado en planta.

Si la información procedente de la planificación se ha de utilizar únicamente para evaluar resultados globales (por ejemplo, establecer objetivos de producción anual, determinar y planificar las compras de materias primas a largo plazo, modificar las políticas comerciales, contratar nuevo personal, realizar inversiones en equipos, etc.) es posible compensar los efectos de estas desviaciones mediante la aplicación de factores de corrección medios. Sin embargo, como se ha indicado en la sección anterior, el plan maestro resultante también se utilizará para tomar otras decisiones que requieren una previsión a corto plazo, con lo que el modelo necesario deberá incluir información mucho más detallada sobre el trabajo de los diferentes equipos y la ocupación de los recursos generales.

Por otro lado, en la situación económica actual, los planes estratégicos de muchas compañías se inclinan cada vez más a desarrollar y lanzar al mercado productos sofisticados, de alto valor añadido y de vida corta, a medida de las necesidades del cliente y diferenciados de la competencia. También es frecuente encontrar situaciones en los que la fabricación no responde a una demanda cíclica sino que es función de una situación de mercado previsible pero variable debido a la influencia de factores estacionales, factores económicos, modas, etc. En ambos casos, dado que la utilización de factores de corrección normalmente se basará en experiencias anteriores, para poder tomar las decisiones estratégicas anteriormente mencionadas se necesitará disponer de información más fiable, al no existir una experiencia válida que permita extrapolar el comportamiento de la planta a estas nuevas situaciones.

Por tanto, sin entrar en consideraciones sobre la coordinación necesaria con otros niveles más detallados de planificación, se concluye de nuevo que se debe plantear un modelo detallado, que permita conocer en todo momento la evolución temporal del nivel de ocupación de cada uno de los recursos productivos por aplicación del plan previsto.

4.6.1. Modelo utilizado

Para la determinación de las secuencias óptimas de producción dentro de la planta, se han considerado las siguientes hipótesis [21]:

- El periodo a largo plazo (horizonte de tiempo) está constituido por Nmp periodos a medio plazo, que constituyen la base de evaluación de costes. El periodo a medio plazo es el máximo nivel de resolución con el que se conoce la demanda.
- El periodo a medio plazo está constituido por Ncp periodos a corto plazo, sobre los que se realiza la planificación detallada de los recursos de la planta. Durante estos periodos, la actividad de la planta no se interrumpe de forma global, aunque la disponibilidad de determinados recursos productivos puede quedar temporalmente restringida o cancelada (fallos de equipo, mantenimiento preventivo, turnos del personal, etc.).

- Las tareas se han descompuesto en seis secciones lógicas: preparación, llenado, operación, espera, vaciado y limpieza. El cálculo del tiempo necesario para cada una de estas secciones se realiza de la siguiente forma:

- En las etapas de preparación y operación se aplica una aproximación exponencial en función de la cantidad procesada, ecuación (2.13).
- Para las etapas de llenado y vaciado se aplica el máximo del tiempo requerido por las operaciones semicontinuas asociadas, calculado según la ecuación (2.14).
- Para la etapa de limpieza se calcula un "tiempo base" a partir de la cantidad procesada según (2.13), el cual se corrige en función del cambio de producto previsto, según los valores introducidos en una tabla que se incluye en la información suministrada para cada equipo.
- El tiempo de espera será el mínimo posible de acuerdo con la disponibilidad de equipos para realizar la siguiente etapa y las características del producto intermedio (inestabilidad).

- La ocupación de los recursos compartidos se calcula a partir de los recursos unitarios consumidos por cada tarea. Se ha utilizado un modelo lineal, por lo que para cada tarea se definen dos parámetros que permitirán calcular la cantidad de recurso necesaria en función de la cantidad de producto procesada (energía, horas · hombre, etc.) y otros dos que permitirán identificar los instantes inicial y final correspondientes a ese consumo. Dado que la duración total de cada etapa dependerá de la cantidad de material a procesar, estos instantes se suelen definir en función de dicha duración total. La potencia necesaria se podrá calcular dividiendo el consumo entre el tiempo de utilización.

Excepcionalmente, en las tareas de limpieza se definen directamente los recursos horarios necesarios (potencia, número de personas, etc.) de forma que si crece el tiempo de limpieza también crecerá la demanda de recursos necesarios.

- Para ajustar en cada momento la disponibilidad de recursos con las necesidades planteadas por las campañas introducidas, se podrán insertar dentro del plan tiempos de retraso antes del inicio de cada lote, además de los tiempos de espera que se incluirán en las diferentes tareas en función de las necesidades de producción.
- El modelo de la planta debe incluir también la forma de evaluar un determinado plan de producción.

El objetivo del sistema de planificación que se propone es que pueda utilizarse en entornos industriales, donde los criterios de planificación dependerán de cada situación concreta. Sin embargo, en toda planta de fabricación existe el mismo objetivo: aumentar los beneficios. Por tanto, la función objetivo a utilizar deberá valorar los beneficios esperados por aplicación del plan de producción propuesto, y para ello lo más intuitivo es expresarla términos monetarios.

Para facilitar la identificación de las diferentes características (positivas o negativas) de un plan de producción, se ha supuesto que la función objetivo puede calcularse como suma de diferentes términos, cada uno de los cuales hace referencia a algunas de dichas características. No es necesario que estos términos estén relacionados con un único aspecto de fabricación.

Por ejemplo, la demanda a servir durante un periodo a medio plazo D_{it} normalmente se debería producir dentro de dicho periodo t . En caso de que esto no sea posible, se aplicarán penalizaciones, que podrán ser diferentes si la demanda se realiza en periodos anteriores (coste del inventario del producto i para cada periodo a medio plazo t , I_{it}) o en periodos posteriores (coste de la insatisfacción del cliente debido a que existen cantidades pendientes no servidas del producto i al final del periodo a medio plazo t , \mathcal{R}_{it}). También es posible aplicar una penalización si para un periodo t existe producción de un producto que genera inventario mientras algún otro producto llega retrasado, etc.

De esta forma, la función objetivo puede evaluar los efectos económicos de adelantos, retrasos, utilización del equipo ideal para la ejecución de las diferentes tareas, continuidad en la producción, cambios de producto, dispersión de los lotes para cubrir una misma demanda, etc., a distintos niveles (por ejemplo, es posible distinguir diferentes niveles de penalización en función del grado de retraso o de la prioridad del cliente). En el ejemplo descrito en la sección 4.12 se puede comprobar la utilidad de este tipo de estructura.

4.7. Sistema general de planificación y secuenciación

El algoritmo que se propone para la planificación de la producción de plantas multiproducto actúa en tres fases:

1. Análisis de las formas de producción más eficientes, mediante un procedimiento de generación de campañas y su posterior evaluación.
2. Generación de un plan inicial que cumpla los requisitos de producción mediante una mera asignación de los recursos productivos en el tiempo.
3. Análisis del plan obtenido según los criterios reflejados en la función objetivo, y ejecución de los cambios adecuados para obtener una mejora en el valor de dicha función objetivo.

El conocimiento de la forma de fabricación de la planta y de las políticas de empresa aplicables será fundamental para determinar y ajustar los criterios de selección y ordenación que finalmente darán lugar al plan de producción propuesto, tanto en la etapa de creación del plan inicial como en la de optimización. En general, la determinación de varios planes iniciales y su posterior optimización permitirá tratar adecuadamente la aparición de óptimos locales e incrementará la probabilidad de llegar a una solución mejor.

4.7.1. Generación y análisis de campañas

En numerosos estudios sobre planificación de la producción en plantas discontinuas se destaca la importancia de identificar secuencias de lotes que permitan una utilización eficiente de los recursos disponibles, para basar la posterior planificación en dichas secuencias o campañas. El sistema que se propone está basado también en esta forma de trabajo.

Dadas las características propias de las plantas multiproducto, donde las recetas son muy parecidas entre sí y las penalizaciones por tiempos y costes de limpieza de los equipos suelen ser importantes, es probable que las campañas más eficientes sean las formadas por sucesión de lotes del mismo producto. En este caso, el análisis solamente habrá servido para generar la información referente a la conveniencia de producir cada uno de los productos (productividad, recursos necesarios, beneficios esperados, etc.) y a las secuencias más favorables de cambio entre productos. Sin embargo, en algunas circunstancias pueden existir combinaciones de lotes que permitan aprovechar de forma más eficiente los recursos productivos. La frecuencia de estas situaciones aumenta cuando:

- Las penalizaciones por cambio de producto son pequeñas en relación con el resto de factores que forman parte de la función objetivo.
- Las etapas limitantes de tiempo de ciclo no son las mismas para los diferentes productos, y existen marcadas diferencias en los tiempos de proceso de estas etapas. La combinación de lotes de productos de estas características puede reportar una mayor utilización de los equipos limitantes y, por tanto, una mayor productividad (figura 4.1). Esta situación puede llegar al extremo de que alguno de los productos no necesite pasar por la etapa que para otros productos es limitante.
- Los consumos de servicios generales no son los mismos para todos los productos, por lo que trabajando según campañas de productos complementarios respecto a la utilización de dichos servicios se pueden obtener perfiles de consumos mucho más regulares (figura 4.2). Si los recursos limitantes son los servicios comunes, o el perfil de disponibilidad en el tiempo presenta discontinuidades (por ejemplo, en el caso en el de empresas que trabajen por turnos, ciertas operaciones o ciertos productos pueden requerir de un personal especializado que solamente esté presente en alguno de los turnos) esta combinación puede implicar mejoras importantes también en la productividad, al darse una situación similar a la descrita en el punto anterior.
- Existe alguna etapa donde hay varios equipos no idénticos en paralelo: en este caso, las diferencias entre los factores de tamaño de varios productos en esta u otras etapas pueden permitir un mayor aprovechamiento de los equipos. Además, si la planta está bien diseñada, la presencia de equipos en paralelo indica un grado

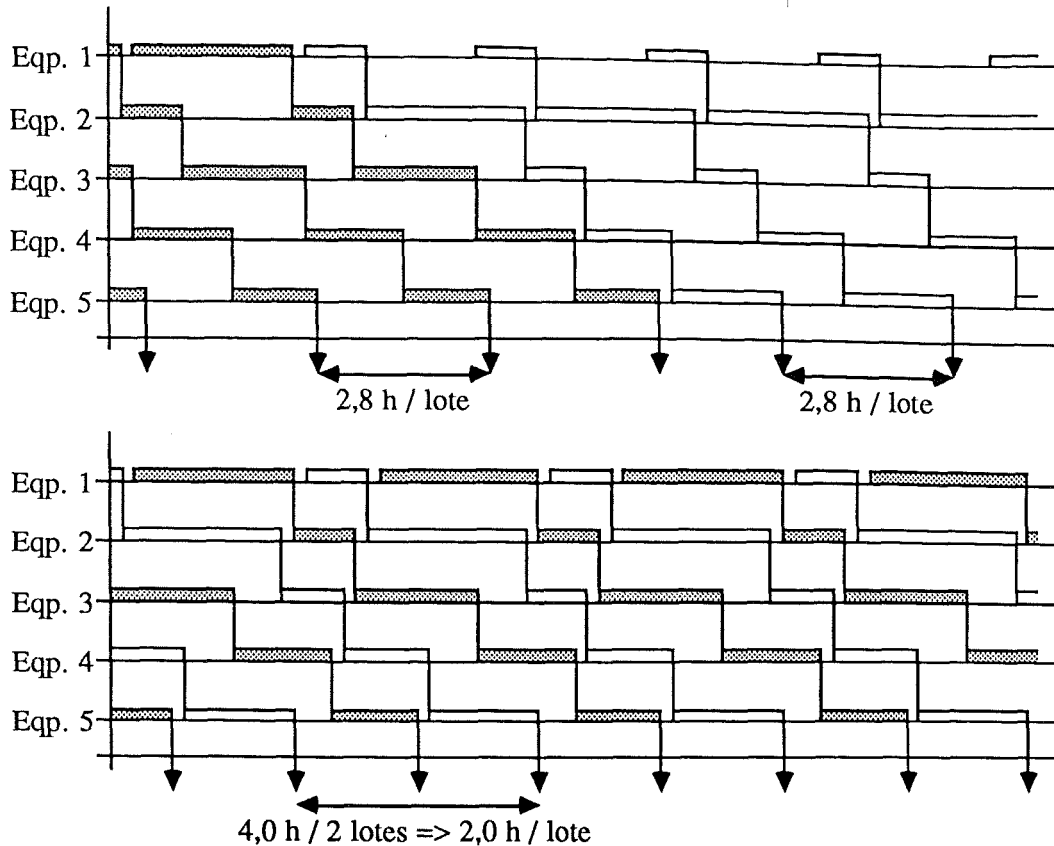


Figura 4.1. Mejora de la utilización de los equipos limitantes y de la productividad por combinación de lotes de diferentes productos.

de utilización elevado de los mismos, por lo que es frecuente que esto ocurra en la etapa limitante (figura 4.3).

Se han desarrollado una serie de reglas que permiten identificar sistemáticamente estas situaciones y generar campañas multiproducto que puedan aportar soluciones más eficientes por lo que respecta a la función objetivo especificada en cada caso. Estas reglas pueden ser complementadas mediante un análisis sistemático de secuencias o incluyendo secuencias sugeridas por el propio usuario.

Planteadas cada campaña como una secuencia de lotes que se introducen en la red de proceso y cada lote como una secuencia de tareas, el procedimiento de análisis se basa en la simulación de la operación de la planta sobre una situación de trabajo lo más realista posible, en la que se repite la secuencia de tareas indefinidamente mientras se cumplen las restricciones aplicables en cada caso respecto a la utilización de los recursos disponibles.

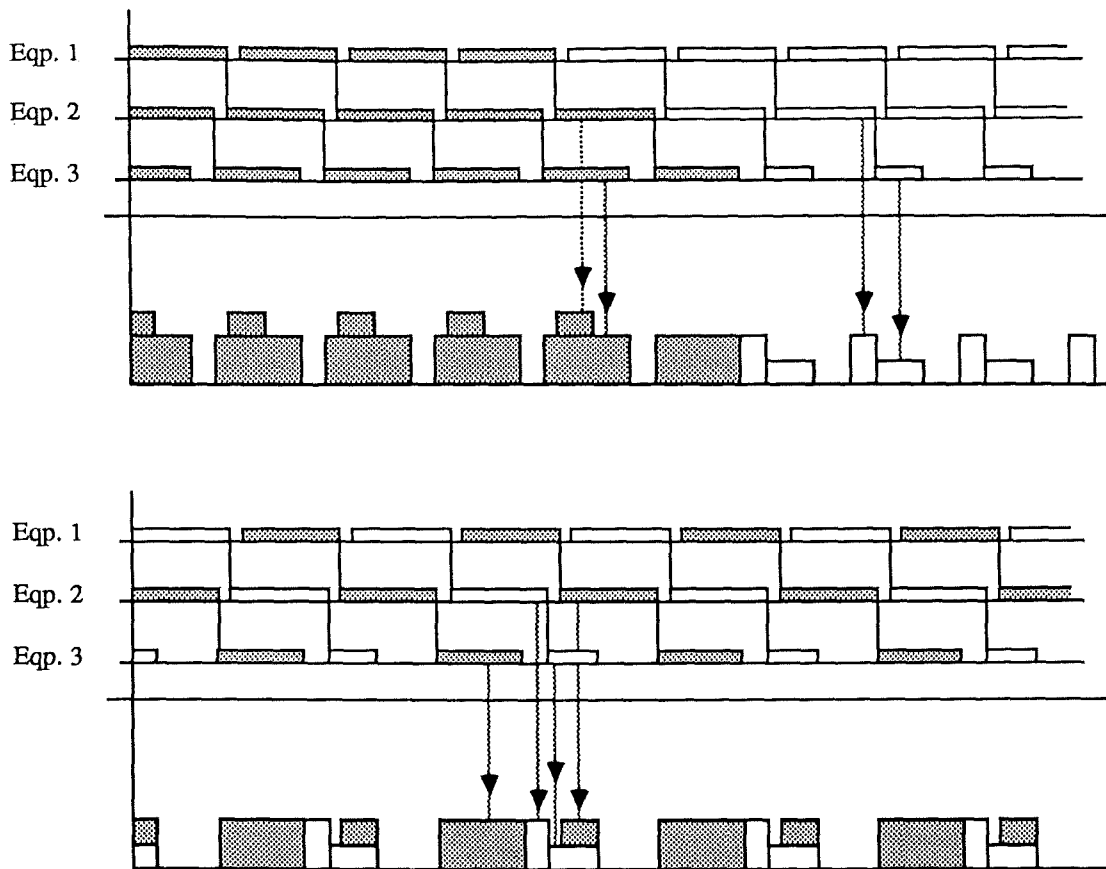
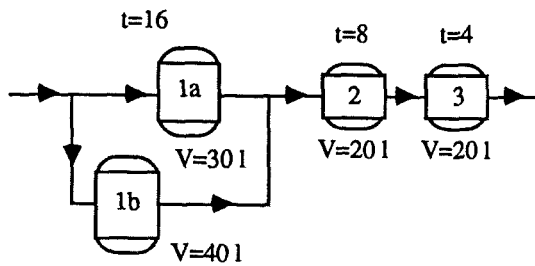


Figura 4.2. Mejora de la utilización de los servicios generales por combinación de lotes de diferentes productos.

El cálculo se interrumpirá al llegar a una situación cíclica en cuanto a la ocupación de los recursos de la planta, tanto compartidos (servicios generales) como específicos (equipos). En ese momento, los parámetros que reflejan el comportamiento de la planta (tiempos, función objetivo, etc.) podrán utilizarse para caracterizar la eficacia de la campaña, evitando las situaciones de mayor productividad que probablemente se producirán con los primeros lotes debido a que se parte de una situación de disponibilidad total de los equipos.

En el caso de las campañas multiproducto, después de la simulación se comparará la función objetivo correspondiente a dicha campaña en situación cíclica con la suma ponderada de funciones objetivo necesarias para obtener la misma producción a base de campañas de un solo producto, obteniendo de la relación entre ambos valores un parámetro que indicará la mejora obtenida mediante la secuencia analizada. La función objetivo de la campaña constituirá la base para determinar la asignación de campañas durante la obtención del plan inicial, por lo que el usuario podrá modificar los



Factores de tamaño (l/kg)

Producto	Tarea / Equipo		
	1	2	3
A	2,0	1,0	1,0
B	2,0	1,4	1,4

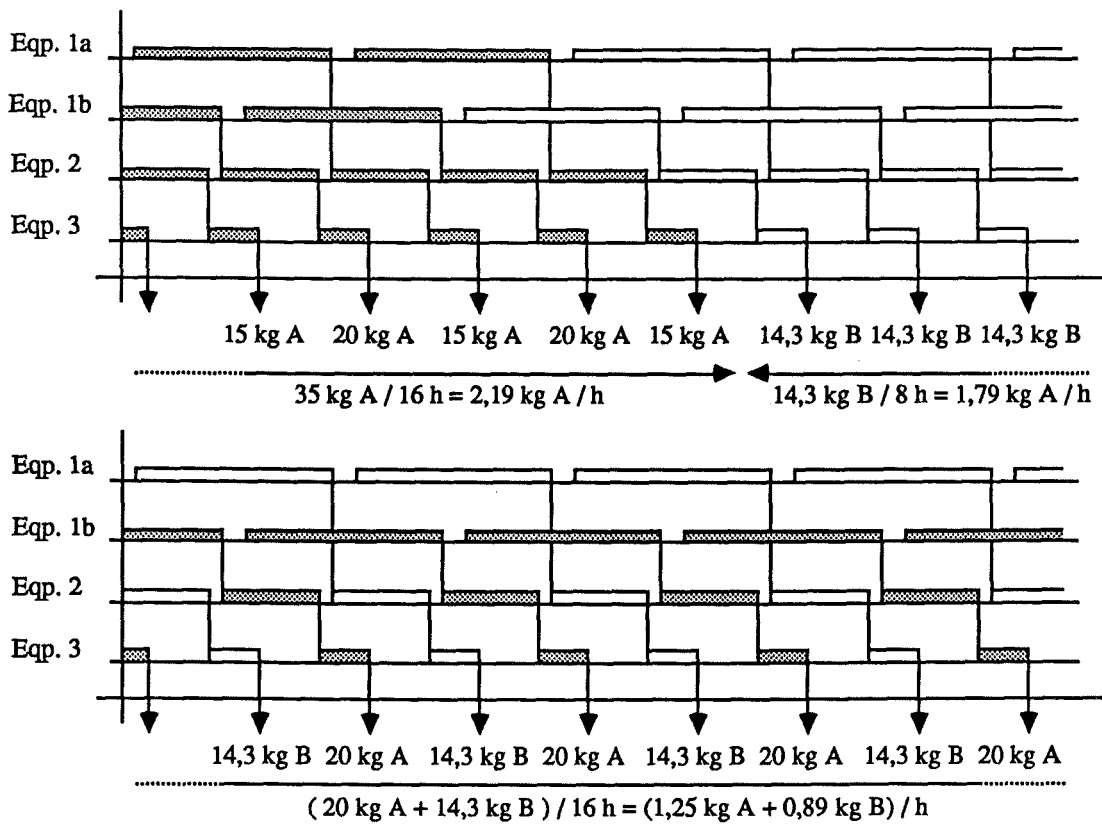


Figura 4.3. Mejora de productividad mediante campañas multiproducto por un mejor aprovechamiento de los equipos en paralelo.

criterios de planificación alterando estos valores, que presentan un significado intuitivo importante.

Selección de equipos: Uno de los principales problemas a resolver durante la generación y análisis de las campañas se presenta cuando se dispone de más de un equipo para la realización de una cierta tarea. En un caso multiproducto el número de alternativas suele ser muy reducido, ya que esta situación se planteará únicamente ante los diferentes equipos en paralelo disponibles en una cierta etapa. Para dar generalidad al proceso de decisión, y teniendo en cuenta la presencia de equipos no idénticos y que la campaña a analizar puede ser multiproducto, se ha optado por una evaluación de las todas las alternativas para colocar cada lote, utilizando la función objetivo. La decisión dependerá entonces de:

- El momento en el que queden disponibles los diferentes equipos alternativos.
- La historia del equipo, que puede llevar a mayores costes de preparación o limpieza.
- Los costes asociados a la utilización de un determinado equipo para una determinada tarea de un producto.
- El resto de factores incluidos en la función objetivo aplicables a la evaluación de campañas (por ejemplo, no tiene sentido considerar términos de dispersión o retrasos sobre plazos de entrega).

En algunos casos pueden utilizarse lotes de diferentes tamaños para el mismo producto, debido a la selección de diferentes equipos en paralelo no idénticos, o a la toma de diferentes decisiones en cuanto al número de equipos en paralelo en fase a utilizar.

Recursos compartidos: Otro de los aspectos considerados a este nivel de análisis ha sido el de la uniformidad en la utilización de los servicios generales. El procedimiento propuesto es el siguiente:

1. Se generan las campañas sin tener en cuenta las limitaciones en cuanto a disponibilidad de los servicios generales.
2. Se evalúan las correspondientes penalizaciones:
 - Por exceder el límite establecido.
 - Por irregularidad en el consumo.
 - Otras penalizaciones relacionadas, incluidas en la función objetivo.
3. Se identifica el servicio general que provoca más penalizaciones. Para este recurso, se identifica el máximo pico de consumo y las tareas y los lotes que lo provocan. Esta identificación puede ser modificada por el usuario.

4. Se calcula el retraso a introducir en la tarea afectada del lote posterior para desacoplar los requerimientos en los servicios generales.
5. Se aplica el retraso, se recalculan los perfiles de ocupación y los costes y se retorna al paso 2.

El procedimiento termina cuando ha analizado todos los picos correspondientes a solapamientos significativos, obteniéndose una lista con los retrasos aplicados y las funciones objetivos correspondientes. En principio se propondrá la mejor solución respecto a la función objetivo (que no tiene por qué coincidir con el mínimo solapamiento entre recursos), aunque el usuario puede modificar esta propuesta.

Cambios de campaña: Para estimar los costes de los diferentes cambios y poder determinar las mejores secuencias de campañas durante la planificación, después del último lote de cada campaña se simula la secuenciación del resto de campañas. La información obtenida se resume mediante la diferencia de valores de la función objetivo en cada caso y en el tiempo necesario para obtener el último lote de la campaña añadida respecto al tiempo necesario si la planta estuviese en la situación original.

Resultados: Al finalizar la etapa de generación de campañas se dispondrá de una lista de $c = 1, \dots, N_c$ campañas formadas por la sucesión de $1, \dots, N_l^c$ lotes de cada uno de los diferentes productos, y una lista de campañas multiproducto generadas en función de las mejoras de eficacia esperadas o de las indicaciones del usuario.

Para cada una de estas campañas se habrán generado una serie de parámetros necesarios para decidir su posterior incorporación al plan de producción:

- Beneficio esperado (función objetivo) medio por unidad de tiempo (*u.a./h*).
- Productividad media (*kg/h*) de cada producto en situación cíclica.
- Productividad máxima.
- Tiempo de ciclo medio en situación cíclica (para todos los lotes de la campaña).
- Tiempo necesario para obtener el primer lote al ser colocada después de cada una del resto de campañas.
- Información sobre los diferentes procesos de cambio de producto o de lote: tiempos de cambio y costes asociados.

Una vez realizados estos cálculos, solamente será necesario rehacerlos cuando se produzca algún cambio en las condiciones de trabajo, como la incorporación de nuevos equipos, la ampliación o reducción de personal, cambios en las recetas de los productos, cambios en los criterios a seguir en la utilización de recursos, etc.

4.7.2. Obtención de un plan inicial

Resumidas las características de cada una de las campañas a utilizar durante la producción mediante una función objetivo que refleja beneficio horario esperado, se pueden plantear procedimientos de optimización matemática para identificar un plan de producción inicial, a partir de modelos como el indicado en la sección 4.6. Sin embargo, los problemas comentados entonces subsisten, ya que el análisis de campañas habrá permitido identificar las mejores opciones, pero no es significativo del comportamiento de la planta en condiciones reales de mercado. Por ello se propone un procedimiento aproximado que se basa en la incorporación sucesiva de las campañas más eficientes a un plan maestro de producción según los siguientes pasos:

- A partir del último periodo a medio plazo Nmp y sucesivamente para cada periodo hasta llegar al primero:
 1. Identificar las demandas pendientes y sus prioridades, en función de las cantidades previstas (más eventualmente las cantidades que habían quedado pendientes en periodos posteriores) los costes de almacenaje y los costes de retrasos.
 2. Identificar la mejor campaña a introducir. Para ello a cada campaña se le asignará un valor en función de:
 - El tiempo requerido por la campaña, teniendo en cuenta el final de la campaña anterior y los tiempos de cambio de campaña calculados. Si el tiempo necesario excede el límite de tiempo disponible, la campaña quedará descartada.
 - La cantidad de producto cubierta, las prioridades calculadas anteriormente y el incremento de función objetivo de la campaña teniendo en cuenta la campaña anterior.

Si no hay ningún candidato, cambiar de periodo.

3. Simular la ocupación de recursos necesaria para introducir dicha campaña, considerando únicamente las esperas necesarias para cumplir las restricciones de utilización de servicios generales y de transferencia de materia entre equipos. En el caso de plantearse la utilización de equipos alternativos se seguirán las mismas reglas indicadas para el análisis de campañas.
4. Recalcular la función objetivo del plan resultante y comparar la modificación obtenida con la modificación esperada en los diferentes factores de acuerdo con lo calculado en el análisis de campañas.

Si la diferencia indica unos resultados mucho peores a lo esperado y existen otras campañas candidatas, identificar otra campaña y volver al paso 3.

Continuar a partir del plan que ha obtenido una mejor función objetivo.

5. Mientras quede demanda pendiente, volver al paso 1. En caso contrario, cambiar de periodo.

- Repetir las operaciones anteriores comenzando por el primer periodo hasta el periodo Nmp , utilizando como demanda D_{it}^* la producción calculada para ese periodo en el primer paso más la cantidad pendiente de periodos anteriores (en el primer periodo, se utilizará la cantidad que finalmente no ha sido cubierta en el primer paso).

El procedimiento tal como se ha expuesto asume que:

- Las principales fuentes de penalización son los desajustes entre la producción y la demanda y los cambios de producto.
- No hay variaciones periódicas en la disponibilidad de los recursos. Si existen, pero el número de situaciones de disponibilidad identificadas es relativamente pequeño (es el caso típico de trabajo por turnos, o la situación que se puede plantear un fin de semana), puede ser adecuado generar diferentes conjuntos de campañas para cada situación de disponibilidad e identificar en cada momento la situación existente.
- El coste de un retraso es superior al coste de almacenaje por un periodo equivalente. En caso contrario, la secuencia de análisis de los periodos en los que se ha dividido el horizonte de tiempo debería invertirse.

4.7.3. Mejora del plan

A partir de un determinado plan inicial, se plantea aplicar procedimientos de búsqueda que permitan mejorar dicho plan de acuerdo con los aspectos que quedan penalizados a través de la función objetivo.

Para ello, se determina un mecanismo elemental de búsqueda y selección, que constituirá el *paso* básico del sistema de optimización, y un procedimiento que relacione los diferentes *pasos*.

Cada *paso* del proceso de optimización se divide en las siguientes fases:

1. Análisis del plan de producción de partida, para identificar los aspectos que inciden negativamente en la función objetivo.
2. Determinación del problema a tratar, de acuerdo con los resultados del análisis anterior y el estado global de la optimización.
3. Identificación y evaluación de situaciones alternativas que solventen el problema.
4. Propuesta de las mejores situaciones identificadas.

Por su parte, los diferentes *pasos* de optimización quedan enlazados a través de un sistema de gestión que:

1. Identifica los aspectos más negativos del plan de acuerdo con la función objetivo.
2. Identifica los resultados obtenidos en los *pasos* anteriores.
3. Determina las características del siguiente *paso*, de acuerdo con las conclusiones de los procesos de identificación anteriores.

Para adaptar este mecanismo general al modelo de planta indicado anteriormente se requiere identificar:

- El tipo de decisiones que se pueden tomar para resolver situaciones conflictivas. Para el modelo que se ha propuesto, y en función del aspecto que se pretenda mejorar, se pueden proponer decisiones que afecten a:
 - Cambios en la secuencia de lotes: A través de estas decisiones se podrán resolver penalizaciones referentes a retrasos, adelantos, cambios de producto, etc., por lo que constituirán la herramienta básica de optimización.
 - Cambios en la asignación de equipos, cuando existan equipos en paralelo. Como consecuencia de uno de estos cambios pueden obtenerse mejoras en los tiempos y penalizaciones referentes a cambios de productos y también pueden modificarse los tamaños de los lotes afectados.
 - Cambios en los tiempos de espera entre tareas o al inicio de cada lote. Mediante estos cambios se podrán resolver situaciones conflictivas respecto a la utilización de servicios generales.
- La forma de evaluar las consecuencias de cada decisión: aunque para evaluar algunos cambios (por ejemplo, los cambios secuencia de lotes) se podrán utilizar los resultados obtenidos durante la generación de campañas, cualquiera de los cambios citados en el punto anterior puede implicar modificaciones en múltiples términos de la función objetivo, y en la mayoría de las situaciones será muy difícil obtener un modelo que permita estimar previamente sus efectos, especialmente por lo que respecta a la utilización de los servicios generales. De todas formas, con los procedimientos de cálculo actuales siempre será posible recurrir a la simulación del plan de producción.
- El sistema de gestión: como se ha comprobado en muchos estudios de optimización por procedimientos heurísticos, mediante un sistema que se limite a conservar la mejor solución detectada es posible conseguir una solución aceptable en poco tiempo. Sin embargo, en problemas combinatorios de secuenciación y planificación como el que se está analizando, la introducción de procedimientos que generen múltiples niveles de resultados y que permitan seguir analizando resultados intermedios de baja eficacia, aún a costa de mayores tiempos de cálculo, permite obtener mejoras importantes en cuanto a la solución final obtenida. La mayor o menor apertura de este árbol de resultados intermedios depende de la complejidad del problema y del tiempo de cálculo que se considere razonable para obtener una solución.

En la sección 4.12 se comenta de forma más detallada la aplicación sobre un caso industrial.

4.8. Planificación con almacenaje intermedio

Al analizar el funcionamiento de eventuales equipos de almacenaje intermedio en una planta multiproducto formada por varias etapas de producción, pueden distinguirse básicamente dos situaciones¹⁵:

1. Cada equipo puede mantener almacenado únicamente un lote de producto en cada momento, por lo que su función consiste en liberar equipos de proceso para que puedan ser utilizados en la fabricación de lotes posteriores (figura 2.8).
2. El equipo de almacenaje tiene capacidad para más de un lote de producto, por lo que permite desacoplar diferentes zonas de la planta, al mezclarse o separarse lotes sucesivos.

En ambos casos, el modelo utilizado y el sistema de planificación descritos en las secciones anteriores permiten fácilmente contemplar los efectos derivados de la presencia de uno o varios equipos de almacenaje en la red de proceso:

1. Si la función básica consiste en permitir la descarga de un equipo antes de que el equipo siguiente esté listo, basta con incorporar un nuevo modelo de tarea similar al utilizado para las etapas discontinuas pero donde el tiempo de proceso sea nulo, identificando el tiempo de almacenaje con el tiempo de espera definido anteriormente, que se calculará en cada momento en función de la disponibilidad de equipos para realizar la tarea siguiente. Evidentemente, el sistema debe ser capaz de reconocer cuándo no es necesario realizar el almacenaje, ya que en caso contrario se contabilizarían los tiempos de carga y descarga y los de eventuales procesos de preparación y limpieza del equipo de almacenaje.

De esta forma se pueden simular situaciones complejas, imponiendo tiempos máximos de almacenaje, capacidad de almacenaje restringida, etc., siempre que la localización de los equipos de almacenaje dentro de la secuencia de etapas esté definida. En caso contrario, será necesario introducir un procedimiento adicional que permita decidir la mejor utilización de los equipos de almacenaje presentes¹⁶. En [107] se identifican y comparan varias estrategias que permiten dar una solución adecuada a esta situación (el planteamiento riguroso del problema conduce de nuevo a una optimización no lineal entera).

¹⁵En la sección 3.7.1 se han mencionado otras posibles funciones de los equipos de almacenaje que no afectan a las decisiones de planificación de la producción.

¹⁶Como se ha indicado en la sección 3.7.1, esta situación no entra en los límites de la definición del caso multiproducto.

2. Si los depósitos de almacenaje permiten acumular más de un lote de producto, en los puntos en los que se encuentre un equipo de este tipo será posible modificar el tamaño de lote, y se deberán considerar, como en la sección 3.7.7, diferentes tamaños de lote y tiempos de ciclo, en función de la zona donde se encuentre el equipo considerado. Ello obliga a introducir diversos cambios en el funcionamiento del proceso de planificación de un periodo a corto plazo en varias etapas descrito anteriormente:

(a) Se debe crear un sistema de gestión que coordine el proceso de producción en las diferentes zonas: la planificación de un lote de producto en una zona no podrá comenzar hasta que el depósito de almacenaje con el que se inicia esta zona contenga material suficiente para ello, y se haya calculado que en el depósito final existirá capacidad suficiente para recoger el producto intermedio formado cuando finalice el subproceso de esta zona.

(b) Antes de realizar un cambio de producto, se debe comprobar que todo el material intermedio almacenado correspondiente al producto en curso podrá ser tratado antes de que el nuevo producto a procesar requiera la utilización del equipo de almacenaje correspondiente, y antes también de que expire el tiempo máximo de almacenaje. De no cumplirse estos requisitos, se deberán revisar las cantidades asignadas a cada lote del producto en curso de forma que, sin exceder las capacidades máximas de los equipos, al final de la campaña se hayan compensado las diferentes capacidades de cada zona y los equipos de almacenaje queden libres.

Alternativamente, el material puede eliminarse como desperdicio. Penalizando adecuadamente esta posibilidad, puede ser el sistema de optimización el que decida en cada caso, especialmente frente a incidencias que requieran una actuación inmediata (llegada de nuevos pedidos, averías de equipos, etc.).

(c) Al realizar esta revisión se deberán modificar también las variables de seguimiento de la producción (niveles de inventario, tiempos, etc.). Dado que normalmente el tamaño de lote adoptado en cada zona es el máximo admisible por los equipos correspondientes, el proceso suele llevar a disminuciones en las cantidades globales procesadas y a aumentos en la disponibilidad de los equipos. Por tanto una vez realizada la revisión, el sistema de planificación deberá a su vez revisar el cambio de producto inicialmente propuesto, para introducir más lotes del producto en curso o para proponer otro cambio que en la situación revisada puede ser más eficiente.

(d) Todo ello lleva a modificar diferentes variables y estructuras de cálculo, de acuerdo con la nueva configuración de la planta. Por ejemplo, como se deduce del punto 2(b), en cada lote de cada zona se podrá procesar una cantidad diferente de producto intermedio, dentro de los límites de capacidad fijados por los tamaños de los equipos correspondientes.

(e) Adicionalmente, se deben introducir comprobaciones para evitar que el

material permanezca almacenado más tiempo del admisible según los datos suministrados al sistema.

De la necesidad de dejar los depósitos de almacenaje intermedio vacíos antes de un cambio de producto se derivan dos conclusiones prácticas a tener en cuenta durante el análisis de campañas:

- Los resultados de productividad serán diferentes al analizar diferentes “puntos de parada”, debido al ajuste de tamaños de lote, como se puede comprobar fácilmente observando la figura 4.4.

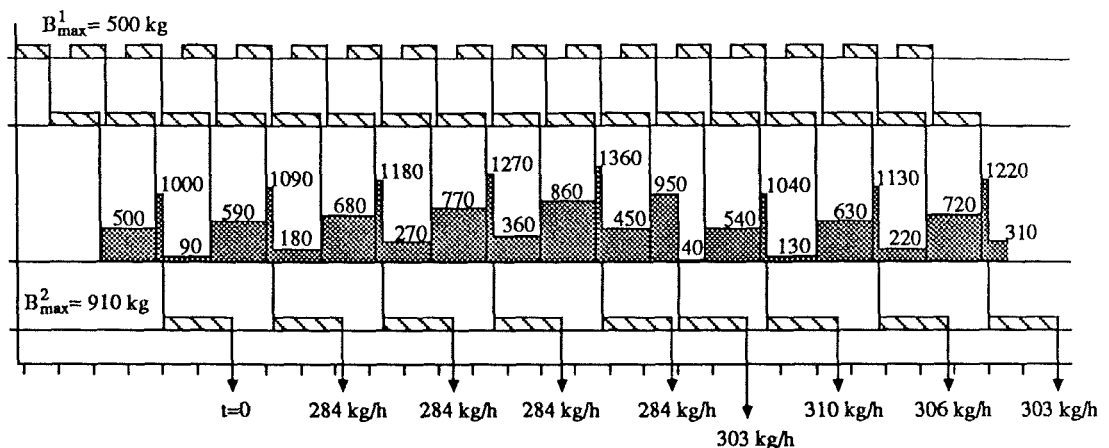


Figura 4.4. Evolución de la cantidad almacenada en el depósito en diferentes “puntos de parada” y de la productividad correspondiente.

- Suele ser muy difícil conseguir aumentos de productividad a través de campañas multiproducto. Evidentemente, una posibilidad de aprovechar eventuales diferencias de tiempos de proceso consiste en introducir varios equipos de almacenaje en un mismo punto, para dedicar cada uno de ellos a un producto diferente. Sin embargo, esta estrategia aumenta las posibilidades de errores en la operación, por lo que suele ser descartada desde el punto de vista práctico, a menos que el almacenaje sea “a largo plazo”.

4.9. Modificaciones manuales sobre el plan

Al plantear la resolución de problemas industriales resulta imprescindible introducir procedimientos manuales que permitan la modificación de las decisiones tomadas por el sistema de optimización, ya que:

- Normalmente no será factible manejar toda la información que realmente sería deseable considerar.

- Al recurrir a procedimientos aproximados, el sistema de optimización puede llegar a descartar soluciones que mejorarían el plan.
- Durante la utilización sistemática de procedimientos de planificación se pueden presentar situaciones excepcionales que requieren un tratamiento específico.

Por tanto, para que los algoritmos de planificación puedan aplicarse en la práctica, deben combinar procedimientos sistemáticos de cálculo con mecanismos que permitan la intervención del usuario en la toma de decisiones. Esta necesidad ya había sido identificada en algunos estudios sobre sistemas de planificación de la producción. Por ejemplo:

- Janicke [37], después de proponer un sistema de cálculo heurístico que permite obtener los detalles de un plan de producción a partir de una secuencia de operaciones dada, sugiere procedimientos para proponer la secuencia de operaciones e indica que la intervención del operador es fundamental para obtener una solución correcta del problema.
- Wiede [107] describe el desarrollo de un sistema de planificación de la producción interactivo aplicable a redes de proceso multiproducto sin equipos en paralelo. Una vez el usuario ha determinado la secuencia de producción, el sistema calcula los tiempos de ocupación en cada equipo y la asignación más adecuada de los tanques de almacenaje intermedio existentes, en función de los tiempos de proceso, de la política de almacenaje intermedio aplicable a cada proceso de transferencia y de una serie de reglas heurísticas desarrolladas para este tipo de situaciones. Estos procedimientos se pueden aplicar también sistemáticamente, de manera que, en función de un criterio de eficacia, se llegue a identificar la mejor secuencia generada. El autor propone el uso de procedimientos heurísticos y de bifurcación y acotación para generar diferentes secuencias, obteniendo resultados satisfactorios utilizando diversos criterios de eficacia, como el tiempo total de proceso o la penalización por retrasos sobre las fechas de entrega.

Dicha sistemática es también aplicable al caso de redes compuestas por una única etapa y varios equipos en paralelo, utilizando otras heurísticas para localizar las soluciones más adecuadas.

- Como ya se ha comentado (sección 4.4.4), Musier y Evans [63] destacan la importancia de disponer de un sistema flexible que permita introducir al usuario cualquier tipo de restricción o modificación adicional sobre el proceso de optimización y que disponga de procedimientos de información sofisticados, imprescindibles para realizar estas modificaciones adecuadamente.

Para que la intervención del usuario sea eficaz, debe apoyarse en un sistema de información (normalmente gráfico) que permita identificar claramente las condiciones de trabajo que se derivarán de la aplicación de un determinado plan de producción. Por tanto, será necesario desarrollar un modelo lo más detallado posible del comportamiento de la planta desde el punto de vista de planificación. Dado que, en la mayoría de

los casos industriales, muchas características de la forma de organizar el trabajo y de las restricciones aplicables serán específicas de la propia empresa y, por tanto, difícilmente repetibles, el desarrollo de este modelo, que deberá adaptarse a estas condiciones de trabajo, implicará un esfuerzo de programación importante.

La disponibilidad de herramientas de desarrollo de *software* apropiadas (lenguajes de simulación, programación orientada a objetos, herramientas CASE, sistemas de desarrollo de aplicaciones gráficas (GUI), etc.) ha permitido reducir el esfuerzo y el coste que implica la creación de estos modelos de planificación.

El desarrollo de programas de ordenador que incluyan el modelo de la planta y las herramientas para introducir modificaciones manuales sobre un plan de producción debe realizarse durante la primera fase del proceso de implantación de un sistema de planificación de la producción en una situación industrial. Además de su utilización en las situaciones citadas al inicio de esta sección (que, por sí solas, ya justifican la presencia de estos programas), durante desarrollo y adaptación del sistema de planificación propiamente dicho, estos programas permitirán o facilitarán:

- La verificación de las hipótesis y simplificaciones realizadas en el modelo de planificación.
- El desarrollo de una función objetivo que refleje la política de producción acordada entre los diferentes departamentos de la empresa.
- La comprobación de los sistemas de comunicación previstos entre las diferentes fuentes de información y/o con el usuario final.
- La iniciación del usuario final en la utilización de este tipo de herramientas.

La implantación, comprobación y utilización sistemática de estos programas antes de proceder al desarrollo de procedimientos de planificación de la producción o de optimización de la misma facilitará la detección de eventuales deficiencias en las especificaciones del problema, en los mecanismos de comunicación previstos, en la información a manejar, en la función objetivo, etc., deficiencias que, de descubrirse posteriormente, tendrían unas consecuencias mucho más costosas y que podrían incluso llegar a hacer fracasar la implantación global de los procedimientos de planificación previstos.

4.10. Actualización del plan

Una planta multiproducto en operación discontinua constituye un sistema dinámico, no solo desde el punto de vista de las tareas, sino también debido a que el entorno de fabricación va cambiando a lo largo del tiempo. Un problema importante que debe resolver cualquier sistema de planificación es el de la adaptación de un plan de producción ya existente, calculado para unas determinadas condiciones, a otras circunstancias de fabricación y/o de mercado. Este aspecto está siendo cada vez más

estudiado, en la medida de que las tecnologías que se engloban bajo el concepto de "fabricación integrada por ordenador" (CIM) están comenzando a aplicarse a cada vez mayor número de industrias de proceso.

Al plantear esta situación, tanto los objetivos del problema como el modelo de la planta deben modificarse respecto a los que se han descrito hasta el momento:

- Es poco probable que el plan previsto se haya cumplido de forma rigurosa hasta el instante en el que se plantea la revisión, debido a la influencia de factores que, o bien no estaban previstos en el modelo, o bien presentaban un cierto grado de incertidumbre en el momento de realizar el plan, y su evolución esperada no ha coincidido con la real. Por tanto, se deberán tomar una serie de decisiones que permitan reconciliar la situación prevista de la planta con la situación real, evitando el crecimiento de estas desviaciones. Estas decisiones afectarán a las condiciones de resolución del nuevo problema de planificación.
- La situación de disponibilidad de un determinado equipo depende tanto de la tarea que está realizando en el momento de rehacer el plan, como de la posibilidad de interrumpir o modificar las tareas que, según el plan previsto, debería realizar a continuación.
- El punto anterior es especialmente importante si ha comenzado alguna de las tareas del lote pero, en cualquier caso, todo cambio no imprescindible sobre un plan de producción ya establecido suele tener repercusiones negativas en el funcionamiento del proceso, debido a factores técnicos y humanos difíciles de analizar y cuantificar (necesidad de propagación de la nueva información y de establecer un tiempo de reacción, aumento de la probabilidad de errores de operación, etc.).

Por todo ello, al revisar la parte no ejecutada del plan deberán incorporarse restricciones y/o términos en la función objetivo que reflejen el estado actual de la planta y la existencia de un plan anterior, para evitar soluciones que impliquen cambios radicales sobre la situación ya existente.

Para reconducir el estado de la planta hacia el cumplimiento de los objetivos globales de producción, normalmente se parte del plan inicial y se plantean diferentes posibilidades de actuación en diferentes momentos del proceso productivo, las cuales a su vez dependen de decisiones tomadas anteriormente, por lo que se acaban planteando muchos conjuntos de actuaciones encadenadas que se pueden estructurar en forma de árbol de decisiones.

Dentro del ámbito de la industria química de proceso discontinuo se pueden encontrar algunos intentos de resolver este tipo de situaciones. Debido a limitaciones de capacidad de cálculo y a las dificultades de programación que aparecen al intentar dar respuesta a situaciones imprevistas, todos ellos proponen la utilización de sistemas

heurísticos, basados en reglas de actuación procedentes de la experiencia y que, en todo caso, realizan una previsión de las consecuencias que tendrían ciertas actuaciones para aceptarlas o descartarlas. Las reglas heurísticas se utilizan tanto para generar las diferentes posibilidades de actuación, como para evitar el crecimiento exponencial del número de combinaciones que se contemplan.

- Algunos estudios describen estrategias para minimizar el impacto de diferentes incidencias sobre la productividad de la planta sin afectar al plan de producción establecido:
 - Normalmente, las desviaciones sobre el plan previsto son debidas a retrasos o adelantos en la realización de determinadas tareas. En ocasiones es posible absorber estas desviaciones modificando los tiempos de proceso de tareas posteriores dentro del mismo lote, o de tareas de lotes posteriores [67]. Sin embargo, la aplicación de esta estrategia queda restringida a casos muy concretos (por ejemplo, pequeñas desviaciones en los tiempos de proceso), dado que las posibilidades de modificar los tiempos de operación sin afectar de forma significativa a la productividad o a la calidad del producto final suelen ser muy limitadas.
 - Otra posibilidad consiste en introducir equipos de almacenaje intermedio para compensar los efectos de variaciones en los tiempos de operación dentro del proceso. Existen diferentes estudios para determinar las dimensiones más adecuadas del equipo de almacenaje, en función de las características del proceso y de la variabilidad esperada en las condiciones de operación, como los ya citados [42] y [43].
- Una de las primeras aproximaciones que consideran el impacto de una incidencia en el resto del plan se debe a Cott y Macchietto [12] que, dado un plan de producción, proponen una forma de recalcular los tiempos de inicio de las tareas que todavía no se han realizado en función de las variaciones observadas en los tiempos de proceso. En la estrategia no están previstas modificaciones en las asignaciones ni en la secuenciación de productos establecidas en el plan original, evitándose entrar en la problemática de la posible aparición de situaciones conflictivas en cuanto a transferencia de materiales.

En posteriores estudios [13, 14], estos mismos autores amplían estos procedimientos para considerar diferentes políticas de almacenaje (incluyendo la presencia de productos inestables) y limitaciones en la disponibilidad de los equipos y de recursos compartidos, pero en todo caso, el criterio para la toma de decisiones solamente contempla tiempos totales de proceso (*makespan*), cuando en situaciones industriales existen otros condicionamientos comerciales.

- Reklaitis [84] menciona dos tipos de estrategias para realizar la actualización:
 - El horizonte móvil (del inglés *Rolling Horizon*), que consiste en replantear de nuevo la planificación a largo plazo cada vez que la desviación entre las

previsiones y la evolución real de las variables lo hace necesario, considerando entonces la nueva situación de disponibilidad de los equipos. Los cambios sobre el plan inicial serán los necesarios para mantener los objetivos globales, minimizando la función de coste correspondiente. Esta situación puede dar lugar a repetidos cambios en la asignación y secuenciación de tareas que, como ya se ha indicado, suelen ser perjudiciales.

- La secuenciación reactiva (del inglés *Reactive Scheduling*), donde se parte del plan existente como punto inicial del proceso de optimización, se plantean penalizaciones que reflejan la conveniencia de continuar con el plan original y se incorpora la nueva situación de mercado y de planta. El plan de producción queda modificado como “reacción” a los diferentes cambios sucedidos en las condiciones de fabricación sólo si los beneficios obtenidos superan a las penalizaciones establecidas. En este caso se pueden caracterizar distintos tipos de “reacciones” para responder a diferentes cambios, con lo que el sistema puede adaptarse a situaciones muy variadas.
- Las estrategias de *reactive scheduling* parecen las más adecuadas a la mayoría de los casos. Kanakamedala y colaboradores [39] proponen una de estas heurísticas, que identifican con el nombre de “heurística de impacto mínimo”. Para minimizar el impacto de los cambios propuestos sobre el plan inicialmente previsto, la estrategia indicada por los autores intenta responder a las diferentes incidencias mediante adelantos o retrasos en los tiempos previstos; solamente cuando este procedimiento es insuficiente para absorber los efectos de una incidencia dentro del mismo ciclo de producción, se analizan los efectos de eventuales modificaciones en las decisiones de asignación, manteniendo la secuencia de entrada de lotes de productos en la red de proceso inalterada e intentando minimizar el impacto de estas decisiones sobre lotes posteriores. Este tipo de estrategias son especialmente útiles cuando las desviaciones sobre el plan previsto son importantes, debido por ejemplo a averías en los equipos o a cambios en la situación de demanda.

Los autores comparan los resultados de esta estrategia frente a otra heurística que, manteniendo la secuencia original de operaciones, asigna cada tarea al equipo que, después de evaluar los efectos de la desviación, tiene previsto finalizar antes las tareas ya comenzadas, respetando las restricciones de asignación existentes. Este procedimiento suele ser el recurso utilizado intuitivamente por los operarios de una planta al enfrentarse a situaciones no previstas. Sin embargo, la utilización del primer equipo disponible no siempre es lo más adecuado, ni siquiera bajo objetivos de minimización del tiempo total de proceso, por lo que si el objetivo es reducir los efectos de eventuales desviaciones sobre el plan de producción previsto, los resultados de esta estrategia serán deficientes, ya que cualquier desviación se propagará fácilmente a lotes posteriores.

- En muchas situaciones industriales se desea integrar las dos estrategias anteriormente descritas a través de un plan maestro global que asegura una cierta

continuidad entre los diferentes planes de producción elaborados bajo una estrategia de *rolling horizon*. En caso de no poder cubrir los objetivos indicados en el plan maestro, éste podrá ser modificado a través de estrategias dirigidas (*reactive scheduling*). Cuanto mayor grado de detalle se especifique a través del plan maestro, menor será la variabilidad entre planes sucesivos, pero con mayor frecuencia será necesaria la modificación de dicho plan maestro.

Debido a las mismas dificultades comentadas en la sección 4.5, es difícil conseguir un sistema asistido por ordenador realmente operativo basado en este tipo de estrategias.

La introducción de estos nuevos conceptos en la función objetivo y/o restricciones adicionales incrementa enormemente la complejidad matemática del problema, por lo que para resolverlo no se ha descrito hasta el momento ningún procedimiento de programación matemática que permita tratar eficazmente estas situaciones y que sea aplicable sobre casos industriales.

Por el contrario, la extensión de los procedimientos de planificación propuestos a lo largo de este capítulo para contemplar este tipo de situaciones es inmediata, tanto si se trata de una concepción de tipo *reactive scheduling* como de *rolling horizon*.

La aplicación de sistemas de actualización del plan de producción en situaciones industriales se simplifica después de realizar las siguientes consideraciones:

- En las líneas de fabricación solamente se dispone de una información muy restringida del plan, a través de una serie de órdenes de fabricación que reflejan únicamente los primeros momentos de dicho plan. En función de la complejidad de la planta y de las recetas, de los tiempos de proceso y de la automatización en la transferencia de información, puede haber una cola de órdenes de fabricación no iniciadas que represente entre varias horas y varias semanas de fabricación. Cuando la cola disminuye, se generan nuevas órdenes de fabricación. Evidentemente también existirán una serie de órdenes de fabricación en curso.
- Una vez ha comenzado la producción de un lote, aunque aparezcan circunstancias imprevistas (aparición de pedidos más urgentes, o incluso modificaciones del pedido por parte del cliente o problemas de calidad) suele ser más adecuado finalizar dicho lote (y tratar de sacar posteriormente el mayor partido posible de producto) que interrumpirlo (y perder la materia prima y los recursos invertidos hasta el momento en el que aparecieron dichas circunstancias).
- Aunque pueden existir operaciones de preparación no incluidas en el modelo de planificación¹⁷, los tiempos correspondientes serán conocidos y normalmente dependerán poco del producto concreto (en una planta multiproducto, las recetas son muy parecidas), por lo que en cada momento es relativamente sencillo deducir

¹⁷Siempre que no sean tareas limitantes, estas simplificaciones reducen el esfuerzo de cálculo sin afectar a la calidad de la solución.

qué lotes ya han comenzado a prepararse. En todo caso, siempre se puede introducir esta información a través de los sistemas de seguimiento de la producción o de forma manual.

- Cuando un recurso deja de estar disponible de forma inesperada, se pueden plantear dos situaciones:
 - Si se trata de una incidencia de poca duración que no afecta de forma importante a la ejecución del plan, lo mejor es no considerar posibles efectos sobre asignación y secuenciación de tareas, desplazando en el tiempo las tareas afectadas de forma que se asegure la viabilidad del plan resultante.
 - Si la duración del problema es importante, se deberá revisar la asignación de las tareas que originalmente utilizaban dicho recurso durante el tiempo. En la mayor parte de los casos será difícil estimar la duración del problema. A este respecto, siempre será mejor tomar aproximaciones pesimistas para evitar nuevas revisiones del plan.
- La revisión del plan cada vez que se modifican las condiciones de trabajo sin tener en cuenta el plan inicial (*rolling horizon*) es de hecho un caso particular de *reactive scheduling* en el que no se han introducido restricciones ni valoraciones referentes al plan anterior. Por tanto, la solución bajo condiciones de *rolling horizon* serán superiores en cuanto a utilización de los recursos de producción.
- La estrategia a aplicar depende en gran medida del grado de automatización de la empresa: cuanto mayor sea éste, más fácilmente se podrán introducir cambios y por tanto, menor será el peso de las restricciones adicionales a aplicar en un eventual *reactive scheduling*.

La estrategia adoptada en las aplicaciones industriales del procedimiento de planificación descrito ha sido, en líneas generales, la siguiente:

1. Impedir cambios de asignación o secuencia de lotes que hayan comenzado a fabricarse, incluso aunque no estuvieran previstos en el plan inicial. En estos casos únicamente se permiten traslados en el tiempo para asegurar la viabilidad del plan de producción previsto, con la misma estrategia propuesta en por Cott y Macchietto[12].

En caso de que alguno de los equipos previamente asignados no estuviera disponible, calcular el grado de desocupación de los equipos alternativos, y utilizar el que presente mayor grado de desocupación. Para calcular esta desocupación se ponderará el tiempo que están sin utilización y el tiempo que están en espera, dando mayor peso a los momentos más cercanos. De no existir alternativas, evidentemente la única solución será interrumpir el lote hasta que el equipo afectado por la incidencia vuelva a estar disponible.

2. Penalizar los cambios de asignación o secuencia en lotes para los que ya se hayan cursado las órdenes de fabricación correspondientes y que, por tanto, queden fuera del control inmediato del departamento de planificación.
3. Permitir la replanificación de todos aquellos pedidos que no se hayan traducido en órdenes de fabricación específicas, sin restricciones ni penalizaciones.
4. Controlar los cambios en el plan a través de las herramientas de gestión manual. Para ello suele ser de necesario disponer de información sobre:
 - (a) Las modificaciones efectuadas sobre el plan por aplicación de la regla 2, para que el usuario pueda revisarlas.
 - (b) El plan que hubiera resultado sin aplicar las reglas 1 y 2 (equivalente a una estrategia de *rolling horizon*).

4.11. Fabricación integrada por ordenador (CIM)

La implantación de un sistema de planificación de la producción asistido por ordenador forma parte habitualmente de un proceso global de automatización en la toma de decisiones. Este proceso suele comenzar con la introducción de sistemas de regulación y control a nivel de equipos, y su objetivo a largo plazo es la integración de todos los aspectos relacionados con la fabricación en un único sistema que, estableciendo un canal de información entre todos los departamentos de la empresa y aprovechando la capacidad de cálculo de un ordenador o de una red de ordenadores, tenga en cuenta toda la información disponible para la toma de decisiones relacionadas con el proceso de fabricación y consiga de este modo mejoras productivas, incrementando el grado de eficiencia en la utilización de los recursos disponibles en cada momento y mejorando la respuesta de la planta a la situación real del entorno (CIM: *Computer Integrated Manufacturing*). La implementación de esta estrategia se suele centrar en un sistema de base de datos alrededor del cual se van articulando diferentes procedimientos que permiten sistematizar y mejorar aspectos específicos de gestión, regulación y control relacionados con la fabricación. Un posible esquema del flujo de información que corresponde a esta estrategia se muestra en la figura 4.5.

Mediante la implantación estas herramientas se pueden conseguir diversas mejoras en la producción, facilitando los procesos de unificación de criterios y el acceso a la información. Entre estas potenciales mejoras destacan:

- Reducción de los costes de operación:
 - Por un lado, el sistema de información permite automatizar muchas de las operaciones de control, o en todo caso centralizar la toma de decisiones, con lo que se reduce la necesidad de mano de obra (a costa, evidentemente, de unas inversiones notables en equipos de medida, control y transmisión de la información).

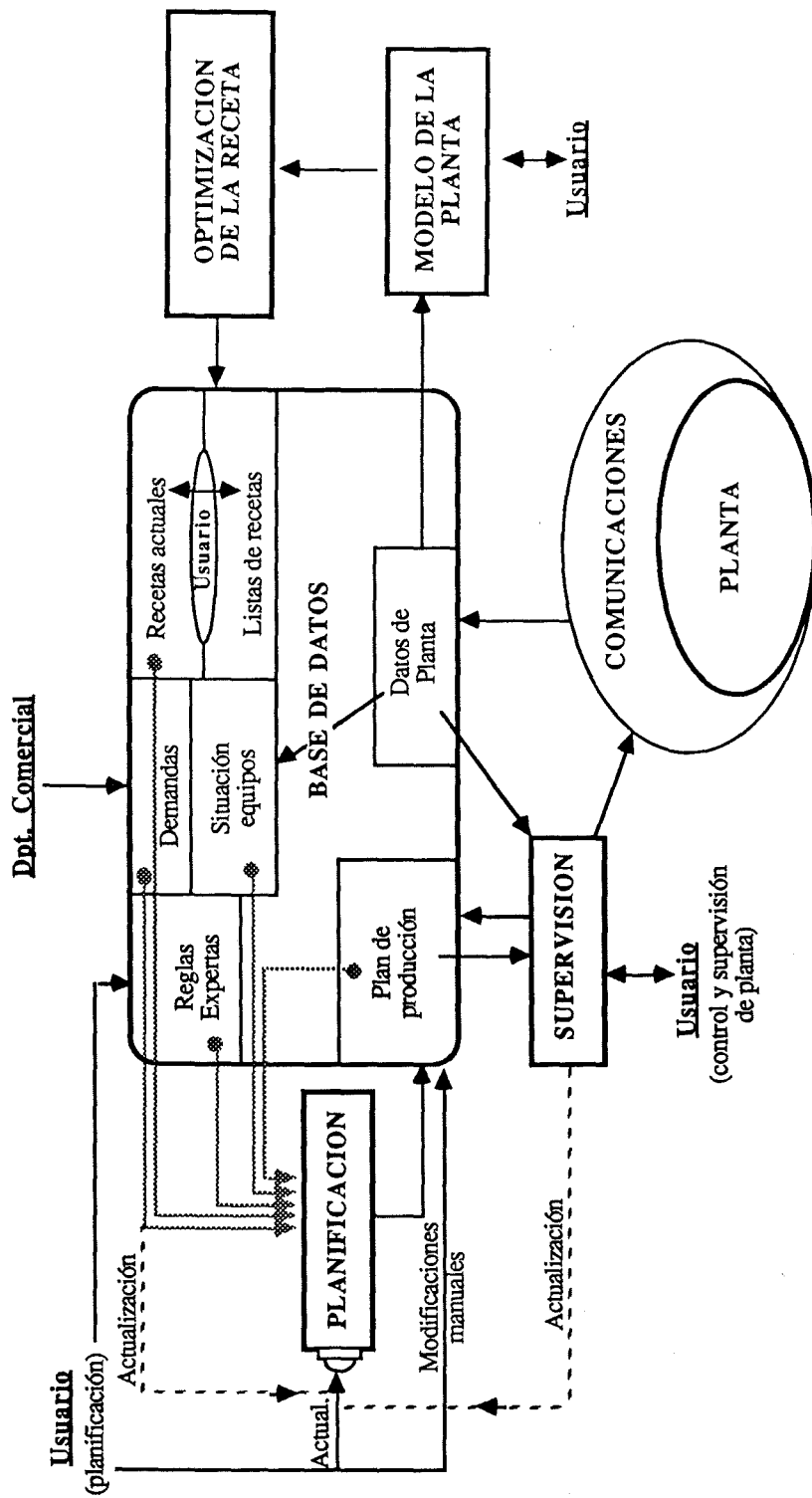


Figura 4.5. Transferencia de información en un entorno CIM.

- Por otra parte, mediante una correcta utilización de las materias primas, los equipos de la planta y los recursos compartidos, es posible reducir los niveles de disponibilidad necesarios en los recursos productivos para obtener una misma producción, y reducir los niveles de *stock* para ofrecer una misma calidad de servicio.
- Aumento de la productividad:
 - A través de sistemas de simulación pueden estudiarse cambios en las condiciones de fabricación que permitan reducciones en los tiempos de ciclo o mayores rendimientos (mejora de recetas).
 - A través de sistemas de planificación y de simulación de operaciones pueden determinarse las formas más eficientes de utilización de los recursos productivos. Ante incidencias de producción o cambios de escenario, estos mismos sistemas permitirán introducir las modificaciones necesarias sobre el plan de producción previsto, eliminando tiempos muertos, reduciendo tiempos de espera, permitiendo encontrar soluciones a situaciones conflictivas respecto al uso de determinados recursos (por ejemplo, mano de obra), etc.
 - La posibilidad de corregir automáticamente las incidencias de producción permitirá reducir los tiempos de seguridad que habitualmente se introducen para absorber los efectos de dichas incidencias sobre las condiciones de trabajo nominales.
- Mejoras en la calidad de los productos:
 - Se garantiza una máxima uniformidad y repetibilidad en las tareas de producción entre los diferentes lotes.
 - Se elimina la dependencia del factor humano al sistematizar las actuaciones de corrección frente a desviaciones de calidad debidas a causas conocidas, lo cual facilita la resolución de problemas rutinarios.
 - Se facilita la identificación de tendencias a través del seguimiento de las diferentes variables de proceso, permitiendo tomar medidas preventivas que minimicen las desviaciones de calidad.
- Aumento de los niveles de seguridad en planta y en la manipulación de los productos:
 - La monitorización continuada de las variables permite una gran rapidez de respuesta de los sistemas de control.
 - La automatización de los procedimientos de actuación frente a incidencias y situaciones de peligro reduce la dependencia del factor humano que, en situaciones críticas, puede no actuar de acuerdo con los planes de emergencia establecidos

- Mayor flexibilidad: reducción de tiempos de respuesta a cambios en la demanda de productos, en las características de las materias primas, en la disponibilidad de recursos, en la formulación de las recetas, etc.
- Liberación de gran parte de los recursos humanos cualificados, que anteriormente quedaban ocupados por la toma de las decisiones necesarias para mantener en funcionamiento la planta. Algunos de estos recursos podrán ahora dedicarse a identificar y estudiar diferentes condiciones de fabricación (elaboración de nuevos productos, ampliaciones de capacidad, etc.), a mejorar las bases de información sobre las que se toman las diferentes decisiones (estudios de mercado, estimaciones de ventas, etc.), a la supervisión de las decisiones tomadas por los diferentes programas y a la resolución de situaciones no previstas. El progresivo enriquecimiento de las bases de conocimiento (especialmente en aspectos como el control de calidad o la respuesta a incidencias) permitirá una autonomía cada vez mayor del sistema desarrollado.
- Mayor fiabilidad en el proceso de toma de decisiones estratégicas (inversiones, política de precios, elaboración de nuevos productos, etc.): disponiendo de la información detallada de lo que ha ocurrido en la planta, es posible utilizar sistemas y modelos de análisis de tendencias, plantear diferentes escenarios de producción, etc.
- Mejora en el conocimiento de la planta: El análisis sistemático de la información histórica permite mejorar los modelos de la planta, los planes de mantenimiento preventivo, las fuentes de posibles errores de operación o defectos de calidad, etc., siendo además una herramienta básica para los planes de formación del personal.

Sin embargo, la integración de diferentes de herramientas de cálculo y decisión en un único entorno de trabajo es una tarea compleja, debido a las características y especificaciones de cada una de ellas, a la importancia de las inversiones necesarias y a los cambios estructurales que debe provocar en la empresa. Por ello, las implantaciones de un sistema integrado de fabricación asistida por ordenador se orientan hacia empresas de nueva construcción (donde se asume la necesidad de inversiones) y en la realización de prototipos dentro del ámbito universitario. Entre los centros de investigación donde se están realizando trabajos relacionados con la implantación de sistemas CIM en plantas químicas discontinuas se pueden citar el Imperial College (Cott y Macchietto [13]), la Universidad de Purdue (Reklaitis [85], Pekny y colaboradores [73]) y la UPC (Puigjaner y España [77], Puigjaner y colaboradores [76], Torres y colaboradores [101]).

4.12. Ejemplo de aplicación. Caso B1. Planta de producción de fibra acrílica

El ejemplo que se plantea a continuación corresponde a una situación industrial real de una empresa situada en los alrededores de la ciudad de Barcelona. Parte del desarrollo e implementación de los programas de ordenador adecuados para solventar los problemas de planificación de esta empresa, siguiendo los procedimientos que se han descrito a lo largo de este capítulo, ha constituido un Proyecto Final de Carrera realizado en la E.T.S. de Ingenieros Industriales de Barcelona [1] bajo la dirección técnica del autor de esta tesis. En dicho Proyecto Final de Carrera se discute de una forma mucho más detallada la problemática de la empresa, la implementación efectuada y los mecanismos de gestión de la información que se desarrollaron para poder obtener una herramienta realmente útil en la toma de decisiones de producción.

Descripción del problema: Se plantea mejorar el proceso de planificación en una planta de producción de fibra acrílica.

El sistema de fabricación utilizado se conoce con el nombre de "producción por vía húmeda" y consta básicamente de cinco operaciones:

1. Polimerización (figura 4.6): En la planta objeto de estudio existen tres reactores que trabajan en continuo, donde el acrilonitrilo se copolimeriza en suspensión acuosa con una pequeña cantidad de acrilato de metilo (se pueden obtener diferentes composiciones en cada reactor). El monómero que no ha reaccionado se elimina en una columna de destilación situada a la salida de cada reactor. Finalmente, existe un proceso de lavado para eliminar sales y otras sustancias formadas como subproductos, quedando retenido el polímero en una serie de filtros de tambor.

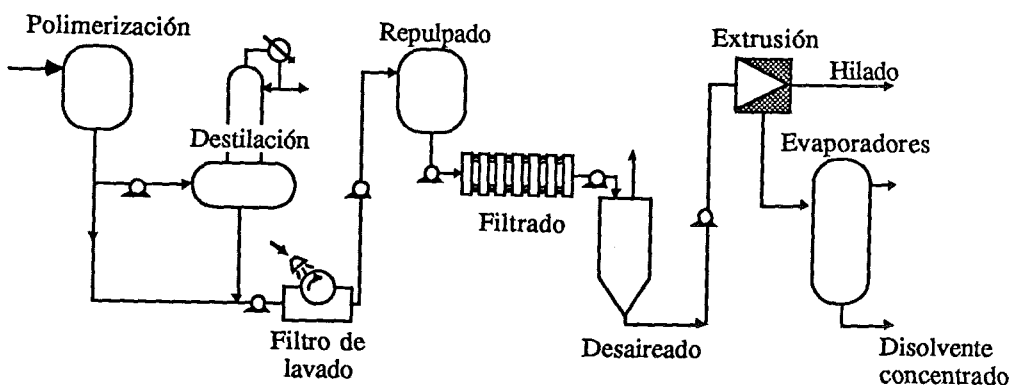


Figura 4.6. Planta de producción de fibra acrílica: Sección química.

2. Disolución del polímero: El polímero recuperado de los filtros se disuelve también en continuo en una mezcla de tiocianato sódico y agua. La disolución es un líquido muy viscoso que se somete a varias etapas de filtrado y un desaireado en vacío.
3. Hilado (figura 4.7): La disolución anterior sufre una extrusión y a continuación pasa por una serie de baños de coagulación, que consisten en una disolución diluida y fría del mismo disolvente de forma que, al ser sustituido el tiocianato por agua, el polímero precipita en forma de fibra. Después de la coagulación, el disolvente residual se elimina por lavado con agua. Comienzan entonces una serie de procesos de estirado y tratamiento térmico y químico que permiten obtener una fibra con las características deseadas, tanto desde el punto de vista estético como mecánico y de facilidad de tratamiento textil. El producto final es un cable formado por los miles de fibras individuales creadas durante la extrusión.
Para llevar a cabo estas operaciones se dispone de seis líneas de producción que presentan diferentes características de funcionamiento y que comparten diferentes servicios (vapor, mano de obra, etc.).
4. Operaciones de acabado: En función del tipo de producto y de las necesidades del cliente, el cable puede pasar por diferentes etapas de cortado, encajado, etc. hasta llegar al almacén de producto, previo a la expedición.
5. Recuperación del disolvente: Del proceso de hilado se recupera una disolución muy diluida de tiocianato sódico que debe ser concentrada para ser reutilizada en la segunda etapa. Para ello se dispone de cuatro evaporadores que funcionan en continuo.

Así pues, las características de la fibra especificadas por el cliente se obtendrán regulando las condiciones de trabajo durante las diferentes operaciones de que consta el proceso de hilado, mientras que las propiedades del material a tratar en las etapas de polimerización y disolución serán, salvo excepciones, siempre las mismas. Por tanto, la planificación tomará como referencia la fase de hilado, aunque deberá también considerar las diferentes restricciones y efectos sobre el resto de la planta.

Por otro lado, los productos se fabrican en función de los pedidos concretos cursados por los clientes a través del departamento comercial, por lo que prácticamente no hay producción para *stock*. La planificación debe asegurar el correcto servicio de los pedidos firmes, los cuales deben haber obtenido previamente el visto bueno del departamento técnico y del de administración. Se realiza una planificación a corto plazo (de dos a cuatro semanas) basada en dichos pedidos. El plan de producción en este caso consiste en la asignación de trabajos a las líneas y en la secuenciación de los mismos.

Las dimensiones del problema son las siguientes:

- Seis líneas de producción, todas ellas con diferentes posibilidades técnicas de fabricación y productividades.

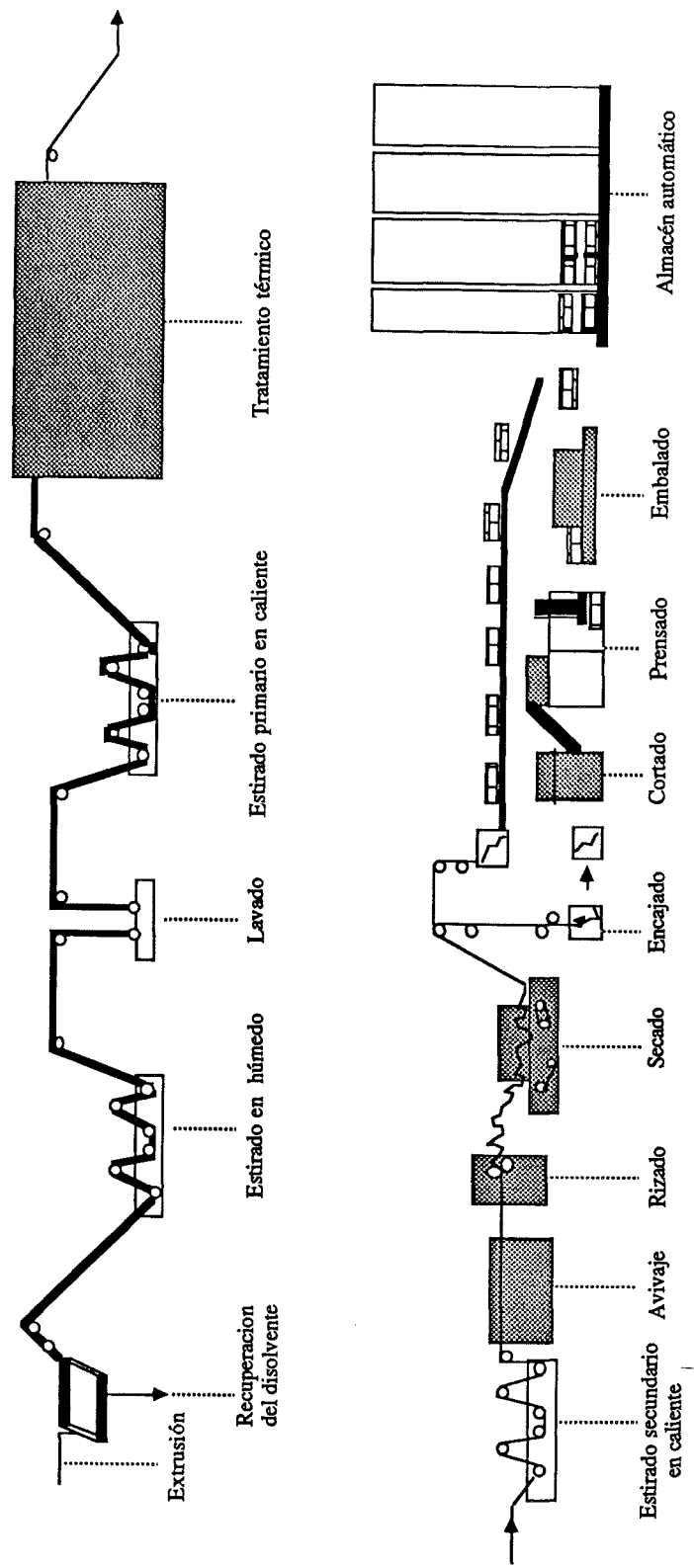


Figura 4.7. Planta de producción de fibra acrílica: Sección de hilado.

- En un cierto momento pueden existir entre 100 y 500 pedidos firmes, cada uno con sus propias características técnicas y plazos de entrega. En la base de datos de la empresa existen referencias a más de 50.000 productos diferentes, con sus respectivas formulaciones y condiciones de fabricación, y cada día se introducen nuevos productos. Entre las características que diferencian los distintos artículos a fabricar destacan:

- El grosor de la fibra. Se mide a través del peso de la fibra por unidad de longitud (suele expresarse en gramos por cada 10.000 metros de fibra o decitex¹⁸). Esta característica determina el tipo de hilera a utilizar y la velocidad de trabajo de la línea, aunque en algunos casos existen varias combinaciones alternativas para obtener un mismo grosor. Se suministran unos 40 grosores básicos, aunque excepcionalmente pueden fabricarse grosores intermedios.
- El color. Partiendo de unos 30 colorantes, se formulan los diferentes colores en función de las necesidades del cliente. El número de colores que se pueden fabricar es, por tanto, virtualmente infinito. Habitualmente, casi todos los pedidos pendientes de fabricación en un cierto instante son de colores diferentes.
- Las características superficiales. Básicamente dependen de la composición del baño de avivaje. Actualmente se trabaja con 6 composiciones diferentes para este baño.
- El lustre. Para regularlo se introducen pequeñas cantidades de óxido de titanio en la composición de la fibra. Actualmente se contemplan 5 composiciones diferentes (brillante, mate, y tres situaciones intermedias).
- La composición del polímero. Se contemplan 4 composiciones a partir de dos copolímeros (acrilonitrilo y acrilato de metilo), aunque dos de ellas son, con diferencia, las más utilizadas.
- La composición de la fibra. Para conseguir determinadas características en la fibra (especialmente volumen) se recurre a unir en el mismo filamento fibras de dos polímeros diferentes, que responderán de distinta forma a los tratamientos de hilado. Se habla entonces de fibra bicomponente. Para que el proceso sea correcto, debe existir un sistema de alimentación adecuado sobre las hileras, que no se encuentra disponible en todas las líneas de fabricación.
- El corte. La fibra puede cortarse, de manera que los filamentos sean de una longitud uniforme, o puede suministrarse como cable. En el primer caso (destino *floca*), se obtendrá un tejido de características semejantes al algodón, que será vendido en balas. En el segundo caso (destino *seydel*), el cliente cortará la fibra según sus necesidades. Si la longitud de los filamentos no es uniforme, el tejido presentará características similares a las de la lana.

¹⁸Se define el *tex* como el peso en gramos por km de fibra o cable.

- El tratamiento térmico. En función de la temperatura a la que se encuentren los baños y a la que se realicen los procesos de estirado, la fibra resultante tendrá diferentes características mecánicas.
- El grosor del cable. Se mide a través del peso por unidad de longitud del cable y se suele expresar en kilotex (kg por km de cable). Para un determinado grosor de fibra, este parámetro da idea de la cantidad de fibras individuales existentes en una sección transversal. Desde el punto de vista de producción, interesará trabajar con el máximo grosor admisible en la línea, pero este grosor puede quedar limitado también por la capacidad de las máquinas textiles del cliente.

Para facilitar el acceso a la información, algunas de estas características (grosor de fibra, composición de polímero y de fibra y corte) se resumen en un único campo llamado *título* (tablas 4.3 y 4.4).

En el momento de asignar la fabricación de cada producto a una determinada línea de producción debe asegurarse el cumplimiento de una serie de restricciones técnicas, entre las que destacan:

- Cada cambio en las condiciones de trabajo de una línea implica un tiempo improductivo. Algunos de estos tiempos se recogen en la tabla 4.2. Si se dan varios cambios en la misma línea de forma simultánea, el tiempo improductivo será el mayor de todos ellos, excepto por lo que respecta al tiempo adicional de ajuste de color cuando hay un cambio de hileras.

Dada la frecuencia relativa con que se modifican las condiciones de trabajo, es especialmente importante controlar los cambios de color. Si el cambio es de un color claro a otro oscuro, será aplicable el tiempo general indicado en la tabla 4.2, pero si es a la inversa se deberá realizar una limpieza general de la línea (descontaminación) para evitar que restos de los colorantes utilizados antes del cambio afecten al color del siguiente producto. Para que el sistema de cálculo pueda reconocer la necesidad de realizar una descontaminación, se elaboró un sistema experto que permite relacionar la formulación de un color con un *índice de ensuciamiento* (*i.e.*). A partir de este índice se determinó una frontera entre colores claros y oscuros, que quedó situada en un *i.e.* de $0,12 \pm 0,2$, y se estableció sería necesaria una descontaminación cada vez que, debido a un cambio de color en una línea:

- el *índice de ensuciamiento* del producto anterior corresponda a un color oscuro (*i.e.* $> 0,14$) y el del producto posterior un color claro (*i.e.* $< 0,10$), o bien
- el *índice de ensuciamiento* del producto anterior supere en más de 10 unidades al del producto posterior.

Tabla 4.2. Tiempos improductivos debidos a cambios en las condiciones de trabajo en las líneas.

Incendencia	Tiempo (horas)
Cambio de tipo de hilera	2,00
Dism. número de hileras	0,25
Incr. número de hileras	2,00
Cambio de color	0,25
Cambio/renovación avivaje	0,50
Cambio de lustre	0,00
Descontaminación	5,00
Cambio de normal a bicomponente	2,00
Cambio de bicomponente a normal	0,00
Cambio de hileras y rizador	2,50
Cambio de rizador	2,00
Blanco óptico ^(a)	48,00
Tiempo adicional de ajuste de color ^(b)	2,00

^(a)Horas de limpieza de línea, por lo que solamente se puede programar artículos sin colorear, tal como se indica en la página 176.

^(b)Este tiempo solamente se considerará improductivo si el cambio de color coincide con un cambio de hileras.

Mediante la introducción de esta sistemática, se ha eliminado la dependencia de criterios subjetivos para determinar la necesidad de una limpieza de líneas, decisión que previamente se tomaba en función de la experiencia del personal del departamento de planificación y del laboratorio de color. Una vez ajustados convenientemente los parámetros que regulan el cálculo del índice de ensuciamiento, el sistema experto permite establecer con tiempo suficiente los momentos en que será necesaria la limpieza, evitando limpiezas inútiles y faltas de calidad por contaminación de colores.

A efectos de este estudio, se considerará que el índice de ensuciamiento es un dato asociado al color.

- Existe un colorante que contiene sustancias fluorescentes (*blanco óptico*). Para elaborar productos que requieran este colorante, la línea de producción debe presentar un grado excepcional de limpieza que solamente se asegura programando producto sin color durante las 48 horas anteriores.
- No todas las líneas admiten todos los productos. Cada producto se podrá asignar a un número restringido de líneas de fabricación, en función de sus características técnicas (básicamente grosor de la fibra y composición de la fibra y del polímero). Existe una base de datos donde se recogen las características que se admiten en cada línea. En las tablas 4.3 y 4.4 se reflejan las condiciones de funcionamiento

de las diferentes líneas de fabricación en función del *título* del artículo a fabricar (solamente se han indicado los valores necesarios para analizar los pedidos de las tablas 4.8 y 4.9, cuyas características técnicas se reflejan en las tablas 4.10 y 4.11).

Por otra parte, en la tabla 4.5 se indican algunas de las posibilidades de las diferentes líneas de hilado. En determinadas circunstancias se deseará restringir artificialmente las posibilidades de asignación de demandas a líneas, a fin de evitar un excesivo número de cambios en las condiciones de trabajo o de dirigir la planificación hacia una determinada solución, independientemente de los valores de la función objetivo.

- Simultáneamente, se debe controlar la ocupación de ciertos servicios comunes, que se comparten entre todas las líneas:
 - Mano de obra. Cada vez que se produce un cambio en las condiciones de trabajo es necesaria la actuación de una serie de técnicos y mecánicos para volver a ajustar la producción. La situación más frecuente, y a su vez una de las más críticas, se produce con los cambios de color, ya que las especificaciones marcadas por el cliente suelen ser muy estrictas. Para evitar desviaciones, el personal especializado (colorista) debe realizar un control sistemático después de cada cambio, por lo que es fundamental que dicho personal no quede sobreocupado para evitar alteraciones de calidad.
 - Energía. La planta consume vapor y electricidad, y dispone de un sistema de cogeneración. La mayor parte del consumo de vapor se produce en la sección de recuperación de disolvente. Para conseguir un funcionamiento regular del sistema de turbinas debe evitarse la parada simultánea de más de dos líneas (por mantenimiento o por cambio de producto).
 - *Stock* de hileras. Existe una cantidad limitada de hileras de cada tipo, tal como se indica en la tabla 4.6. Las hileras pueden utilizarse en cualquier línea, pero una vez reemplazadas deben pasar por un proceso de limpieza antes de volver a estar disponibles. Esta limpieza dura unas 5 horas.
 - Tanques auxiliares para la preparación del baño de avivaje. El baño de avivaje debe cambiarse cada vez que cambia la composición requerida, según las características del producto a fabricar, pero también debe renovarse al realizar una limpieza general de la línea de proceso (descontaminación) al pasar de un color oscuro a otro notablemente más claro.

La preparación de un baño de avivaje requiere unas 4 horas. Para ello se dispone de tres tanques auxiliares instalados al efecto y conectados a las cubetas de las líneas y entre sí según se indica en la figura 4.8.

Se ha considerado que puede prepararse la cantidad necesaria para realizar un número indefinido de renovaciones pero, como es lógico, en cada tanque solo puede mantenerse un tipo de avivaje en cada momento. Entre la preparación de dos avivajes diferentes en el mismo tanque debe realizarse una limpieza que dura otras 4 horas.

Tabla 4.3. Condiciones de funcionamiento de las líneas.

Línea	Título	Productividad (kg/h/hilera)	Max. num. hileras	Tipo hilera	ktex max.
1	16	-	-	-	-
	84	49,30	24	5	135,8
	88	-	-	-	-
	109	60,26	24	5	166,0
	118	60,26	24	5	166,0
	131	60,26	16	5	110,7
	132	60,26	18	5	124,5
	155	57,85	16	5	137,5
	182	61,73	24	7	170,1
	268	-	-	-	-
288	67,50	17	10	199,2	
2	16	42,04	24	2	109,2
	84	49,30	24	5	135,8
	88	-	-	-	-
	109	60,26	24	5	166,0
	118	60,26	24	5	166,0
	131	-	-	-	-
	132	-	-	-	-
	155	-	-	-	-
	182	56,12	24	7	170,1
	268	60,00	24	10	187,5
288	67,50	17	10	199,2	
3	16	38,22	24	2	109,2
	84	44,82	24	5	135,8
	88	-	-	-	-
	109	54,78	24	5	166,0
	118	54,78	24	5	166,0
	131	-	-	-	-
	132	-	-	-	-
	155	-	-	-	-
	182	56,12	24	7	170,1
	268	60,00	24	10	187,5
288	67,50	17	10	199,2	

Tabla 4.4. Condiciones de funcionamiento de las líneas (cont.).

Línea	Título	Productividad (kg/h/hilera)	Max. num. hileras	Tipo hilera	ktex max.
4	16	—	—	—	—
	84	—	—	—	—
	88	—	—	—	—
	109	—	—	—	—
	118	—	—	—	—
	131	60,26	16	5	110,7
	132	—	—	—	—
	155	57,85	16	5	137,5
	182	—	—	—	—
	268	—	—	—	—
5	16	—	—	—	—
	84	49,30	24	5	135,8
	88	49,30	22	5	124,5
	109	60,26	24	5	166,0
	118	60,26	24	5	166,0
	131	60,26	16	5	110,7
	132	60,26	18	5	124,5
	155	57,85	16	5	137,5
	182	61,73	24	7	170,1
	268	60,00	24	10	187,5
6	16	—	—	—	—
	84	49,30	24	5	135,8
	88	49,30	22	5	124,5
	109	60,26	24	5	166,0
	118	60,26	24	5	166,0
	131	60,26	16	5	110,7
	132	60,26	18	5	124,5
	155	57,85	16	5	137,5
	182	61,73	24	7	170,1
	268	60,00	24	10	187,5
288	67,50	17	10	199,2	

Tabla 4.5. Posibilidades técnicas de las líneas de hilado.

Característica	Línea					
	1	2	3	4	5	6
Destino FLOCA (cortado)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Destino SEYDEL (cable)	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí
Blanco óptico	Sí	Sí	No	No	No	No
Composición: bicomponente	Sí	No	No	Sí	No	No

Tabla 4.6. *Stock* de hileras.

Tipo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cantidad	24	90	54	53	115	16	86	31	0	46	12

Funcionalidad: El sistema de cálculo debe permitir:

- La automatización del proceso de planificación de la producción, determinando la asignación de recursos más adecuada en cada momento de acuerdo con una función de coste que contempla y pondera los siguientes objetivos de producción:
 - Asegurar el máximo grado de cumplimiento de los plazos de entrega establecidos.
 - Regular el grado de ocupación de las diferentes líneas de fabricación.
 - Controlar el grado de ensuciamiento de la línea en función de los colorantes utilizados.
 - Minimizar el volumen global de cambios de condiciones de fabricación en las líneas.
 - Asignar las diferentes demandas a las líneas más adecuadas.
 - No sobrepasar los límites de capacidad de los servicios generales comunes.
 - Asegurar la continuidad de la producción en el tiempo. Dado un plan de producción en curso, se debe determinar la mejor colocación para las nuevas demandas que se vayan introduciendo en el sistema, de acuerdo con los objetivos globales de trabajo.

De todas maneras, debe tenerse en cuenta que, una vez establecido un plan de producción, se ponen en marcha los procesos de preparación correspondientes a los trabajos a realizar en las próximas horas, que incluyen la elaboración de las disoluciones a utilizar en el proceso (por ejemplo, el baño de tinte). Por tanto, existe un periodo de tiempo en el que debe quedar muy penalizada cualquier modificación de la secuencia de operaciones prevista, tal como se comentará al describir la función objetivo.

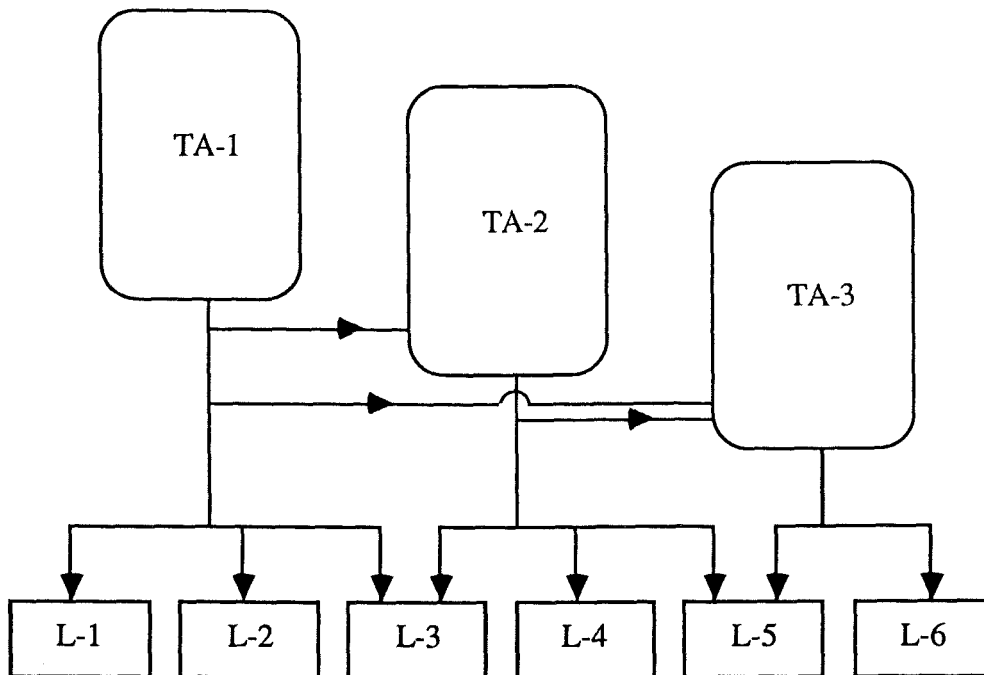


Figura 4.8. Conexiones entre las líneas y los tanques de avivaje.

- Agilizar el acceso a la información referente al plan en curso, tanto en forma de resúmenes generales como de tablas detalladas que permitan seguir la producción de cada línea en el tiempo, la evolución de los *stocks* y pedidos, la ocupación de los servicios comunes, etc.
- Permitir la introducción de reglas específicas para tratar casos concretos, si el usuario detecta alguna situación en la que no se deban seguir las reglas de optimización generales.
- Permitir de una forma ágil y sencilla la modificación del plan de producción en cualquier momento, a voluntad del usuario, ya sea para incorporar nueva información al sistema o para modificar decisiones tomadas por el procedimiento de optimización, cuya capacidad de manejar información quedará limitada a los casos previstos durante la fase de especificaciones.

Para cumplir todas estas funciones, se han habilitado procedimientos de comunicación entre este sistema de programas y la base de datos general de la empresa, de manera que los datos requeridos (pedidos, estado actual de las líneas de producción, existencias actuales en almacén, etc.) se toman directamente de esta base de datos y los resultados generados, útiles para diferentes estamentos de la empresa, pueden ser consultados en cualquier momento utilizando las herramientas de dicha base de datos, ya existente. También se ha previsto la utilización de los programas elaborados desde cualquier puesto de trabajo, para lo cual se ha generado un conjunto de menús de

opciones. Desde los puestos de trabajo gráficos se permite además la representación gráfica de resultados (diagramas de Gantt, etc.).

Función objetivo Dadas las características de los sistemas de cálculo a utilizar, se ha podido adaptar la forma concreta de la función objetivo para que responda a los criterios generales de trabajo de la empresa, dejando abierta la posibilidad de posteriores ajustes en los factores de peso de los diferentes términos y permitiendo así la adaptación del proceso de optimización a futuros cambios de mercado y/o a modificaciones en las condiciones de trabajo de la planta. La formulación adoptada para los términos de esta función objetivo es la siguiente:

- Retrasos sobre los plazos de entrega acordados: Para poder cumplir la fecha de entrega comprometida con el cliente, el pedido debe haber acabado su paso por las líneas de hilado antes de las 8 horas del día límite acordado. El coste de cada retraso se calcula como proporcional a la cantidad retrasada, a la cantidad total del pedido (no se puede entregar un pedido hasta que no esté completamente finalizado), a la magnitud del retraso y a la prioridad asignada.

Para cada demanda se calcula el máximo retraso respecto al plazo establecido y se multiplica por la cantidad total solicitada. Por otra parte, en caso de que esté previsto dividir la demanda en varios lotes, se calcula también la suma de cantidades por retrasos de cada lote individual. Ambas cantidades se multiplican por su respectivo factor de peso (tabla 4.7), se suman y finalmente se multiplica el valor por el factor de prioridad establecido en función del pedido y/o del cliente.

Por ejemplo, en el plan indicado en la figura 4.9 los pedidos 68 y 75 (ambos en la línea 6) deberían finalizarse antes de las 8 horas del 8 y del 12 de noviembre respectivamente, por lo que llegarán ligeramente retrasados (5,3 y 6,5 horas). En ambos casos está previsto realizar una sola orden de fabricación, por lo que la penalización para el pedido 68 será:

$$\text{Coste} = 3 \cdot (0,18 \cdot 5,00 \cdot 5,3/24 + 9,00 \cdot 5,00 \cdot 5,3/24) = 30,5$$

mientras que para la demanda 75 se obtiene:

$$\text{Coste} = 1 \cdot (0,18 \cdot 10,00 \cdot 6,5/24 + 9,00 \cdot 10,00 \cdot 6,5/24) = 25,0$$

Finalmente, la penalización será de 55,5 unidades de coste arbitrarias (*u.a.*).

- Cambios en las condiciones de trabajo: Cada cambio en alguna de las condiciones de operación reflejadas en la tabla 4.7 se penaliza de acuerdo con el valor indicado en dicha tabla. Si se realizan varios cambios simultáneamente, las penalizaciones se acumulan.

Como ya se ha indicado, para minimizar las operaciones de limpieza y mejorar la calidad del producto es conveniente que los colores claros se realicen antes que los

Tabla 4.7. Factores que afectan a la función objetivo.

Incidencia	Penalización (u.a.)
Cambio de tipo de hilera	800
Dism. número de hileras	12,5
Incr. número de hileras	62,5
Cambio de color	25,0
Cambio/renovación avivaje	1.000
Cambio de lustre	12,5
Descontaminación	400
Cambio composición de fibra	300
Cambio de hileras y rizador	1.000
Cambio de rizador	560
Retrasos	0,18 — 9,0 (u.a./ (ton · día))
Coste de línea parada	100 (u.a./hora)
Graduación de colores	12,5 (u.a./u.e. ^(a))
Sobreocupación del personal	12,5 (u.a./cambio)
Falta de hileras	50.000 (u.a./cambio)
Cambio de secuencia ^(b)	50.000 (u.a./trabajo)
Beneficio proporcional	200 (u.a./ton)

^(a) Unidades de penalización por cada decremento unitario en el *índice de ensuciamiento* debido a un cambio de color.

^(b) En las primeras 48 horas respecto al momento de planificación.

oscuros, y se puede calcular el *índice de ensuciamiento* enunciado anteriormente para sistematizar este orden. En base a este valor se han identificado tres causas posibles de penalización por cambio de color:

- Cada cambio de color se penaliza con un factor constante relacionado con las operaciones asociadas (penalización por *cambio de color* en la tabla 4.7).
 - Si el cambio implica instalar un color más claro, se penaliza proporcionalmente al decremento del índice de ensuciamiento (factor de *graduación de colores* en la misma tabla).
 - Finalmente si este decremento hace necesario introducir una limpieza general de línea, según lo establecido en la página 175, se aplicará además la penalización indicada para las descontaminaciones.
- Líneas desocupadas: Uno de los objetivos de la planificación es conseguir que todas las líneas estén ocupadas con la mayor uniformidad posible. Para conseguirlo, tomando como referencia la línea que queda ocupada durante más tiempo, se penaliza el tiempo que quedan desocupadas el resto, utilizando el factor de *coste de línea parada* indicado en la tabla 4.7.

- **Sobreocupación del personal:** Se ha establecido que puede existir una sobreocupación de los técnicos encargados del control de color de la fibra cada vez que coincidan más de dos cambios de color en menos de una hora. Cada cambio de color que pueda provocar una sobreocupación se penaliza de acuerdo con el factor indicado en la tabla 4.7.
- **Falta de hileras:** Evidentemente, es imposible realizar la producción si las hileras adecuadas no están disponibles, por lo que se debe realizar un seguimiento de su ciclo de limpieza para poder hacer previsiones de disponibilidad. La falta de hileras (que provocaría que un plan de producción no fuera factible) debe penalizarse con un factor tal que provoque que el sistema de optimización reconozca el caso como no factible.
- **Modificaciones inmediatas sobre el plan en curso:** A fin de evitar la sustitución de trabajos para los que ya han comenzado los procesos de preparación por otros que necesitarán nuevos baños auxiliares, se ha optado por penalizar las modificaciones sobre las primeras 48 horas del plan actualmente en curso de tal forma que el plan resultante se reconozca como no factible.

Estas penalizaciones se deben enfrentar a los beneficios esperados por la aplicación del plan, que se han considerado proporcionales a la producción. El valor final obtenido podrá utilizarse para reconocer la bondad de un determinado plan de producción y para evaluar las modificaciones que se propongan tanto desde el sistema de optimización como por parte del personal de planta.

Generación de un plan inicial: A partir de una situación determinada de la planta, de las restricciones técnicas de fabricación y de unos objetivos a cubrir (la fabricación de los pedidos pendientes), el primer paso consiste en obtener un plan de producción que, cubriendo dichos objetivos, sea técnicamente factible.

Para lograr este plan se implementaron dos grupos de programas:

- Un módulo de simulación de la planta desde el punto de vista de fabricación. Este módulo, dado un plan de producción (asignación de trabajos a las líneas y secuencia de operaciones), debe calcular:
 - La utilización de recursos de la planta en el tiempo para cumplir este plan de producción:
 - * Instante de inicio y final de cada trabajo en las líneas.
 - * Tiempos improductivos por cambios en las condiciones de proceso.
 - * Incidencias en la fabricación (por ejemplo: necesidad de realizar una limpieza)
 - * Ocupación de los recursos comunes (personal, *stock* de hileras disponibles, etc).

- La bondad del plan de producción de acuerdo con los criterios establecidos por la función objetivo que se acaba de describir.

Este módulo de simulación únicamente debe reproducir el comportamiento previsible de la planta cuando ya se han tomado todas las decisiones de planificación.

- Un módulo de asignación y secuenciación inicial. En este módulo se aplican una serie de reglas que recogen la experiencia del personal de la planta, con el objetivo de obtener un plan de producción correcto desde dos puntos de vista:
 - Desde el punto de vista técnico, la asignación de pedidos a las líneas de hilado debe respetar las posibilidades de trabajo de cada línea.
 - En el aspecto económico, la aplicación del plan obtenido no debe dar lugar a excesivos problemas (y/o costes) de producción.

Para obtener este plan inicial se ha desarrollado un sistema heurístico que sigue los siguientes pasos:

1. Agrupar los pedidos de acuerdo con sus características técnicas (*título*), siempre que los plazos de entrega sean similares, dado que los costes de cambio de condiciones de fabricación son especialmente significativos en este caso.
2. Determinar las líneas de producción en las que es factible realizar cada grupo de pedidos y las condiciones de trabajo (productividad) en cada caso.
3. Ordenar los grupos de pedidos de acuerdo con su prioridad. Esta prioridad viene dada por la proximidad del plazo de entrega, por la cantidad de producto a elaborar y por el número de líneas que pueden realizar la fabricación de cada grupo de pedidos.
4. Ordenar las líneas de acuerdo con la capacidad de cubrir mayor o menor cantidad de la demanda total. Esta capacidad dará idea del grado de ocupación de las líneas.
5. Determinar el orden de prioridad de líneas para cada grupo de demandas, de acuerdo con su productividad y su grado de ocupación.
6. Asignar los grupos de pedidos a las diferentes líneas: comenzando por los grupos más prioritarios, cada grupo se asignará sucesivamente a la línea de mayor prioridad que permita cumplir los plazos de entrega o en la que queda menos retrasado. A medida que se va ocupando una línea, decrece su prioridad (tiene menos horas libres), con lo que se asegura la uniformidad de la carga.
7. Dentro de cada grupo de pedidos, ordenarlos de acuerdo con su *índice de ensuciamiento*.

Todos estos pasos pueden generar diferentes resultados en función de los criterios de agrupación y/o ordenación que se apliquen. Así por ejemplo, la agrupación de pedidos (paso 1) será diferente según la máxima diferencia entre plazos de entrega considerada; el orden de prioridad de las líneas (paso 5) no será el mismo si se determina a partir de su flexibilidad que si se calcula a partir de su capacidad, etc.

De acuerdo con la información y experiencia recogida en la empresa, se han determinado varios conjuntos de criterios que podrán originar diferentes planes iniciales. La aplicación de procedimientos de optimización local sobre de cada uno de estos planes iniciales ampliará el alcance de la búsqueda y aumentará la probabilidad de obtener el óptimo global.

Adicionalmente, el usuario puede incorporar nuevos criterios para originar otros planes iniciales que se sumarán a los ya calculados por el sistema.

Optimización del plan: Dado un plan inicial, cuyos defectos quedan reflejados a través de penalizaciones en la función objetivo, se ha desarrollado un módulo genérico de optimización local siguiendo los criterios indicados en la sección 4.7.3, enfocado a mejorar el plan tratando individualmente cada uno de los factores que inciden en la función objetivo.

Este módulo permite detectar, evaluar y proponer alternativas a problemas de:

- Continuidad de las condiciones de trabajo en las líneas.
- Retrasos sobre las fechas de entrega.
- Ocupación no uniforme de las líneas de hilado.
- Sobreocupación de servicios generales.

Una vez identificado el problema a solventar, el procedimiento de optimización recorre sistemáticamente las siguientes etapas:

1. Selección de los N_w trabajos más perjudiciales.
2. Para cada trabajo, localización de N_a posibles situaciones alternativas técnicamente factibles, buscadas de acuerdo con un criterio de idoneidad referente al caso específico que se desea solventar.
3. Simulación de cada uno de los $N_w \cdot N_a$ cambios y evaluación de la función objetivo global correspondiente a cada caso.
4. Selección de las N_{selec} mejores alternativas, según la función objetivo y las variables de estado correspondientes a la situación global de la optimización. Es posible que algunas de las alternativas seleccionadas den lugar a una función objetivo peor que la correspondiente a la situación inicial, pero no por ello deben

ser descartadas, ya que pueden servir de base para llegar a otras situaciones mejores.

Los detalles de los procedimientos de selección y optimización aplicados en este caso se discuten en [1].

En cuanto al sistema de gestión de estos pasos de optimización local, se han implementado dos procedimientos que pueden ser seleccionados por el usuario en función de las necesidades de cada momento:

1. Gestión por el propio usuario: El usuario determina el aspecto del *plan actual* a mejorar y obtiene, por aplicación del módulo de optimización local, un *plan mejorado* ($N_{selec} = 1$). A partir de este resultado, el usuario especifica el nuevo el plan de partida (el plan inicial, el *mejorado*, o cualquier otro de una base de datos que contiene los mejores planes identificados por el sistema y otros incluidos por el propio usuario) y el nuevo aspecto a mejorar.
2. Elaboración dirigida de un “árbol” de planes de producción. Para ello se aplica sistemáticamente el módulo de optimización local sobre un plan inicial, considerando sucesivamente los N_{penal} peores aspectos identificados a través de la función objetivo, dando lugar a $N_{selec} \cdot N_{penal}$ planes diferentes (“nivel 1”). Para cada uno de los planes obtenidos se vuelve a aplicar la misma estrategia (“nivel 2”), y se prosigue sucesivamente hasta el “nivel de profundidad” N_{profun} especificado por el usuario.

Para limitar el crecimiento exponencial del número de nodos de este árbol, se ha establecido que un plan puede quedar eliminado de la lista por:

- Ser idéntico a otro plan previamente generado.
- Tener la misma asignación de pedidos a líneas y peor función objetivo que otro plan previamente generado.
- Proceder de N_{elim} planes con funciones objetivo cada vez peores.
- Tener mucho peor función objetivo que otro plan previamente generado.

Evidentemente, cuanto mayores sean N_{selec} , N_{penal} , N_{elim} y N_{profun} , mayores serán los recursos de cálculo requeridos para llegar al final de la exploración.

Resultados obtenidos: En las tablas 4.8 y 4.9 se muestra una lista de pedidos¹⁹ que permitirá ilustrar algunos de los resultados que pueden obtenerse por aplicación del sistema de planificación descrito. Las características de fabricación de cada pedido se resumen en las tablas 4.10 y 4.11.

¹⁹El número de pedidos a manejar en una situación real “típica” es del orden de 2 a 5 veces mayor.

Tabla 4.8. Demandas a cubrir.

Núm	Cantidad (Ton.)	Fecha Entrega	Divisible	Prioridad
52	4,00	18-Nov.	No	3
53	4,00	18-Nov.	No	3
54	5,00	28-Nov.	No	1
55	10,00	28-Nov.	No	1
56	5,00	28-Nov.	No	1
57	5,00	28-Nov.	No	1
58	7,00	30-Nov.	No	4
59	5,00	30-Nov.	No	4
60	5,00	30-Nov.	No	4
61	3,00	30-Nov.	No	4
62	3,00	30-Nov.	No	4
63	7,00	30-Nov.	No	4
64	12,00	8-Nov.	No	3
65	10,50	8-Nov.	No	3
66	12,00	8-Nov.	No	3
67	8,00	9-Nov.	No	3
68	5,00	8-Nov.	No	3
69	5,00	29-Nov.	No	5
70	8,00	12-Nov.	No	1
71	10,00	12-Nov.	No	1
72	12,00	12-Nov.	No	1
73	8,00	12-Nov.	No	1
74	8,00	12-Nov.	No	1
75	10,00	12-Nov.	No	1
76	8,00	12-Nov.	No	1
77	8,00	12-Nov.	No	1
78	8,00	12-Nov.	No	1
79	8,00	12-Nov.	No	1
80	8,00	12-Nov.	No	1
81	5,00	4-Dic.	No	4
82	5,00	4-Dic.	No	2
83	5,00	4-Dic.	No	2
84	5,00	4-Dic.	No	2
85	5,00	4-Dic.	No	2
86	40,00	4-Dic.	No	1
88	5,00	5-Dic.	No	1
91	5,00	5-Dic.	No	1
92	4,00	16-Nov.	No	3
93	4,00	15-Nov.	No	3

Tabla 4.9. Demandas a cubrir (cont.).

Núm	Cantidad (Ton.)	Fecha Entrega	Divisible	Prioridad
94	3,00	15-Nov.	No	3
95	12,00	2-Dic.	No	3
96	6,00	2-Dic.	No	3
97	11,00	2-Dic.	No	3
98	5,00	2-Dic.	No	3
99	8,00	2-Dic.	No	3
100	4,00	7-Dic.	No	4
101	4,00	18-Nov.	No	3
102	4,00	18-Nov.	No	3
103	30,00	30-Nov.	Sí	3
104	5,00	30-Nov.	No	3
105	5,00	30-Nov.	No	3
106	5,00	30-Nov.	No	3
107	5,00	30-Nov.	No	3
108	5,00	30-Nov.	No	3
109	5,00	30-Nov.	No	3
112	4,00	7-Dic.	No	4
113	7,00	7-Dic.	No	4
114	5,00	7-Dic.	No	4
115	9,00	7-Dic.	No	4
117	5,00	10-Dic.	No	1
118	5,00	10-Dic.	No	1
119	5,00	10-Dic.	No	1
120	5,00	10-Dic.	No	1
121	8,00	10-Dic.	No	1
122	8,00	10-Dic.	No	1
123	5,00	10-Dic.	No	1
124	5,00	10-Dic.	No	1
125	5,00	10-Dic.	No	1
126	5,00	10-Dic.	No	1
127	5,00	10-Dic.	No	1
128	30,00	8-Dic.	No	3
129	15,00	8-Dic.	No	3
130	10,00	8-Dic.	No	3
131	10,00	8-Dic.	No	3
133	15,00	8-Dic.	No	3
134	20,00	7-Dic.	No	3
135	20,00	8-Dic.	No	3
136	10,00	9-Dic.	No	3

Tabla 4.10. Características técnicas de fabricación.

Núm.	Lus.	dtex	Av.	Tít.	Corte	Ensuc.	Color	ktex máx.
52	5	1,3	5	16	FLOC	0,00	BLAUW Z	109,20
53	5	1,3	5	16	FLOC	0,00	LIGHT G	109,20
54	5	3,3	2	131	SEYD	7,00	GRANATE	110,70
55	5	3,3	2	131	SEYD	6,79	ROJO 2P	110,70
56	5	3,3	2	131	SEYD	25,19	TURQOUI	110,70
57	5	3,3	2	131	SEYD	3,83	CARDENA	110,70
58	5	3,3	2	118	FLOC	0,41	DORADO	166,00
59	5	3,3	2	118	FLOC	0,74	BEIGE C	166,00
60	5	3,3	2	118	FLOC	0,00	ARON CL	166,00
61	5	3,3	2	118	FLOC	0,03	TURQUES	166,00
62	5	3,3	2	118	FLOC	0,56	AMARILX	166,00
63	5	3,3	2	118	FLOC	45,57	NEGRO 0	166,00
64	1	18,0	2	288	FLOC	1,29	MARINE	199,20
65	1	18,0	2	288	FLOC	1,23	BORDEAU	199,20
66	1	12,0	2	268	FLOC	0,03	HUMO RR	187,50
67	5	12,0	2	268	FLOC	37,89	MARINO1	187,50
68	5	12,0	2	268	FLOC	21,50	LIMOGES	187,50
69	1	4,1	2	155	SEYD	0,01	AMARILL	137,50
70	5	2,7	3	84	FLOC	5,68	BORGONA	135,80
71	5	2,7	3	84	FLOC	4,39	BURDEOS	135,80
72	5	2,7	3	84	FLOC	0,00	ARENA 1	135,80
73	5	2,7	3	84	FLOC	0,10	PETUNIA	135,80
74	5	2,7	3	84	FLOC	0,00	LILA 0A	135,80
75	5	2,7	3	84	FLOC	29,97	BOTELLA	135,80
76	5	2,7	3	84	FLOC	0,00	GACIAR	135,80
77	5	2,7	3	84	FLOC	25,78	ROYAL B	135,80
78	5	2,7	3	84	FLOC	0,02	CIELO 0	135,80
79	5	2,7	3	84	FLOC	0,00	CRUDO 0	135,80
80	5	2,7	3	84	FLOC	0,81	PETROLE	135,80
81	5	3,3	2	118	FLOC	6,14	ROJO 04	166,00
82	5	3,3	2	118	FLOC	8,69	VINO N8	166,00
83	5	3,3	2	118	FLOC	0,12	AMBAR K	166,00
84	5	3,3	2	118	FLOC	39,25	MARINO2	166,00
85	5	3,3	2	118	FLOC	34,20	TINTA 0	166,00
86	1	3,3	4	131	SEYD	49,63	NEGRO 1	110,70
88	5	3,3	2	118	FLOC	49,79	NEGRO 2	166,00
91	5	3,3	2	118	FLOC	6,14	ROJO 04	166,00
92	5	1,3	5	16	FLOC	42,25	HIEDRA	109,20
93	5	1,3	5	16	FLOC	11,34	CARMIN	109,20

Tabla 4.11. Características técnicas de fabricación (cont.).

Núm.	Lus.	dtex	Av.	Tít.	Corte	Ensuc.	Color	ktex máx.
94	5	1,3	5	16	FLOC	0,03	ROSA A4	109,20
95	5	3,3	2	118	FLOC	0,00	PISCINA	166,00
96	5	3,3	2	118	FLOC	0,00	GACIAR	166,00
97	5	3,3	2	118	FLOC	6,79	ROJO 2P	166,00
98	5	3,3	2	118	FLOC	6,54	VINO GW	166,00
99	5	3,3	2	118	FLOC	6,91	MARRON3	166,00
100	5	3,3	2	118	FLOC	19,27	ALBUFER	166,00
101	5	1,3	5	16	FLOC	0,19	VERDE B	109,20
102	5	1,3	5	16	FLOC	3,70	FUXIA N	109,20
103	5	3,3	2	118	FLOC	0,00	CREMA U	166,00
104	5	3,3	2	131	SEYD	1,59	VERDE A	110,70
105	5	3,3	2	131	SEYD	6,79	ROJO 2P	110,70
106	5	3,3	2	131	SEYD	6,91	MARRON3	110,70
107	5	3,3	2	131	SEYD	32,63	AZAFATA	110,70
108	5	3,3	2	131	SEYD	2,01	BRIQUE	110,70
109	5	3,3	2	131	SEYD	19,27	ALBUFER	110,70
112	5	3,3	2	118	FLOC	3,83	CARDENA	166,00
113	5	3,3	2	118	FLOC	0,00	DUNA 0Y	166,00
114	5	3,3	2	118	FLOC	0,00	GACIAR	166,00
115	5	3,3	2	118	FLOC	0,00	PISCINA	166,00
117	5	2,7	2	84	FLOC	1,12	GRIS 1	135,80
118	5	2,7	2	84	FLOC	0,00	GRIS R5	135,80
119	5	2,7	2	84	FLOC	0,01	VERDE C	135,80
120	5	2,7	2	84	FLOC	0,71	VERDE M	135,80
121	5	2,7	2	84	FLOC	0,32	VERDE O	135,80
122	5	2,7	2	84	FLOC	0,01	BEIGE 1	135,80
123	5	2,7	2	84	FLOC	2,08	MARRON1	135,80
124	5	2,7	2	84	FLOC	0,00	BEIGE 3	135,80
125	5	2,7	2	84	FLOC	0,01	ROSADO	135,80
126	5	2,7	2	84	FLOC	0,04	MARRON2	135,80
127	5	2,7	2	84	FLOC	0,03	ROSA A4	135,80
128	5	5,4	2	182	FLOC	39,25	MARINO2	170,10
129	5	5,4	2	182	FLOC	24,77	ROYAL C	170,10
130	5	5,4	2	182	FLOC	3,83	CARDENA	170,10
131	5	5,4	2	182	FLOC	0,19	YELLOW	170,10
133	5	5,4	2	182	FLOC	42,25	HIEDRA	170,10
134	5	5,4	2	182	FLOC	6,19	GERANIO	170,10
135	5	5,4	2	182	FLOC	0,01	CORAL Z	170,10
136	5	3,3	4	132	SEYD	1,95	CAQUI 0	124,50

El modelo de planta utilizado para realizar los cálculos corresponde a las dimensiones y forma de fabricación descritas en las páginas anteriores, lo cual supone una simplificación respecto a la situación real, tanto por lo que respecta a las dimensiones como a la complejidad de tratamiento de algunas restricciones de trabajo²⁰.

A partir de esta información, se ha calculado el plan de producción más adecuado para dos situaciones de trabajo diferentes:

1. En primer lugar se ha supuesto que la planta está disponible a partir de las 12 horas del 7 de noviembre, con lo que hay tiempo suficiente para cumplir los plazos de entrega.
2. La segunda situación corresponde a los mismos pedidos, pero se ha supuesto que la planta está disponible a partir de las 12 horas del 5 de diciembre, por lo que en muchos casos no se podrán cumplir las fechas de entrega (la mayor parte de los pedidos están comprometidos para fechas anteriores a la de disponibilidad de las líneas). En estas circunstancias, al calcular la función objetivo destacará el impacto del término que penaliza los retrasos, que, como ya se ha indicado, depende de las fechas de entrega, la importancia de los clientes o de los pedidos (prioridad) y de las cantidades a fabricar.

En ambos casos, para reducir la complejidad de la exposición y facilitar la reproducción de resultados, se ha considerado que inicialmente todas las líneas de trabajo están preparadas para aceptar cualquier demanda inmediatamente, y se han eliminado las penalizaciones por sobreocupación de servicios comunes durante la primera hora de trabajo²¹. En las condiciones de trabajo habituales, los esquemas de cálculo y optimización a aplicar serán los mismos, aunque el grado de complejidad será mayor debido a que:

- Existirá un plan en curso y se deberán calcular las penalizaciones por modificaciones en la secuencia de ejecución de los pedidos que previamente estuvieran planificados en las primeras horas de trabajo.
- Las líneas de trabajo no estarán disponibles al mismo tiempo, debido a la necesidad de acabar los trabajos en curso. Además será necesario introducir las penalizaciones correspondientes a los cambios de condiciones de trabajo que sean necesarios para introducir los nuevos pedidos.
- Debido a incidencias de fabricación, el plan en curso no se habrá seguido con rigurosidad, por lo que algunos pedidos previstos para fechas anteriores no estarán fabricados y deberán ser replanificados.

²⁰La descripción completa de la planta real, junto con estudios de funcionamiento en diferentes situaciones de trabajo habituales, se puede encontrar, como ya se ha indicado, en [1].

²¹En un caso real (por ejemplo, después de un periodo de vacaciones), las líneas no se pueden poner en marcha todas a la vez, debido a las restricciones aplicables sobre los servicios comunes.

El resultado obtenido para el primer caso se resume a través del diagrama de la figura 4.9. En la tabla 4.12 se indican los motivos de penalización que se han tenido en cuenta y el cálculo de la función objetivo a partir de las penalizaciones aplicables y del beneficio de venta esperado, calculado todo ello según los valores indicados en la tabla 4.7 (el plan es mejor cuanto mayor es la función objetivo).

Tabla 4.12. Desglose de la función objetivo con plazos de entrega normales.

Línea	1	2	3	4	5	6
Pen. grad. colores (<i>u.a.</i>)	0,0	0,0	48,1	0,0	19,0	473,9
Cambios de tipo de hilera	0	1	2	0	0	1
Dism. número de hileras	1	0	0	0	0	1
Incr. número de hileras	0	0	1	0	0	1
Cambios de color	1	12	10	9	22	14
Cambios de avivaje	0	0	1	0	0	1
Cambios de lustre	1	0	1	1	0	1
Descontaminaciones	0	0	1	0	0	1
Toneladas con retraso	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0
Horas de producción útil	49,0	114,8	71,6	62,5	111,0	114,3
Horas de línea en espera	0,2	6,7	11,0	2,2	5,5	8,3
Horas de línea parada	73,3	1,0	39,9	57,8	6,0	0,0
Producción total (ton)	50,0	155,0	79,0	60,0	152,0	131,5
Coste medio (<i>u.a./ton</i>)	18,5	6,6	60,6	16,0	9,2	23,7
Pen. sobreocup. colorista	0,0					
Pen. por falta hileras	0,0					
Pen. por retrasos (<i>u.a.</i>)	55,5					
Pen. cambios inmediatos	n/a					
Funcion Objetivo (<i>u.a.</i>)	115.223					

En el diagrama de la figura 4.10 se indican los resultados correspondientes a la segunda situación. Comparando las tablas 4.13 y 4.12, se observa que el nuevo plan propone una carga más uniforme de las líneas introduciendo algunos cambios adicionales en las condiciones de trabajo, especialmente en lo que respecta a la ordenación de colores. El tiempo medio de proceso ha descendido respecto a la situación anterior.

En ambos casos, los valores de los términos de la función objetivo permiten identificar claramente distintos aspectos prioritarios para cada situación, que han dado lugar a asignaciones de pedidos a líneas de hilado y a secuencias de producción diferentes:

- En el primer caso (figura 4.9) es relativamente sencillo cumplir con los plazos de entrega, con lo que, una vez eliminados los posibles problemas por falta de hileras, la optimización se consigue minimizando los costes debidos a cambios de

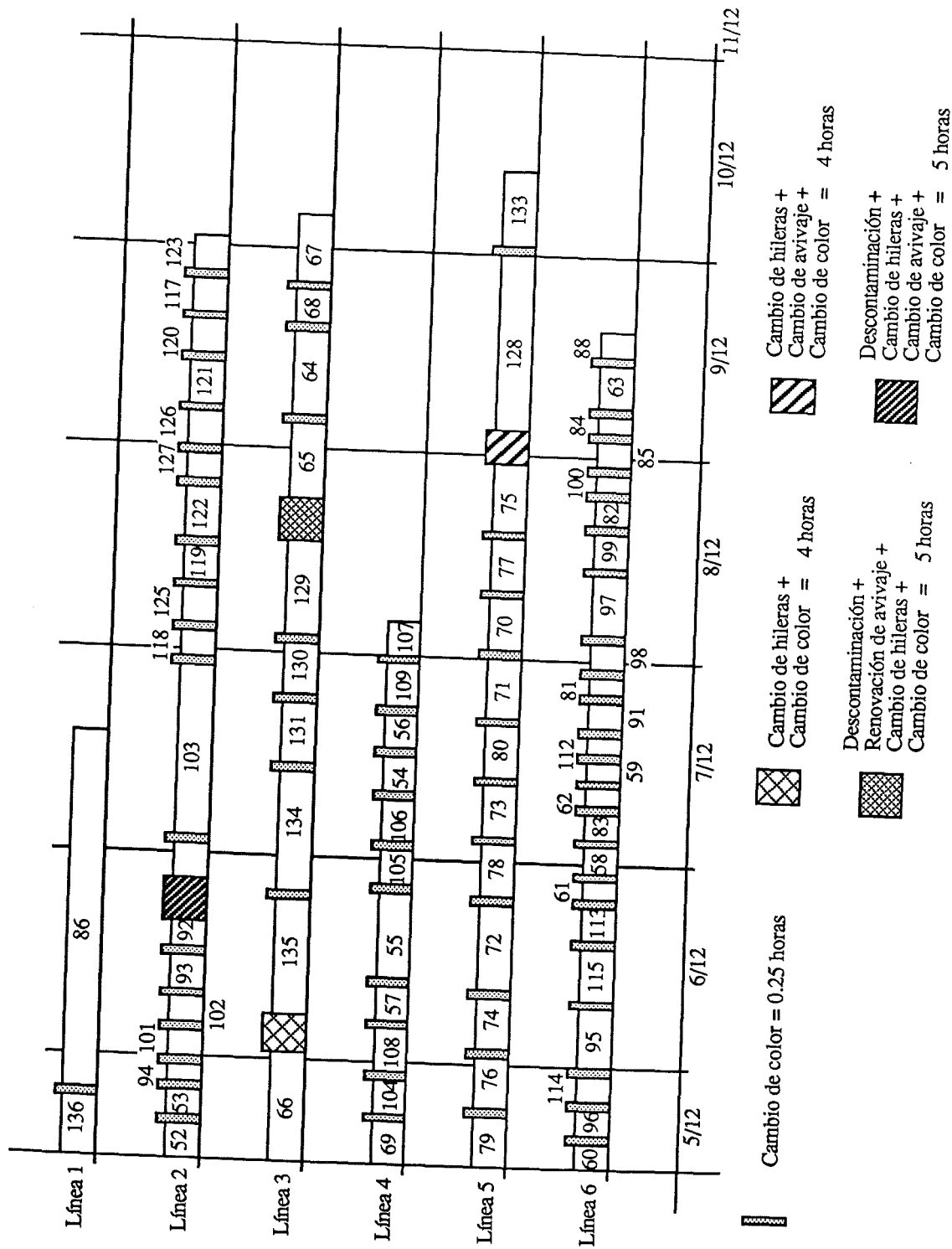


Figura 4.10. Asignación y secuenciación de pedidos en una situación de retraso en los plazos de entrega.

Tabla 4.13. Desglose de la función objetivo en una situación de retraso en los plazos de entrega.

Línea	1	2	3	4	5	6
Pen. grad. colores (<i>u.a.</i>)	0,0	528,1	369,5	0,0	0,0	3,6
Cambios de tipo de hilera	0	1	2	0	1	0
Dism. número de hileras	1	0	2	0	0	0
Incr. número de hileras	0	0	1	0	0	0
Cambios de color	1	18	9	9	12	19
Cambios de avivaje	0	1	1	0	1	0
Cambios de lustre	1	0	3	1	0	0
Descontaminaciones	0	1	1	0	0	0
Toneladas con retraso	40,0	57,0	82,5	60,0	141,0	115,0
Horas de producción útil	49,0	99,1	101,3	62,5	111,5	94,1
Horas de línea en espera	0,2	9,2	10,8	2,2	6,8	4,7
Horas de línea parada	69,0	10,0	6,2	53,6	0,0	19,5
Producción total (ton)	50,0	118,0	122,5	60,0	141,0	136,0
Coste medio (<i>u.a./ton</i>)	14,8	27,8	30,9	12,9	14,9	5,0
Pen. sobreocup. colorista	0,0					
Pen. por falta hileras	0,0					
Pen. por retrasos (<i>u.a.</i>)	111.211,5					
Pen. cambios inmediatos	n/a					
Función Objetivo (<i>u.a.</i>)	2.944					

condiciones de trabajo mientras se asegura una carga lo más uniforme posible entre las diferentes líneas de hilado.

Como era de esperar, el plan calculado para el segundo caso, donde el término de mayor peso en la función objetivo es el que hace referencia a los retrasos, no es el más adecuado para esta primera situación. Al utilizar la asignación y secuenciación correspondiente al segundo plan en las condiciones del primero, la función objetivo (beneficio) pasa a ser de 111.144 *u.a.* incluyendo 2.991 *u.a.* de penalización por retrasos sobre las fechas comprometidas. Este valor es inferior a las 115.223 *u.a.* del plan inicialmente calculado, donde la penalización por incumplimiento de los plazos de entrega es solamente de 55,5 *u.a.* El resultado sería el mismo aún sin contar las penalizaciones por retrasos: el coste asociado a los cambios de condiciones de trabajo no compensaría el beneficio esperado por un mejor reparto de pedidos entre las líneas.

- En el segundo caso, el principal motivo de penalización se debe a los incumplimientos en los plazos de entrega. A partir de los diferentes planes iniciales, siguiendo la estrategia de búsqueda propuesta, se descartan aquellos cambios que originan mayores penalizaciones por retrasos, obteniéndose un plan donde una mayor uniformidad de ocupación de las líneas y una secuencia de trabajo diferente

permiten reducir ligeramente la penalización global.

Si se hubiera utilizado el plan calculado para la primera situación, la función objetivo obtenida hubiera sido de 2.584 u.a. (con una penalización de 112.694 u.a. por retrasos en las fechas de entrega), mientras que el sistema propuesto permite obtener un plan con una función objetivo de 2.944 u.a. (con una penalización de 111.211 u.a. por retrasos).

Otras opciones: Para facilitar la utilización sistemática de estas herramientas de trabajo en una situación industrial, basadas en los procedimientos de identificación y cálculo que se han descrito hasta el momento, se ha desarrollado un entorno que permite, entre otras opciones:

- Obtener información directamente de una base de datos donde se mantiene actualizada la situación de las diferentes líneas de hilado, materias primas, pedidos, *stocks*, equipos auxiliares y, en resumen, de todos los datos que se utilizan durante la planificación.
- Actualizar un plan de producción de acuerdo con la situación real de los recursos productivos y la nueva situación de mercado (pedidos nuevos, pedidos anulados, etc.). En este caso se ha optado por introducir un sistema de *reactive scheduling*, que penaliza los cambios de asignación o secuencia de trabajos que estuvieran previstos para las próximas horas.
- Volcar la información referente a las decisiones de planificación tomadas sobre una base de datos que permitirá la realización automática de las órdenes de fabricación.
- Introducir cambios manuales sobre el plan, y simular sus efectos sobre ocupación de recursos, función objetivo, etc. Para poder tomar la decisión de realizar un determinado cambio manual, ha sido necesario también desarrollar procedimientos para sintetizar toda la información relevante.
- Utilizar las herramientas de optimización de forma independiente, para mejorar aspectos específicos del plan y poder dirigir los cambios según el criterio del usuario, que en un momento determinado puede ser diferente al establecido a través de la función objetivo.
- Modificar fácilmente las diferentes penalizaciones aplicadas a cada objetivo de la optimización, y comprobar los efectos de estos cambios sobre la evaluación de los diferentes planes intermedios. Este aspecto es especialmente importante para poder realizar el ajuste de los pesos de cada factor: el plan que, para una situación determinada, se identifique como óptimo por acuerdo entre los diferentes departamentos de la empresa, debe ser también el que presente una mejor función objetivo.