

**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

## 5. Diseño integrado: Incorporación de la planificación en el proceso de diseño

### 5.1. Introducción

En el capítulo 3 se ha descrito una metodología muy eficiente para calcular las dimensiones óptimas de los equipos a instalar en una planta discontinua multiproducto, y procedimientos para solventar el problema de síntesis, mediante la minimización de una función objetivo que contempla los costes asociados a la inversión (que se consideran proporcionales a los costes de los equipos a instalar) y las pérdidas derivadas del incumplimiento de la demanda (los costes de producción se asumen proporcionales a dicha producción). De este razonamiento se obtenía la función objetivo descrita por la expresión (3.14):

$$\min f(Q_i, V_j, R_k) = \sum_j m_j^o m_j^i \cdot [\alpha_j + \beta_j \cdot V_j^{\gamma_j}] + \sum_k m_k^o m_k^i \cdot [\alpha_k + \beta_k \cdot R_k^{\gamma_k}] + \sum_i \beta_i [D_i - Q_i]$$

Sin embargo, al analizar el problema de planificación de la producción, se ha podido comprobar que aparecen costes que no son proporcionales a las cantidades producidas, sino que dependen de la forma de producción, como por ejemplo:

- Costes de almacenaje (inventario).
- Costes de cambio de producto, originados tanto por las tareas adicionales de limpieza que implican como por las mermas de producto y pérdidas de producción durante el tiempo empleado en las mismas.
- Costes asociados al tiempo perdido por paradas de los equipos (previstas o imprevistas).
- Costes de instalación y funcionamiento de los servicios generales: a pesar de que las cantidades totales requeridas de cada servicio general (*kg* totales de vapor, energía eléctrica, etc.) son básicamente proporcionales a las cantidades fabricadas de cada producto, los perfiles de utilización en función del tiempo (“potencia máxima requerida” y evolución de la “potencia instantánea requerida”) dependen en gran medida del plan de producción y de los solapamientos que provoca.

El plan de producción que se establezca para cada situación concreta debe minimizar todos estos costes bajo una serie de restricciones, entre las que destacan las que hacen referencia a la disponibilidad de los recursos productivos. Por tanto, estos costes también deberán considerarse en la etapa de diseño, a fin de poder evaluar la conveniencia de añadir o eliminar recursos en función de las mejoras en el plan de

trabajo que se pueden derivar de tales decisiones.

También se ha indicado anteriormente (página 36) que la utilización de campañas de un solo producto, tal y como se suele presuponer en los procedimientos de diseño de plantas multiproducto, no siempre es la mejor estrategia posible, y que en determinadas ocasiones la combinación adecuada de tareas y productos podría permitir un mejor aprovechamiento de los equipos en el tiempo con los consiguientes aumentos de productividad.

Finalmente, en todo diseño debe realizarse una evaluación de la capacidad de la planta para adaptarse de forma eficiente a diversas condiciones de fabricación (flexibilidad).

La integración del sistema de planificación de la producción en el procedimiento de diseño permitirá la minimización de costes totales, tanto de amortización de capital como de operación real de la planta. De esta forma, considerando todos los aspectos anteriores, se deberá llegar a un compromiso que, evitando costes de inversión excesivos, permita hacer frente al máximo número de situaciones posible con la máxima productividad y, por consiguiente, consiga mejorar la rentabilidad de la inversión.

## 5.2. Antecedentes

La ampliación de la formulación indicada en la sección 3.5 con restricciones que hagan referencia a condiciones reales de operación ya ha sido considerada en varios estudios:

- Vaselenak y colaboradores [102] observan que, cuando no todos los productos requieren la utilización de los mismos equipos, es adecuado plantearse en el momento del diseño los ahorros de tiempo de proceso que se pueden obtener a través de una planificación adecuada, considerando agrupaciones de productos "compatibles" (campañas). De esta forma, determinados casos de diseño de plantas multipropósito pueden plantearse a través de formulaciones multiproducto donde se hayan tenido en cuenta las mencionadas agrupaciones. En el caso en el que se propongan varias agrupaciones posibles, los autores sugieren un procedimiento que permite considerarlas todas simultáneamente y decidir después en un único paso de optimización cuáles son las agrupaciones más adecuadas, cuánto tiempo se trabajará con cada una de ellas y las dimensiones de los equipos necesarias para poder operar de esta forma.
- Birewar y Grossmann [6] indican que se puede simplificar de forma notable la resolución del problema de planificación escogiendo como función objetivo la minimización del tiempo de ciclo, obteniendo resultados similares a los calculados minimizando directamente tiempo total de proceso, especialmente si el horizonte de planificación es a largo plazo. Esta simplificación permite introducir ciertas

restricciones dentro de la formulación del problema de diseño que reflejan las decisiones de planificación óptimas bajo ciertas reglas de transferencia de material entre etapas consecutivas. De todas formas, la aplicabilidad del procedimiento propuesto en [6] a casos industriales es dudosa, ya que implica la utilización repetitiva de un único tipo de campaña formada por lotes de todos los productos, de acuerdo con las demandas previstas, lo cual no suele ser la solución más adecuada para una situación real.

Posteriormente, los mismos autores [8] amplían la formulación para tomar decisiones sobre la estructura de síntesis, especialmente por lo que respecta a la incorporación de equipos en paralelo y a la combinación de tareas consecutivas, utilizando las mejores soluciones de planificación a corto plazo obtenidas para generar un plan a largo plazo mediante un procedimiento propuesto por ellos mismos [7].

- Cerdá y colaboradores [11] proponen identificar cada campaña multiproducto con un producto característico de la misma, con lo que eliminan la necesidad de incluir restricciones sobre la duración total de las campañas. Por otra parte, asumiendo que los tamaños de lote serán semejantes para todos los productos (como es frecuente en plantas multiproducto) y que la etapa limitante de estos tamaños no variará durante el proceso de optimización, y limitando las decisiones sobre la estructura de la planta a la introducción de un único equipo en paralelo fuera de fase en la etapa con un mayor tiempo de ocupación, los autores consiguen simplificar notablemente la formulación del problema.
- La complejidad matemática del problema se reduce, tal como ocurre en el caso de diseño sin consideraciones sobre planificación de la producción [104], si los tamaños de los equipos a instalar están normalizados (discretos), ya que entonces es posible trabajar con un modelo lineal. Utilizando la misma estrategia que Birewar y Grossmann [6], Voudouris y Grossmann [105] desarrollan un modelo que permite introducir los costes de inventario en la función objetivo y calcular hasta qué momento es rentable reducir las penalizaciones por cambio de producto a costa de aumentar los niveles de inventario, para determinar finalmente cuáles son los equipos más adecuados para poder desarrollar una secuencia óptima de campañas que haga mínima la suma de costes y penalizaciones considerada.
- Shah y Pantelides [91] analizan la utilización de equipos de almacenaje intermedio para romper la secuencia de producción y permitir una mayor flexibilidad en el momento de crear campañas. De esta forma se pueden lograr diseños aún más eficientes, a costa de un almacenamiento prolongado de productos intermedios. Al analizar cada zona por separado, el procedimiento permite además tratar fácilmente recetas complejas (caso multipropósito), donde se presentan ramificaciones o mezclas en etapas intermedias.
- Crooks y colaboradores [15] plantean la integración de varias herramientas desarrolladas para el estudio de algunos de los problemas que se presentan en las

plantas discontinuas (diseño, planificación, integración energética, etc.), para lo cual se deben utilizar los mismos modelos y sistemas de información en todas estas herramientas. En este estudio se propone el modelo desarrollado por Kondili y colaboradores [46] comentado en la sección 4.4.3 para abordar también el problema de síntesis y diseño de la planta, dado que entonces dicho problema se reduce a una optimización no lineal entera, aunque no se indica la formulación correspondiente ni una metodología de solución.

### 5.3. Descripción de la solución propuesta

La solución que se propone al problema planteado considera una optimización multinivel que integra por un lado los procedimientos de diseño y de planificación comentados hasta el momento, y por otro la posibilidad de una intervención experta y/o supervisión por parte del ingeniero de diseño, a través de un sistema interactivo.

El algoritmo de optimización coordina la interacción de los módulos de diseño y de planificación mediante la utilización de variables comunes: el tiempo sobrante y las demandas a cubrir.

1. El usuario introduce las condiciones básicas nominales en las que se basa el diseño (sección 3.1), y las restricciones que se desean considerar (por ejemplo, los equipos ya existentes si se trata de un caso de remodelación, o las posiciones en las que se desea o no introducir equipos de almacenaje intermedio).

El módulo de diseño calculará una planta con las dimensiones de los equipos de proceso óptimas para las capacidades de producción requeridas, y con la información restringida a que tiene acceso. En condiciones normales de trabajo, este diseño responderá a un tiempo sobrante nulo sobre el horizonte previsto ( $SP = 0$ ), y a una producción menor o igual a la demanda en función de la rentabilidad de las diferentes inversiones.

2. La planta diseñada se introducirá como dato en el módulo de planificación, junto con la información referente a la estacionalidad de la demanda, los costes de inventario, los tiempos previstos para cambios de productos y/o paradas en la producción, el calendario de trabajo, etc.

Los sistemas de actuación interactiva del módulo de planificación permitirán al usuario modificar en caso necesario las estrategias de producción, la disponibilidad de diferentes recursos y, en general, las condiciones de trabajo de la planta.

Como resultado se obtendrá la siguiente información:

- Una lista con las secuencias de fabricación (campañas) más eficientes.
- La organización de campañas más adecuada para cubrir los perfiles de demanda propuestos. En caso de que no sea posible cubrir la demanda prevista, se identificarán los productos y las cantidades a producir de forma

que se obtenga la mayor rentabilidad y eficacia bajo unas penalizaciones de producción mínimas, según los factores y los parámetros introducidos en la función objetivo de planificación.

- Los niveles máximos requeridos para los diferentes servicios generales.
- Una identificación de los cuellos de botella más significativos.
- Una lista de diferentes alternativas factibles con sus correspondientes índices de eficiencia (función objetivo de planificación) como la indicada en la tabla 5.1. En esta lista se incluirán algunas condiciones de trabajo típicas, y aquellas que el usuario haya especificado adicionalmente.
- El tiempo adicional o sobrante para cada una de las alternativas indicadas respecto al horizonte total previsto ( $H$ ).

**Tabla 5.1.** Ejemplo de soluciones alternativas proporcionadas por el sistema de planificación de la producción.

Estrategia de Producción	Beneficios Producción	Produc. Final	Tiempo Ocup.	Invent. Máx.	Retr. Máx.
Cubrir demanda (NIS/ZW)	$Benef_1$	$\{P_{1,i}\}$	$T_1$	$\{I_{1,i}\}$	$\{\mathcal{R}_{1,i}\}$
Cubrir demanda (UIS/ZW)	$Benef_2$	$\{P_{2,i}\}$	$T_2$	$\{I_{2,i}\}$	$\{\mathcal{R}_{2,i}\}$
Cubrir demanda (MIS)	$Benef_3$	$\{P_{3,i}\}$	$T_3$	$\{I_{3,i}\}$	$\{\mathcal{R}_{3,i}\}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$\max_k \{I_{k,i}\} \leq I_i^{max (a)}$	$Benef_k$	$\{P_{k,i}\}$	$T_k$	$\{I_{k,i}\}$	$\{\mathcal{R}_{k,i}\}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
No parar (NIS/ZW)	$Benef_{m-1}$	$\{P_{m-1,i}\}$	H	$\{I_{m-1,i}\}$	$\{\mathcal{R}_{m-1,i}\}$
No parar (UIS/ZW)	$Benef_m$	$\{P_{m,i}\}$	H	$\{I_{m,i}\}$	$\{\mathcal{R}_{m,i}\}$

(a) A especificar por el usuario.

3. Finalmente, para cada conjunto de condiciones de operación se inicia un proceso iterativo (figura 5.1) en el que, mediante la utilización del tiempo total requerido y de las demandas de cada producto cubiertas en la etapa de planificación, se ajustan las dimensiones de los diferentes equipos para obtener la producción deseada en el horizonte de tiempo fijado, analizando la rentabilidad de las inversiones planteadas respecto a los beneficios esperados de producción. La secuencia propuesta de acciones a realizar dentro de este bucle será la siguiente [21, 78]:

- (a) El usuario especifica las condiciones de trabajo correspondientes al caso a estudiar.

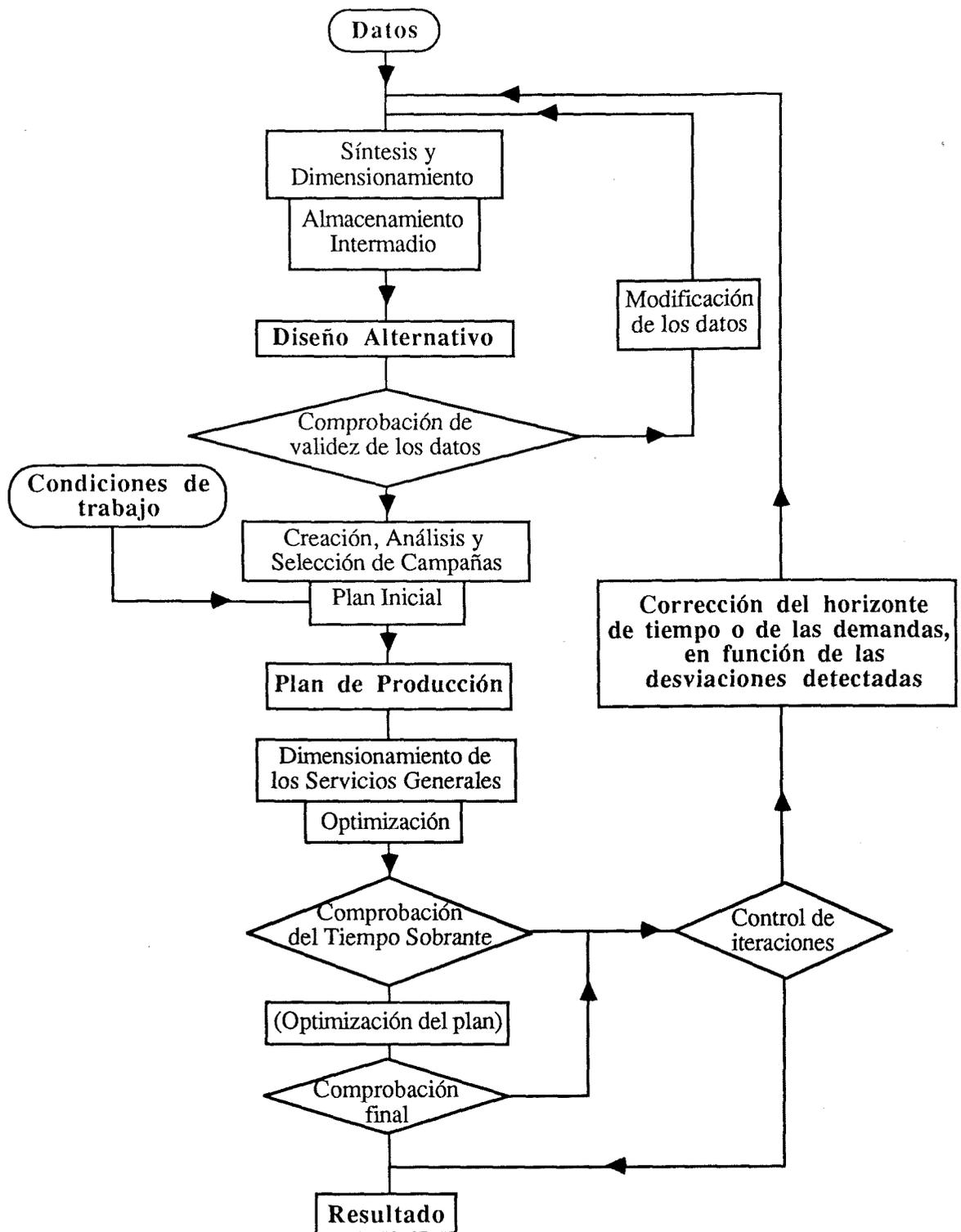


Figura 5.1. Relación entre los módulos de Diseño y de Planificación.

- (b) Se calcula el mejor plan de producción para la planta calculada en las condiciones de trabajo y el escenario de producción especificados. En la mayoría de las situaciones industriales, el algoritmo de planificación inicial descrito en la sección 4.7.2 permite obtener un plan de producción adecuado a la información disponible y de la precisión utilizada durante las etapas de cálculo de los equipos a instalar. Se ha considerado que solamente es necesario entrar en procedimientos de optimización como el descrito en la sección 4.7.3 una vez se ha alcanzado un diseño adecuado respecto al plan inicial.
- (c) De los resultados de planificación se realizan correcciones sobre el horizonte de tiempo utilizado en el módulo de diseño. La corrección se puede realizar asumiendo que la diferencia entre el tiempo supuesto por el módulo de diseño y el tiempo realmente necesario para cubrir la demanda según el módulo de planificación se mantendrán en la misma proporción: si para cubrir la demanda es necesario trabajar  $H^{p,add}$  horas extras sobre  $H$  horas disponibles, para recalcular el diseño se utilizará un horizonte de:

$$H^{s,*} = \frac{H^s}{(H^p + H^{p,add})/H^p} \quad (5.1)$$

- (d) Una vez efectuadas las correcciones oportunas, se calculará un nuevo diseño que permitirá compensar, al menos en gran parte, las diferencias entre las hipótesis de diseño y las condiciones reales de trabajo supuestas para el caso analizado.
- (e) Este nuevo diseño se volverá a comprobar en el sistema de planificación. Si los resultados no son los esperados, se volverá al punto 3c.
4. Del estudio anterior se obtendrá un diseño adecuado para cada una de las diferentes situaciones de fabricación planteadas, y la eficacia con que responde a dichas condiciones. Los costes calculados al elaborar el plan de producción (inventarios, cambios de producto, etc.) pueden utilizarse para analizar la conveniencia de diseños con mayores costes de instalación.

En un caso multiproducto básico, donde las etapas discontinuas son preponderantes, todos los productos siguen estrictamente la misma receta y presentan en cada etapa factores de tamaño y tiempos de proceso similares, el algoritmo descrito permite llegar a la solución en un número reducido de iteraciones, como se puede observar en el ejemplo resuelto en la sección 5.5.1.

Cuando la estructura del problema es más compleja, el proceso de convergencia descrito debe adaptarse para poder seguir adecuadamente la relación entre las diferentes variables de diseño y de planificación:

- Una de estas situaciones se produce cuando los tiempos de proceso no son constantes. Las variaciones de los tiempos de ciclo, que son función de la capacidad

de los equipos, provocan que un diseño ( $D1$ ) calculado para un horizonte de tiempo  $H1$ , que en principio debería tener mayor productividad que otro diseño ( $D2$ ) calculado para un horizonte  $H2$  si  $H2 > H1$ , pueda presentar finalmente una productividad menor al ser evaluado por el módulo de planificación, si no se ajusta adecuadamente a la duración de los periodos de trabajo. En consecuencia los valores de  $H^{p,add}$  no seguirán una función monótona del tiempo de diseño y será necesario comprobar más puntos para identificar el mejor diseño.

- Si la estructura de la planta, las características de los productos o las condiciones de operación previstas son más generales, algunos de los factores (costes) que intervienen en el proceso de planificación pueden afectar de forma diferente a cada producto, alterando la relación entre productividades establecida por el módulo de diseño. En este caso, el sistema descrito, que actúa sobre una única variable, puede dejar de detectar los diseños más adecuados para la situación planteada.
- Si no existen equipos claramente dominantes en cuanto a costes, tiempos o capacidades, pueden existir soluciones al problema de diseño con costes de inversión muy similares y que presenten capacidades relativamente diferentes en los equipos instalados. Este es el caso del ejemplo propuesto por Robinson y Loonkar [87] que se vuelve a utilizar en la sección 5.5.2. La falta de sensibilidad de una función objetivo que atiende únicamente a los costes de los equipos de proceso contrasta en estos casos con la sensibilidad propia del proceso de planificación, que utiliza variables no continuas. La introducción de nuevos términos en la función objetivo, que reflejen las condiciones de trabajo reales, permitirá establecer criterios objetivos para distinguir entre las diferentes opciones de diseño pero de nuevo originará una relación no monótona de  $H^{p,add}$  frente a  $H^s$  al comprobar los diferentes diseños alternativos.

Para solucionar este y otros casos, se han incorporado alternativas a la relación (5.1) que pueden agilizar el proceso de convergencia y una serie de reglas que determinan el procedimiento a utilizar:

- Una alternativa consiste en modificar las cantidades a cubrir en el módulo de diseño  $D_i^{s,*}$  o los costes correspondientes  $a_i^{s,*}$ , a partir de los resultados del análisis de las diferentes campañas. De esta forma se pueden conseguir diseños en los que la prioridad relativa de una cierta campaña se ajuste a lo esperado por el usuario, de acuerdo con los resultados obtenidos durante la planificación.

Por ejemplo, las restricciones aplicables a la disponibilidad de los servicios generales pueden provocar que los tiempos de ciclo reales sean superiores a los calculados en el módulo de diseño y, en consecuencia, sea necesario reservar más tiempo para su producción, pero solamente para alguno de los productos, con lo que la solución más eficaz puede ser aumentar la capacidad de producción referente a dichos productos. La corrección a aplicar entonces sobre las demandas a cubrir

será función de la productividad esperada por el módulo de diseño y la realmente obtenida al realizar el análisis de la campaña del producto correspondiente:

$$D_i^{s,*} = D_i^s \cdot \mathcal{F} \left( \frac{B_i^s/T_i^s}{(\text{productividad})_i^p} \right) \quad (5.2)$$

- Desde un punto de vista matemático, todo proceso de asignación presenta características de problema entero. Por ello, para una misma capacidad de los equipos, la relación entre la demanda y el tiempo necesario para cubrirla presenta discontinuidades, en función del número de lotes (valor entero) que sea necesario colocar como se observa en la figura 5.3. En consecuencia, el proceso de convergencia degenerará cuando el tiempo extra necesario  $H^{p,add}$  (positivo o negativo) llegue a ser del mismo orden de magnitud que los tiempos de ciclo.

Si el nivel de precisión con que se desea trabajar lo exige (lo cual no es lo habitual a nivel de diseño preliminar), al llegar a estos valores de  $H^{p,add}$  es recomendable modificar el proceso y calcular  $H^{s,*}$  (o  $D_i^{s,*}$ ) corrigiendo  $H^s$  ( $D_i^s$ ) en la misma proporción demanda no cubierta (si en la planificación se detecta un exceso de capacidad,  $H^s$  debe aumentar o  $D_i^s$  disminuir).

- El resultado del proceso de planificación depende de una gran cantidad de variables y factores incorporados al modelo, que reflejan los efectos de diferentes condiciones de operación, escenarios económicos, políticas de empresa, etc. En determinadas circunstancias, estas variables pueden provocar una evolución inesperada del proceso de convergencia, que es posible evitar utilizando procedimientos sencillos de interpolación y extrapolación que permiten corregir los datos que determinan el siguiente diseño en función de los resultados de las iteraciones anteriores.

## 5.4. Flexibilidad e incertidumbre

Una de las ventajas más importantes de las plantas multiproducto que operan de forma discontinua es su potencial flexibilidad para adaptarse a diferentes condiciones de mercado y/o de proceso. Sin embargo, el ciclo de diseño de nuevas instalaciones de fabricación suele durar varios meses, por lo que las condiciones económicas y de mercado, que normalmente presentan alto grado de incertidumbre, pueden variar sustancialmente en este plazo y tener un impacto importante en la rentabilidad de las nuevas instalaciones.

Si se dispone de modelos de cuantifiquen la incertidumbre, es posible aplicar procedimientos de cálculo que permiten aumentar la probabilidad de realizar la mejor inversión. Los sistemas de decisión más utilizados se basan en uno o varios de los siguientes principios:

- Optimizar la inversión para diferentes escenarios de funcionamiento. A partir del conjunto de resultados obtenidos, se puede tomar la alternativa que cubra de la forma más eficiente posible los escenarios que se consideran más probables [50].
- Determinar la mejor solución que cubra todas las posibilidades planteadas [92].
- Considerar unos intervalos continuos de condiciones posibles para cada una de las variables de valor incierto y calcular los intervalos en los que se deberán situar las decisiones [82]. Posteriormente, deberá especificarse la decisión final.

Aplicando cualquiera de estos procedimientos es frecuente descubrir que se puede conseguir un aumento importante en la flexibilidad de la planta asumiendo ciertos costes adicionales (por ejemplo, instalando equipos de almacenaje intermedio en determinados puntos del proceso, aumentando ligeramente la capacidad de ciertos equipos limitantes, etc.) [66]. Sin embargo, para obtener resultados fiables es necesario recurrir a simulaciones detalladas de las condiciones de operación que implican cada uno de los casos hipotéticos planteados, ya que la complejidad de las situaciones industriales (número de variables y el grado de interrelación entre ellas, políticas de empresa, etc.) puede dar lugar a errores importantes si se utilizan simplificaciones que impliquen agregación de equipos y productos, cálculo de capacidades globales, etc. Por ejemplo, en ninguno de los estudios citados en esta sección se plantean decisiones que afectan a la política de funcionamiento de la planta (turnos, niveles de servicios generales, etc.).

Si se espera un cambio progresivo de las condiciones de mercado (demanda, precios, productos, etc.), se puede establecer un plan de inversiones para modificar también progresivamente las características de la planta, a fin de que en cada momento se obtenga la máxima rentabilidad global. Esta situación, de una extraordinaria importancia práctica, implica considerar simultáneamente una problemática de:

- Incertidumbre: al no poder asegurar la evolución del mercado se plantearán varios escenarios posibles.
- Flexibilidad: uno de los objetivos es que la planta diseñada pueda trabajar de forma eficiente en las sucesivas situaciones previstas.
- Previsión de futuras modificaciones en el diseño: aplicar la mejor solución para una situación determinada puede ser contraproducente en el futuro.

El caso que se plantea cuando se conoce la evolución futura de las demandas y los precios de los diferentes productos ha sido analizado por Sahinidis y Grossmann [90], que proponen una formulación matemática que reduce el problema a una optimización lineal entera multiperiodo, resoluble a mediante *software* comercial de optimización. Norton y Grossmann [65], en un reciente estudio, han extendido dicha formulación para contemplar el caso en el que el proceso sea capaz además de aceptar diferentes materias primas. Sin embargo, la resolución del problema matemático planteado requiere en ambos casos notables simplificaciones que incluyen, por ejemplo, la utilización de

factores globales de capacidad del proceso.

Los diferentes condicionantes prácticos mencionados al describir los procedimientos síntesis, diseño y planificación de la producción que se proponen en esta tesis pueden alterar en mayor o menor grado las conclusiones de cualquier estudio preliminar, especialmente cuando el número de productos a fabricar es elevado, las penalizaciones por inventarios, cambios de producto, retrasos, etc. son importantes y/o diferentes políticas de empresa regulan algunas de las condiciones de operación. Si además se requiere analizar y comparar las respuestas frente a diferentes escenarios de trabajo, la magnitud del problema crece significativamente.

La sistemática descrita en este capítulo permite analizar diferentes situaciones hipotéticas de mercado o de disponibilidad de equipos teniendo en cuenta los efectos de todos estos factores sin necesidad de manejar complejas formulaciones matemáticas, llegando rápidamente a conclusiones prácticas sobre un determinado diseño, atendiendo a su viabilidad, flexibilidad y facilidad para aceptar futuras remodelaciones.

Los algoritmos indicados permiten incorporar de forma sencilla parámetros que cuantifican la flexibilidad (Grossmann y Straub [33, 95]) facilitando la estimación del rendimiento de la inversión en las situaciones más probables, o bien introducir dentro del propio modelo de planificación los elementos que provocarán situaciones imprevistas de acuerdo con el modelo de incertidumbre asumido (Djavidan [17]).

## 5.5. Ejemplos de aplicación

### 5.5.1. Caso C1. Basado en un ejemplo propuesto por Birewar y Grossmann

El siguiente ejemplo está basado en la situación propuesta por Birewar y Grossmann [6], donde se plantea el diseño de una planta para la fabricación de dos productos. Los datos correspondientes se reflejan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Descripción del problema.

2 Productos - 3 Equipos		
	Producto	
	A	B
Demanda (kg)	40.000	20.000
Horizonte de tiempo	6.000	

Producto	F. Tamaño		
	$S_{i1}$	$S_{i2}$	$S_{i3}$
A	2,0	3,0	4,0
B	4,0	6,0	3,0

Producto	Tiempos		
	$t_{i1}$	$t_{i2}$	$t_{i3}$
A	8	20	8
B	16	4	4

Coef.	Equipo		
	1	2	3
Coste	0	0	0
$\alpha_j$	250	250	250
$\beta_j$	0,60	0,60	0,60

De una simple inspección visual de estos datos se puede realizar el siguiente razonamiento:

- Se deberán realizar el mismo número de lotes de cada producto (la demanda de B es el doble, pero sus factores de tamaño son la mitad para dos de las tres etapas, y todas las etapas tienen los mismos factores de coste).
- Existe una gran diferencia de tiempos de proceso entre una de las etapas y las otras dos, y la etapa limitante de tiempo de proceso es diferente para cada producto.

- No hay datos sobre costes ni tiempos de limpieza por cambio de producto.

Por tanto, las campañas mixtas **A-B-A-B...** probablemente permitirán aprovechar de forma mucho más eficiente la capacidad de producción instalada que una alternancia de campañas de un producto único.

En la primera columna de la tabla 5.3 se reflejan los resultados obtenidos utilizando únicamente el módulo de diseño, que asume campañas de un solo producto y no considera las pérdidas (o ganancias) de tiempo asociadas a cambios de producto (figura 5.2.a). La segunda columna se ha obtenido modificando los tiempos de operación de forma adecuada para considerar la campaña mixta mencionada anteriormente (figura 5.2.b). Del mismo modo, la tercera columna refleja los resultados obtenidos considerando los tiempos equivalentes para en caso de trabajar en campañas mixtas y permitiendo el almacenaje de productos en los equipos de proceso y la cuarta columna se ha calculado considerando que el almacenamiento intermedio no limita la productividad (figuras 5.2.c y 5.2.d respectivamente).

**Tabla 5.3.** Resultados obtenidos con el módulo de diseño preliminar.

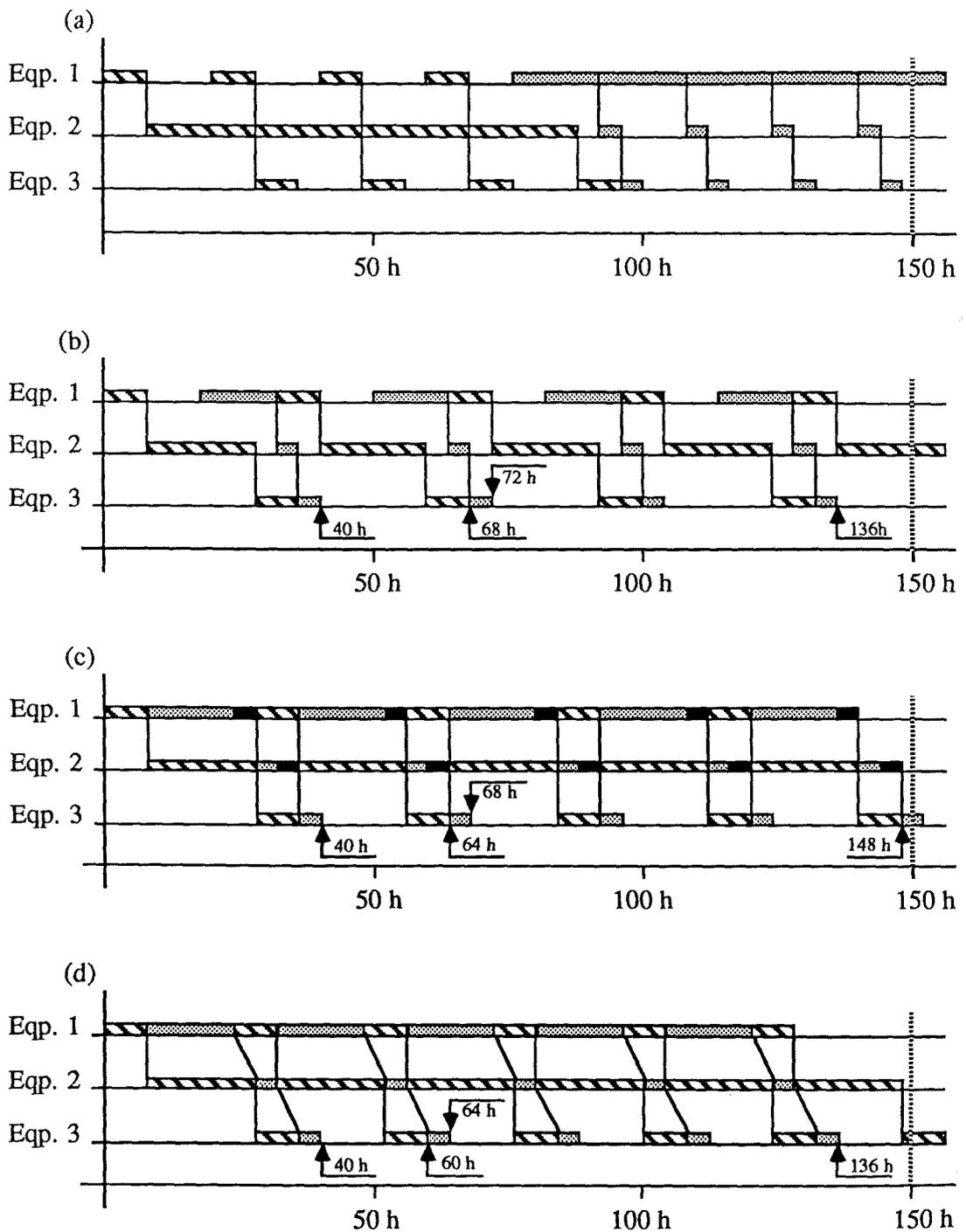
	Forma de trabajo			
	A-...-B-... ZW/NIS/UIS	A-B-... ZW	A-B-... NIS	A-B-... UIS
$V_1$	480,0	426,7	373,4	320,0
$V_2$	720,0	640,1	560,0	480,0
$V_3$	960,0	853,4	746,8	640,0
$B_A$	240,0	213,3	186,7	160,0
$B_B$	120,0	106,7	93,4	80,0
F. Obj.	38.500	35.875	33.113	30.186
CPU <sup>(a)</sup>	0,13	0,09	0,06	0,06

<sup>(a)</sup> Segundos sobre SUN SparcStation 1.

Para realizar un estudio comparativo de la solución propuesta, inicialmente se han supuesto costes de limpieza nulos (no hay datos en el ejemplo original), y no se ha contemplado la posibilidad de almacenar productos intermedios. Aplicando el procedimiento indicado en este capítulo, se han obtenido los resultados reflejados en la segunda columna de la tabla 5.5. El proceso iterativo ha sido el siguiente:

1. Diseño sobre 6.000 horas.

- (a) El primer diseño proporciona los resultados indicados en la primera columna de la tabla 5.3.



**Figura 5.2.** Diferentes estrategias de producción: a) Campañas de un solo producto. b) Campañas mixtas sin tiempos de espera (ZW). c) Campañas mixtas con almacenaje en los equipos de proceso (NIS). d) Campañas mixtas disponiendo de suficiente capacidad de almacenaje para todos los productos intermedios (UIS).

- (b) Sobre estos resultados, el módulo de planificación identifica las ventajas de la campaña **A-B** y la utiliza, obteniendo la producción requerida en 5.352 horas. Sobran por tanto 648 horas que, aplicando la relación 5.1, permiten calcular un horizonte de tiempo de 6.726 horas para la siguiente iteración.

2. Diseño sobre 6.726 horas.

- (a) En el segundo diseño se obtiene una función objetivo de 35.948 *u.a.*
- (b) Aplicando sobre este diseño el módulo de planificación, se observa que no queda tiempo sobrante útil para introducir nuevos lotes, pero que existe un exceso de capacidad de producción del 0,09%, lo cual, proporcionalmente, equivale a 6 horas de producción. Si el criterio de convergencia es suficientemente estricto, se realizará un nuevo cálculo con un horizonte de tiempo para la etapa de diseño de 6.732 horas.

3. Diseño sobre 6.732 horas.

- (a) Con el tercer diseño se obtiene una función objetivo de 35.930,6 *u.a.*
- (b) El módulo de planificación detecta un exceso de capacidad equivalente al 0,002%, (0,1 horas de producción), lo cual se considera suficientemente exacto.

Se observa que la solución final es ligeramente superior a la obtenida por Birewar y Grossmann (reproducidos en la primera columna de la misma tabla), aunque los tamaños de lote utilizados son los mismos. La eficacia del algoritmo propuesto también es superior.

Estos resultados confirman que es mucho más eficiente la utilización de campañas mixtas **A-B**. El procedimiento propuesto analiza también las campañas **B-A**, concluyendo que, aunque son idénticas a las anteriores, necesitan más tiempo inicial para su puesta en marcha, por lo que son descartadas.

Los resultados anteriores no coinciden exactamente con la segunda columna de la tabla 5.3 debido a que:

- En la estrategia de diseño no se ha considerado el tiempo de puesta en marcha. En la figura 5.2.b se observa que el primer lote de "producto **AB**" se obtiene después de 40 horas, y no después de 32 horas (tiempo de ciclo de **AB**), por lo que en la puesta en marcha se pierden 8 horas.
- El número de lotes a fabricar debe ser un valor entero, por lo que durante la planificación sobran otras 8 horas que no pueden utilizarse para colocar un nuevo lote.

Utilizando un horizonte de tiempo de 5.984 horas para fabricar el “producto” **AB** (6.000 horas originales menos 16 horas perdidas), el módulo de diseño preliminar obtiene la misma solución (función objetivo de 35.931 *u.a.*). También es posible realizar el cálculo considerando la parte proporcional de producción efectuada con las 8 horas sobrantes (en las que no es posible colocar un lote completo), utilizando un horizonte de tiempo de 5.992 horas en el módulo de diseño, que calcula entonces una solución ligeramente mejor (función objetivo de 35.904 *u.a.*).

El problema propuesto es muy sencillo (los tiempos de proceso son constantes, no hay tareas semicontinuas y los factores de tamaño de los diferentes productos son proporcionales), por lo que se hubiera podido llegar a los resultados anteriores a través de un cálculo manual. Para valorar la utilidad del procedimiento de cálculo indicado en esta tesis, sobre este caso “base” se han introducido una serie de variaciones en las condiciones de funcionamiento, que han permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- En el caso C1.2 se ha supuesto que las 6.000 horas de horizonte de tiempo disponible se obtienen al trabajar durante 40 periodos de 150 horas ininterrumpidas (una semana de 168 horas que incluye una parada de 18 horas para limpieza y mantenimiento, durante la cual no deben quedar lotes de producción inacabados). En ese caso se deberán considerar tiempos de puesta en marcha al principio de cada periodo (semana), y mantener la precaución de no incluir lotes adicionales al final. Realizando los cálculos correspondientes se observa que se deberán instalar equipos de mayor capacidad, encareciendo la inversión un 10% aproximadamente, para compensar estas pérdidas de tiempo.
- A partir de la situación anterior, en el caso C1.3 se plantea la posibilidad de utilizar los propios equipos de proceso como almacenaje intermedio, lo cual, como se observa en la figura 5.2.c, permitiría introducir un lote adicional en cada periodo de producción. Como consecuencia, aumenta la ocupación de la planta y se pueden reducir las capacidades de los equipos instalados, con un ahorro en costes de inversión de un 7% aproximadamente.
- El caso C1.4 considera estacionalidad en la demanda de producto **B**, según la tabla 5.4, manteniendo inalterada la cantidad global a cubrir. En dicha tabla se ha definido el periodo a “medio plazo” como 4 periodos a “corto plazo”.

**Tabla 5.4.** Caso C1.4. Distribución temporal de la demanda.

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_B$ (kg)	1.500	500	500	1.500	1.000	2.000	2.000	3.000	4.000	4.000

Al no existir otro tipo de restricciones, el diseño final es idéntico al obtenido en el caso anterior (excepto por cuestiones de redondeo). La estacionalidad se soluciona aumentando los *stocks* de producto **B** durante los periodos con menor demanda.

Los tiempos no operativos también son los mismos, aunque distribuidos de forma diferente en los diversos periodos a medio plazo.

- Por último, en el caso C1.5 se introducen limitaciones de *stock* de **B**, a 3.000 kg, lo que provoca la necesidad de aumentar la productividad para cubrir los periodos de mayor demanda.

**Tabla 5.5.** Influencia de las condiciones de planificación sobre los resultados de diseño preliminar.

	[6]	Propuesto				
	C1.1 (ZW)	C1.1 (ZW)	C1.2 c.p.=150 h	C1.3 NIS	C1.4 Estac.	C1.5 $I_B < 3.000$
$V_1$ (l.)	429	427,8	500,0	444,5	444,5	533,3
$V_2$ (l.)	643	641,7	750,0	666,7	666,7	800,0
$V_3$ (l.)	857	855,6	1.000,1	888,9	888,9	1.066,7
$B_A$ (kg)	214	213,9	250,0	222,2	222,2	266,7
$B_B$ (kg)	107	107,0	125,0	111,1	111,1	133,3
T. sob. <sup>(a)</sup>	n.d.	0+8	0+560	0+320	0+320	872+48
$\max\{I_A\}$ <sup>(b)</sup>	n.a.	n.a.	0	0	0	0
$\max\{I_B\}$ <sup>(b)</sup>	n.a.	n.a.	0	0	4979	3000
F. Obj. (u.a.)	35.973	35.931	39.455	36.762	36.762	41.013
Iteraciones	n.a.	3	3	4	4	7
CPU <sup>(c)</sup>	3,6	0,6	0,75	1,04	1,16	1,93

(a) El tiempo sobrante se expresa en horas, como la suma de tiempo no productivo por falta de demanda a cubrir más el tiempo perdido por paradas en la cadena de producción.

(b) En kg de producto final. Se ha supuesto un *stock* inicial nulo y se no se ha considerado como *stock* la cantidad almacenada para ser cubierta en el propio periodo a medio plazo.

(c) Los tiempos de CPU son segundos sobre SUN SparcStation 1, excepto para los datos reproducidos de Birewar y Grossmann (primera columna), que los indican para IBM 3086.

Tomando como referencia el horizonte de tiempo utilizado por el bloque de diseño, en la figura 5.3 se puede observar la evolución de alguna variables significativas calculadas para el caso C1.3:

1. Debido a la características de este caso, existe una relación polinómica sencilla entre los costes de capital y el horizonte de tiempo utilizado por el módulo de diseño, que es fácilmente calculable de forma analítica. En general existe una relación continua entre las diferentes variables que se pueden corregir a partir de los resultados del módulo de simulación y el coste de inversión calculado por el módulo de diseño, a menos que sea necesario modificar la estructura de la planta añadiendo o eliminando unidades en paralelo.

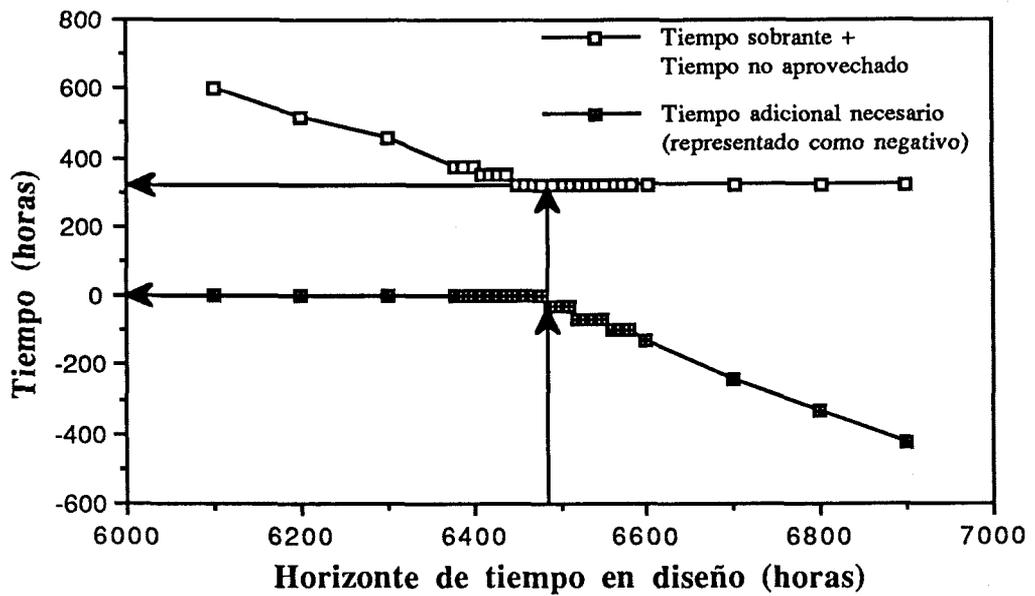
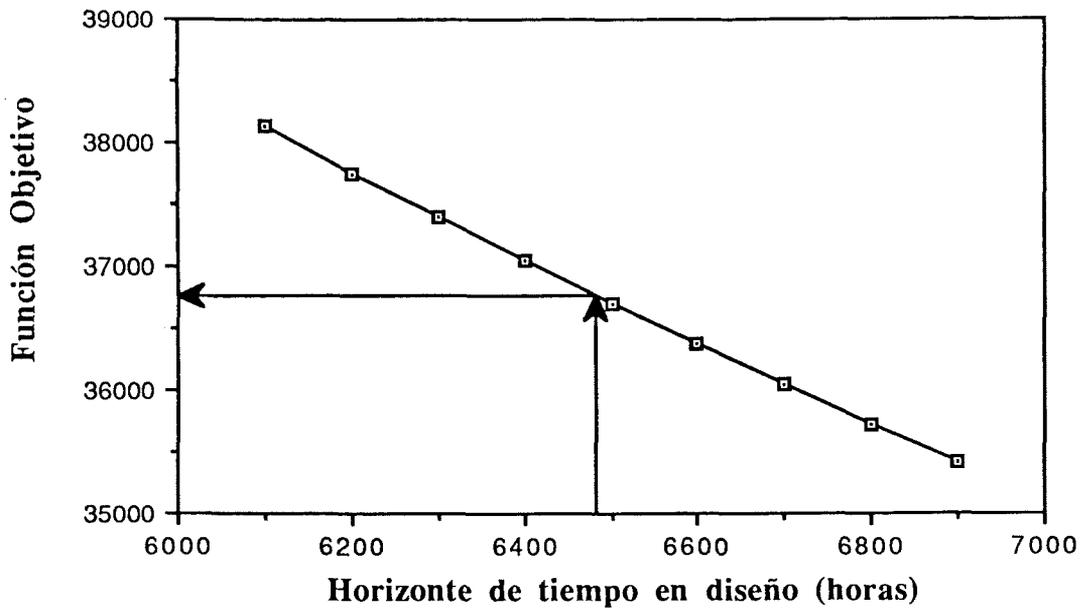


Figura 5.3. Caso C1.3. Evolución de la función objetivo, de las horas necesarias y de las horas sobrantes en función del horizonte de tiempo utilizado en la etapa de diseño.

2. Cuando el diseño se realiza con horizontes de tiempo superiores a 6.480 horas es necesario utilizar tiempo extra (sobre 6.000 horas) en el proceso de planificación. Las discontinuidades en la relación entre  $H^{p,add}$  y  $H^s$  (en el gráfico únicamente se detallan en la zona cercana a la solución) están provocadas por la propia naturaleza discontinua del proceso de asignación de lotes: pequeñas disminuciones en  $H^s$  dan lugar a tamaños de lote ligeramente mayores, lo cual permite incrementar la capacidad de producción manteniendo el número de lotes a fabricar, pero no permite modificar este número de lotes colocados mientras no sea posible eliminar "un" lote completo<sup>22</sup>.
3. Por el contrario, cuando en el módulo de diseño se utilizan horizontes de tiempo inferiores a las 6.480 horas, al acomodar la demanda sobre los equipos diseñados aparece tiempo sobrante, lo que indica que la planta está sobredimensionada.

Debido a las pérdidas de tiempo provocadas por las paradas de cada fin de semana existen 320 horas que el sistema de planificación es incapaz de aprovechar.

En este caso (C1.3), el módulo de optimización permite detectar mejoras cualitativas, aunque no se consigue incrementar la producción total de la planta. Debido a la regularidad del problema, durante el cálculo del punto inicial de planificación se utilizan únicamente dos tipos de estructuras ("macrocampañas"):

- (a)  $4 \times \mathbf{AB} + \mathbf{A}$ , con 2 horas de margen sobre el horizonte semanal (figura 5.2.c). A falta de otros datos sobre costes, el sistema de evaluación favorece la colocación de lotes de **A**, que presenta mayor productividad ( $kg/h$ ) que **B**.
- (b)  $3 \times \mathbf{AB} + 3 \times \mathbf{B}$ , que compensan el exceso de producción de **A** y permiten 10 horas de margen al final de la semana.

El plan inicial consiste en colocar 30 veces la secuencia (a) y 10 veces la secuencia (b) de forma alternada, lo cual permite 160 horas de margen para cubrir incidencias.

Durante la optimización de plan se ha valorado positivamente la uniformidad de la producción y se ha identificado la posibilidad de intercambiar un lote de **A** de la "macrocampaña" (a) por uno de **B** de la "macrocampaña" (b). De esta forma, todas las "macrocampañas" (b) y un tercio de (a) pasan a estar formadas por 4 secuencias **AB** más un lote de producto **B** ("macrocampaña" (c)), con 14 horas de margen al final de la semana, lo cual finalmente conduce a las 320 horas de margen reflejadas en la tabla 5.5.

<sup>22</sup>Si los tiempos de proceso son función del tamaño de lote, puede llegar a suceder que un aumento de capacidad en los equipos no provoque mayor productividad.

### 5.5.2. Caso C2. Basado en la planta propuesta por Robinson y Loonkar

La estrategia descrita ha sido también aplicada al problema propuesto por Robinson y Loonkar [87], analizado en la sección 3.8.1. Se han supuesto las siguientes políticas de funcionamiento y datos adicionales:

- El periodo a corto plazo es de una semana. Todas las semanas presentan 5x24 horas de trabajo y cada 5 semanas forman un periodo a medio plazo. El periodo a largo plazo está formado por 10 periodos a medio plazo, totalizando 6.000 horas de trabajo.
- No se ha contemplado la posibilidad de incluir equipos de almacenaje intermedio adicionales, pero todos los productos intermedios son estables y por tanto pueden almacenarse en el propio equipo de proceso. Sin embargo, durante el fin de semana todos los equipos deben quedar vacíos.
- La demanda se reparte uniformemente entre los 10 periodos:
  - Producto A: 40.000 kg/periodo
  - Producto B: 30.000 kg/periodo
  - Producto C: 10.000 kg/periodo
- Se utilizan dos servicios generales, cuyos consumos quedan definidos en la tabla 5.6.

**Tabla 5.6.** Consumos de servicios generales.

Producto	Tarea	Servicio	$k_1$	$k_2$	$\tau_1$	$\tau_2$
A	1	S2	80	0,20	50%	75%
A	2	S1	80	0,20	50%	75%
A	5	S1	250	0,10	0%	100%
A	5	S2	10	0,30	50%	75%
A	7	S1	60	0,25	50%	75%
B	1	S1	80	0,15	50%	75%
B	2	S1	10	0,30	25%	75%
B	5	S1	80	0,20	50%	75%
C	4	S1	80	0,20	50%	75%

El consumo se calcula según  $E_g = k_1 + k_2 \cdot B_i$ .

La potencia requerida será  $W_g = \frac{E_g}{t_{ij} \cdot (\tau_2 - \tau_1) / 100}$

**Generación de campañas:** Dado que el producto **B** no utiliza el segundo equipo discontinuo, el sistema detecta la posibilidad de generar campañas multiproducto a partir de dicho producto.

Los parámetros que reflejan las características de operación de una determinada campaña dependen de las capacidades de los equipos instalados. En la tabla 5.7 se indican a modo de ejemplo los valores correspondientes al diseño final obtenido para satisfacer las nuevas especificaciones introducidas en el problema (caso C2.2 de la tabla 5.10).

**Tabla 5.7.** Parámetros de producción de las diferentes campañas. Resultados correspondientes a la solución del caso C2.2.

Campaña	T. proc. (horas)	L.C.T. (horas)	Produc. (kg/h)	Mejora LCT multiprod.
C1: <b>A</b>	15,24	7,60	176,3	—
C1a: <b>A</b> <sup>(a)</sup>	(15,24)	(7,23)	(185,3)	—
C2: <b>B</b>	18,55	11,07	107,4	—
C3: <b>C</b>	14,44	7,23	185,3	—
C4: <b>BA</b>	25,79	18,31	138,1	(0,0%) 2,0%
C5: <b>BC</b>	25,32	17,84	141,8	(2,6%) 2,6%
C6: <b>BABC</b>	43,63	36,16	139,9	(1,2%) 2,2%

Campaña	T. Cambio (horas)				Consumos Serv. Generales			
	C1	C1a	C2	C3	$W_{S1,max}$	$\overline{W}_{S1}$	$W_{S2,max}$	$\overline{W}_{S2}$
C1	<b>7,60</b>	n.a.	11,07	7,23	490	28%	1650	6%
C1a	n.a.	(7,23)	(11,07)	(7,23)	(950)	(15%)	(2700)	(4%)
C2	7,23	7,23	11,07	<b>6,77</b>	700	13%	0	—
C3	7,23	7,23	11,07	7,23	570	9%	0	—
C4	<b>7,60</b>	7,23	11,07	7,23	700	14%	1650	3%
C5	7,23	7,23	11,07	7,23	700	11%	0	—
C6	7,23	7,23	11,07	7,23	700	12%	1650	2%

<sup>(a)</sup> La campaña C1a corresponde al producto **A** sin desacoplar los consumos de servicios generales. El tiempo de cambio respecto a la propia campaña es el tiempo de ciclo limitante.

Los valores entre paréntesis se refieren a la situación sin desacoplar los consumos de servicios generales (campaña C1a.).

Las potencias medias se indican en porcentaje respecto a las máximas requeridas en cada caso.

De estos resultados se deduce que:

- La campaña **BC** es más eficiente que la sucesión de campañas de un solo producto equivalente.
- Existe un solapamiento de consumos de ambos servicios generales entre lotes sucesivos de producto **A**. Para evitarlo, es necesario introducir un tiempo de

espera adicional de 0,37 horas. Si se combinan lotes de **A** con lotes de otro producto no es necesario introducir este retraso, por lo que las campañas **BA** y la **BABC** también permiten ahorros de tiempo (o de nivel de disponibilidad de servicios generales, en función de las limitaciones que se consideren).

- El resto de combinaciones estudiadas no aporta mejoras sobre lo ya indicado.

### **Caso C2.1: Diseño inicial.**

Se ha realizado el cálculo de las dimensiones de los equipos siguiendo el procedimiento indicado en el capítulo 3 (caso C2.1), sin introducir las consecuencias de las paradas ni las ventajas de trabajar en campañas multiproducto, y a continuación se ha intentado buscar un plan de producción adecuado con la planta resultante.

Los resultados obtenidos (tablas 5.9 y 5.10), indican que la planta no puede satisfacer la demanda prevista y que, o bien es necesario sacrificar el 13% de la producción de **B** (a falta de otros datos sobre costes, el producto **B** es el que presenta menor productividad), o bien se debe introducir tiempo adicional de trabajo por un valor de 450 horas (7,5%).

### **Caso C2.2: Diseño considerando las condiciones de operación descritas.**

Aplicando los procedimientos descritos en este capítulo se obtienen dimensiones de los equipos sensiblemente mayores, con un coste adicional de inversión de un 5% aproximadamente, que permitirán cubrir la demanda prevista en las condiciones de trabajo especificadas.

El proceso de convergencia en este caso presenta muchas de las dificultades comentadas al describir el procedimiento de solución propuesto:

- No existen equipos claramente dominantes, por lo que existen soluciones alternativas con costes de inversión muy parecidos (tabla 3.4).
- El horizonte de trabajo es relativamente corto y se exige que no quede ningún lote en proceso al final del mismo.
- Aunque los tiempos de proceso en las tareas discontinuas son constantes, las tareas semicontinuas (entre las que se encuentran las de carga y descarga de los equipos discontinuos) consumen tiempos significativos, por lo que el número de lotes que se podrán realizar en cada periodo dependerá de forma discontinua (es un valor entero) de las capacidades de los equipos instalados para realizar dichas tareas semicontinuas.
- No todos los productos siguen la misma receta, por lo que los factores anteriores afectarán a cada uno de los productos de forma diferente.

En la figura 5.4 se puede observar la evolución de las variables que caracterizan el proceso de convergencia. De todas formas, dado que algunos de los factores mencionados afectan de forma diferente a cada producto modificando la relación entre productividades establecida por el módulo de diseño, la solución óptima se obtiene al introducir también correcciones en las demandas utilizadas por el módulo de diseño, de forma que se obtenga la relación de productividades inicialmente prevista.

### Caso C2.3: Diseño en condiciones de demanda estacional

Se ha considerado que parte de la demanda se reparte de forma no uniforme entre los diferentes periodos de trabajo, según los valores de la tabla 5.8. Repitiendo los cálculos anteriores, se observa que lo más adecuado es acumular la producción de A, y que, como es lógico, la planta diseñada bajo demanda uniforme sigue siendo capaz de cubrir globalmente la demanda. Por tanto, si no se consideran otros costes que los de inversión en equipos de proceso, el resultado es el mismo que ya se ha obtenido para el caso C2.2.

Tabla 5.8. Caso C2.3. Distribución temporal de la demanda.

Producto	Periodo				
	1 a 6	7	8	9	10
A	38.000	38.000	48.000	48.000	38.000
B	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
C	9.500	12.000	12.000	9.500	9.500

### Caso C2.4: Introducción de costes de operación

La situación es diferente si ciertos costes de operación quedan condicionados por el diseño. En esta caso, claramente deberá establecerse un compromiso entre los costes de inversión y los de inventario, y comprobar hasta qué punto puede ser más rentable aumentar la capacidad de producción que hacer frente a dichos costes de inventario.

Para evaluar estos costes se han establecido los siguientes criterios:

- Los costes de inversión en equipos de proceso son valores anualizados.
- El inventario penalizable es aquel que se obtiene al final de cada periodo a medio plazo.
- Cada producto necesita un almacén diferenciado. Se ha penalizado el inventario máximo de cada producto, según un valor de 1,0 *u.a.* por *kg*.
- Se ha penalizado la cantidad inmovilizada anual de cada producto (cantidad por tiempo), a razón de 0,1 *u.a.*/(*kg*·periodo).

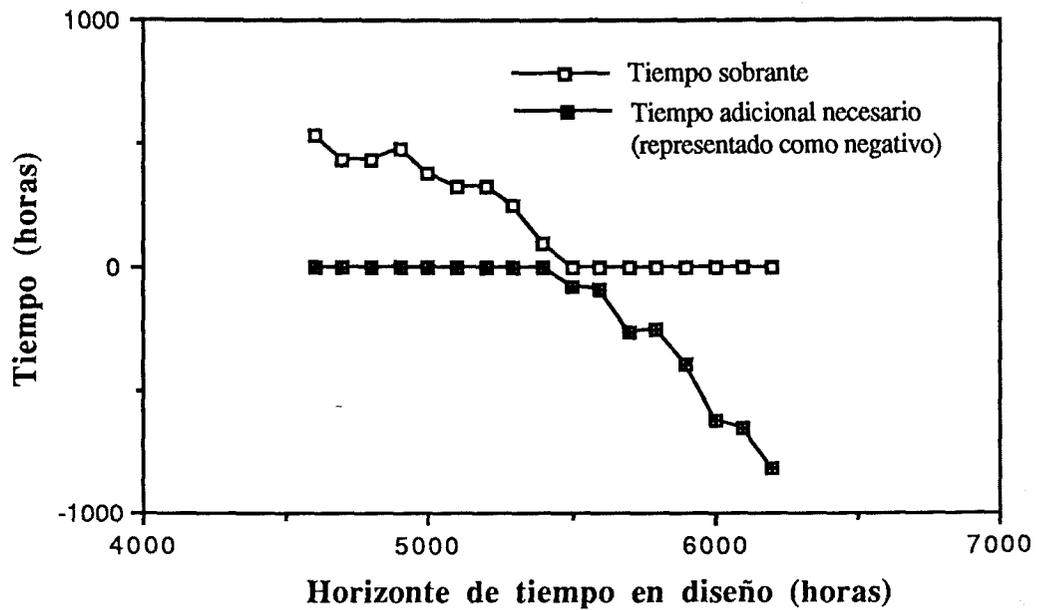
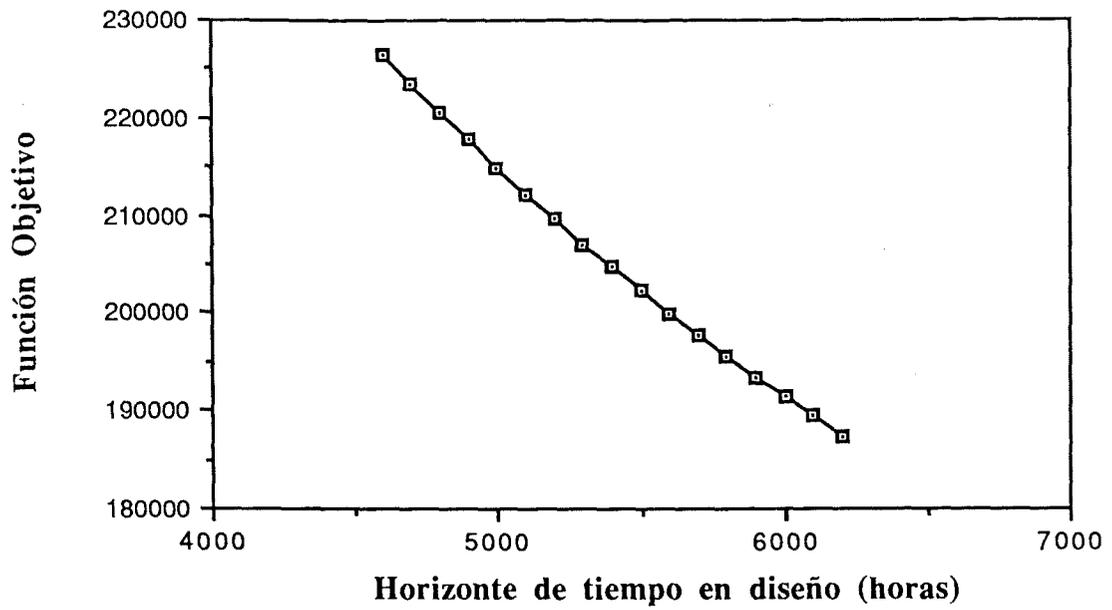


Figura 5.4. Caso C2.2. Evolución de la función objetivo, de las horas necesarias y de las horas sobrantes en función del horizonte de tiempo utilizado en la etapa de diseño.

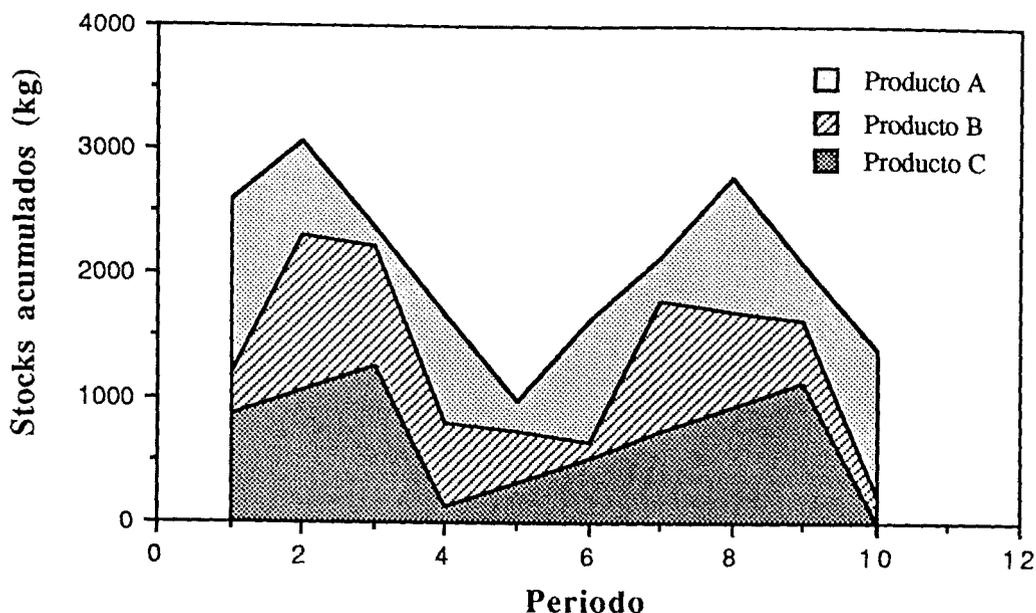


Figura 5.5. Caso C2.2. Evolución prevista de los *stocks* de producto final con la solución propuesta.

- Se ha considerado que inicialmente existe medio lote de cada producto en inventario.

Manteniendo las modificaciones en los valores de  $D_i^s$  establecidas por el procedimiento iterativo para el diseño anterior, en la en la figura 5.6 se puede observar la variación del coste anualizado de los equipos de proceso y del coste total en función del horizonte de tiempo utilizado en la etapa de diseño. Para horizontes de diseño superiores a las 6.400 horas, la planta obtenida no es capaz de cubrir la producción anual, mientras que para horizontes inferiores a las 5.500 horas los costes asociados al inventario son los mínimos inevitables al trabajar de forma discontinua. En las tablas 5.9 y 5.10 se pueden observar los parámetros más característicos de producción y las capacidades de los equipos en el punto óptimo de diseño, y compararlos con el resto de situaciones.

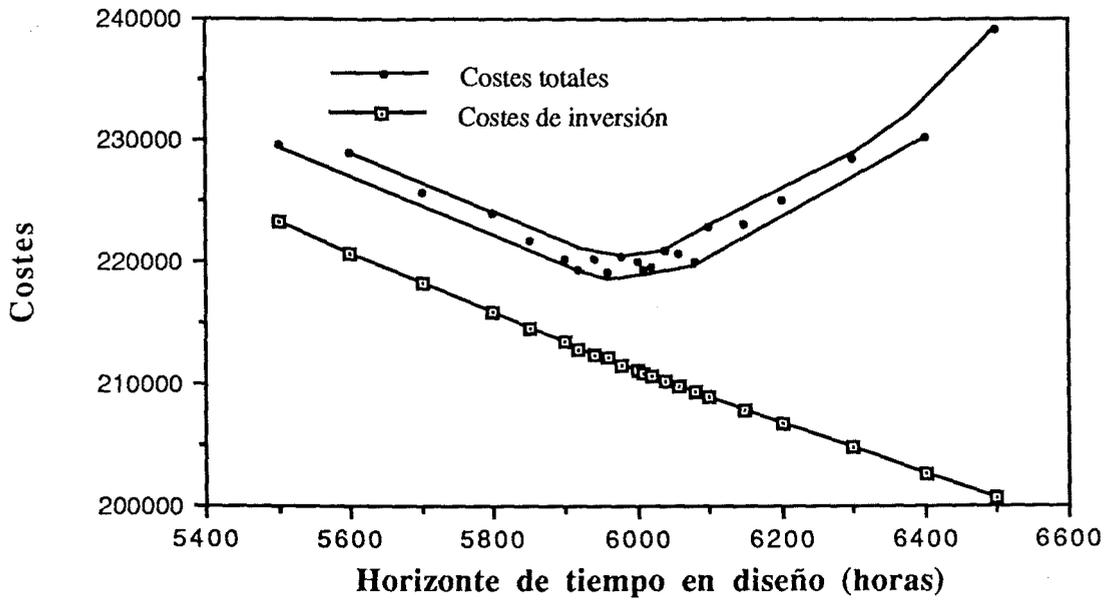


Figura 5.6. Caso C2.4. Evolución de los costes de inversión en equipos de proceso y de los costes totales en función del horizonte de tiempo utilizado en la etapa de diseño.

Tabla 5.9. Resumen de los resultados de planificación para cada una de las alternativas planteadas.

Caso	Coste eqp. (u.a.)	Producción (ton : A/B/C)	Max. Invent. (ton : A/B/C)	Max. Ret. (ton : A/B/C)	T. sob. (horas)
C2.1	191.300	399,8/261,6/100,7	2,1/0,5/0,7	0,5/38,4/0,5	0
C2.1	191.300	398,5/301,2/100,7	0,6/1,2/0,7	1,5/0,0/0,5	-450
C2.2	202.300	400,0/301,4/101,2	1,3/1,3/1,4	0,0/0,0/0,0	117
C2.3	202.300	400,0/301,4/101,2	16,1/1,4/1,1	0,0/0,0/0,1	57
C2.4	212.100	399,8/301,5/101,2	2,2/1,5/1,2	0,3/0,0/0,1	517

Tabla 5.10. Diseño final para cada una de las alternativas planteadas.

	Caso		
	C2.1	C2.2 y C2.3	C2.4
$B_A$	1.267	1.340	1.415
$B_B$	1.015	1.189	1.308
$B_C$	1.267	1.340	1.415
$R_1$	1.045	1.210	1.172
$V_2$	1.524	1.784	1.962
$R_3$	560	600	620
$R_4$	560	600	620
$V_5$	1.774	1.877	1.981
$R_6$	560	580	620
$R_7$	560	580	620
$V_8$	1.267	1.341	1.415
Coste eqp.	191.300	202.300	212.100