

## Capítulo 3 Planificación agregada

### 3.1 Conceptos

En el presente capítulo analizamos los procedimientos para establecer el plan maestro de producción. Nos centraremos en el caso en que el plan maestro se establece en cantidades de productos terminados, el más usual, y analizaremos en el próximo capítulo, una vez definido el concepto de lista de materiales, otras posibilidades.

La planificación, en todos los contextos, tiene por objeto efectuar la mejor asignación posible de los recursos, en principio limitados, a las actividades potenciales, con la finalidad de alcanzar los objetivos marcados a dichas actividades. Para ello se analiza dicha asignación en un ámbito temporal u horizonte relativamente extenso (1 año por ejemplo), a fin de que las asignaciones iniciales, las únicas que se harán efectivas de inmediato, no comprometan futuras asignaciones, y por tanto, que una buena eficiencia inmediata no signifique una pobre eficiencia futura.

La suposición implícita subyacente es la de que ciertos problemas futuros pueden preverse con antelación y que únicamente podrán resolverse adoptando las medidas adecuadas mucho antes de que se materialicen. Si se rechaza esta suposición también procede rechazar la utilidad de la planificación a medio plazo; en lugar de adoptar medidas para la resolución o eliminación de los problemas futuros sólo cabrá intentar disponer de la suficiente flexibilidad como para poder adaptarse de la mejor manera posible a los problemas presentes.

En el **apartado 3.1.1** efectuamos una presentación de la planificación de operaciones y de sus características, que ampliamos en el **3.1.2** a través de dos ejemplos muy sencillos.

El **apartado 3.1.3** presenta algunos modelos clásicos de planificación, especialmente el de Bowman y el de Holt, Modigliani, Muth y Simon. Consideramos especialmente importantes

las reflexiones del párrafo **3.1.3.2** en el que se presenta la arquitectura de un SIAP (sistema interactivo de ayuda a la planificación) que hemos utilizado con resultados satisfactorios en diversos casos reales. Otros modelos (de programación dinámica y de flujos en grafos) se describen en **3.1.4** y **3.1.5**.

El **apartado 3.1.6** está destinado a los modelos lineales cuyo espectro de aplicación dentro de la problemática de la planificación es amplio y que permite la utilización de herramientas robustas para su manipulación. En el **apartado 3.1.7** se presenta la planificación jerárquica siguiendo las ideas de Hax y Candea.

En el **apartado 3.1.8** se presentan algunos resultados originales, entroncados con la planificación jerárquica, basados en un proyecto de investigación subvencionado por la Dirección General de Investigación Científica y Técnica. También se presenta la estructura de sistema Artemisa construido para una empresa del sector de la automoción, y que constituye un ejemplo de aplicación de las ideas expuestas.

### 3.1.1 Planificación de operaciones

La planificación de operaciones pretende transformar las expectativas de la demanda o del consumo (previsiones o pedidos) en un plan maestro, director o base de producción, es decir, en las cantidades de los diversos productos terminados a producir en unos determinados intervalos de tiempo, mediante la asignación inteligente de los recursos a las actividades.

- El plan debe ser eficaz, es decir, debe poder alcanzar previsiblemente los objetivos fijados.
- El plan debe ser *factible*, es decir, debe poder realizarse con los recursos de que se dispone.
- El plan debe ser eficiente, es decir, debe hacer el mejor uso posible de los recursos disponibles.
- El plan debe ser consensuado, pues representa el equilibrio adoptado entre diversos factores (productivos, comerciales y económicos) cuya responsabilidad compete a diferentes departamentos de la empresa.

En consecuencia, el plan maestro deberá estar diseñado para dar una calidad de servicio suficiente en respuesta a las solicitudes (reales o previstas) del mercado. Habrá sido

necesario evaluar los requerimientos de recursos (críticos) que representa en cada intervalo, compararlos con los disponibles, y tomar medidas para eliminar los desajustes; esto en ocasiones llevará a modificar la estructura dada inicialmente al plan, bien en volumen global, bien en su distribución en el tiempo, en otras a buscar procedimientos de adquisición definitiva o temporal de nuevos recursos (ampliación de la capacidad instalada, ampliación de plantilla, horas o turnos extra, empleo temporal, subcontratación). No deben desdeñarse otros tipos de ajuste a utilizar si los desajustes se producen (excesivamente) en sentido contrario, es decir, muchos más recursos disponibles que necesarios para el plan, en ciertos intervalos o en todos los del plan, y que llevarán a medidas contrarias de las anteriores (aumento del volumen del plan, modificación de la distribución de volúmenes, reducción definitiva o temporal de algunos recursos). Por tanto forma parte esencial de todo plan maestro de operaciones la forma en que se van a utilizar los recursos para realizarlo (plan de capacidades o, plan de cargas).

El plan maestro de operaciones representa un compromiso entre las expectativas existentes respecto a la demanda o al consumo (defendidas por el área comercial de la empresa) y las posibilidades tecnológicas y humanas del sistema productivo (defendidas por el área productiva). Frente a una determinada situación existen diversas posibilidades de compromiso, diferentes planes maestros válidos: la elección de uno de ellos podrá realizarse eficientemente tras una evaluación de los mismos atendiendo a los factores económicos, técnicos y comerciales tangibles e intangibles.

Uno de los dispositivos que se han indicado anteriormente consiste en modular la producción en forma diferente a la demanda o consumo, para ajustarla más a las disponibilidades de recursos. Esta circunstancia se podrá dar en aquellos casos en los que la demanda sufre fuertes oscilaciones estacionales, en volumen o en variedad, y/o las disponibilidades productivas poseen también dicha cualidad (por ejemplo, a causa de las vacaciones de verano) siendo almacenable el producto. En los intervalos en que la demanda sea inferior a la capacidad de producción, se mantendrá la tasa de producción, haciendo que la producción sobrante se almacene, mientras que en los intervalos en los que la demanda supera la capacidad se atenderá no sólo a partir de lo producido sino también a partir del stock.

Todos los dispositivos que se pueden emplear para realizar el ajuste tienen, en general, sus ventajas e inconvenientes, sus limitaciones, sus condicionantes y sus costes; afectan diferentemente a las diversas funciones de la empresa que, consecuentemente, tienen actitudes diversas frente a ellos. El stock no molesta a producción (salvo por cuestiones de espacio), pero sí a finanzas, que ve en él un factor de coste innecesario. Por consiguiente la solución idónea, *óptima*, para la realización del ajuste será la utilización de una mezcla adecuada de los diversos dispositivos.

El concepto de planificación, aun centrado en el área productiva, puede recibir diferentes significados en función de los objetivos perseguidos con la planificación. Un plan constituye un itinerario para alcanzar dichos objetivos y, de la misma forma que establecemos habitualmente una jerarquización de objetivos, debemos establecer una jerarquización de planes, imbricados unos dentro de otros, estableciendo los de nivel superior el marco de los de nivel inferior. En nuestro ideario la planificación debe disfrutar de las siguientes características:

- El plan no es otra cosa que la formalización del proceso de planificación, a lo largo del cual se detectan problemas, actuales o futuros, se imaginan soluciones y se adoptan decisiones más o menos trascendentes. El desarrollar el proceso es lo importante, el obtener un documento llamado plan es un subproducto.
- El plan anticipa un conjunto de decisiones respecto al momento en que se llevarán a la práctica; por tanto, la planificación sólo será necesaria cuando lo sea la anticipación (prácticamente siempre, aunque la respuesta puede depender de posiciones filosóficas frente a la realidad).
- El plazo entre decisión, realización y resultados es variable. El grado de anticipación define la criticidad de las decisiones, aquéllas que deben materializarse de inmediato son las más críticas y en ellas conviene garantizar más la calidad, tanto de las informaciones de soporte como en los procesos de toma de decisión. En el resto, aunque la calidad es importante, existe tiempo suficiente para volver a analizar la situación, para replanificar.
- Las decisiones del plan pretenden hacer frente no sólo a problemas pasados (situación presente) sino a hechos futuros (nueva faceta de anticipación). La planificación debe apoyarse en algún tipo de previsión, objetivo o subjetivo.
- El plan abarca un cierto ámbito temporal finito que denominaremos *horizonte*, sin considerar que más allá del horizonte no existe nada, sino que el futuro lejano influye poco en las decisiones presentes a lo que se suma la incertidumbre e imprecisión inherentes a las previsiones lejanas. La elección de la magnitud del horizonte es, pues, el resultado de un equilibrio entre el posible efecto en el presente de lo que está más allá del límite de aquél, y del volumen de trabajo a desarrollar en el proceso, tanto mayor cuando mayor sea el horizonte.
- La planificación es un proceso iterativo en el tiempo: antes de que transcurra el horizonte se realizará una actualización del plan; por ello el proceso es *deslizante* en el tiempo, teniendo, dos planes sucesivos, un dominio temporal *solapado* (aunque no necesariamente idéntico en sus conclusiones e itinerario, a causa de las incidencias habidas y de las nuevas previsiones). La *frecuencia* de actualización es una de las características, junto con el horizonte, definidoras de la planificación.

- El nivel de detalle del plan es otra característica importante, tanto a nivel temporal, como a nivel de los objetos a los que se refieren las acciones a adoptar como consecuencia del plan. El horizonte se divide en segmentos temporales, *intervalos*, no necesariamente de la misma longitud (por cuanto es más importante un detalle minucioso al principio del horizonte que al final). Coherentemente, el nivel de detalle de las acciones también puede conducir a agrupaciones más o menos importantes de acciones elementales. Centrándonos en los productos, que constituyen uno de los objetos más importantes de los planes relativos a la producción, el elemento unitario considerado puede ser más o menos genérico, desde la consideración separada de cada uno de los productos diferenciados hasta la reducción de todos los productos a una unidad común, pasando por agrupaciones más o menos finas de los productos en familias, grupos y clases.
- Un plan, en el ambiente de planificación jerárquica que estamos describiendo, es un elemento de guía y coordinación entre las diversas dependencias de la organización que intervienen en el proceso productivo. Debe ser realista, es decir, razonablemente realizable, condición necesaria para poder gozar de credibilidad, pero además debe tener un grado, también razonable, de fijeza, de rigidez. A partir del plan numerosos grupos empiezan a trabajar, tomándolo como base de partida, y desarrollando sus directrices hasta transformarlas en acciones elementales. Todo esto requiere un determinado tiempo, por lo que la primera zona del horizonte sigue realizándose, en el mejor de los casos, siguiendo las directrices del plan anterior. Toda modificación de esta zona causará perturbaciones, en la mayoría de los casos innecesarias, en el proceso de transformación del Plan en acciones elementales, sin que a nuestro entender los resultados obtenidos sean muy felices. En todo plan hay que considerar, pues, un *plazo de rigidez*.
- En la jerarquía de planes indicada, a mayor rango del plan le corresponde mayor horizonte, menor frecuencia, menor grado de detalle (intervalo mayor y agrupaciones menos finas) y mayor plazo de rigidez, y a los planes de menor rango lo contrario. Si en una situación real analizamos los diversos procesos de planificación y decisión, y a la vista del organigrama (que marcará los rangos presupuestos) observamos incumplimiento de la regla enunciada, habremos detectado un disfuncionamiento de la organización.

En la *figura 3.1.1.1* hemos incluido una descripción de los diferentes planes (y actuaciones análogas) relacionadas con el área productiva, indicando en cada uno de ellos la finalidad principal perseguida, y unos valores típicos (correspondiente a un sector industrial) de horizonte, frecuencia, intervalo y nivel de detalle. En el presente capítulo nuestro interés se centra preferentemente en los denominados *plan maestro de producción o de operaciones (PMP)* y *plan maestro detallado (PMD)*, que se encuadran en la actividad denominada *planificación de operaciones*. En otros lugares nos interesaremos por el *cálculo de necesidades* y el *programa de producción o de operaciones*.

NOMBRE	MOTIVACIÓN	HORIZONTE	FRECUENCIA	INTERVALO	PLAZO RIGIDEZ	NIVEL
PLAN ESTRATÉGICO DEL PRODUCTO	definir los binomios producto/mercado, orientar I + D	10 años	cada 2 o 3 años	1 año	4 a 5 años	modelo gran opción
PLAN ESTRATÉGICO DE PROCESOS	nuevas plantas nuevas filiales modif.important.	5 a 7 años	cada 1 o 2 años	1 año trimestre	2 a 3 años	grandes líneas
PLAN OPERATIVO (o TÁCTICO *)	coordinar inversiones ser base de presupuesto	3 a 5 años	anual	1 año trimestre	1 año	global modelo
PLAN MAESTRO GLOBAL (o AGREGADO)	asignar recursos críticos	12 meses	mensual	1 mes	2 meses	familias de productos
PLAN MAESTRO DETALLADO	input calc. nec. tasas prod. aprovisionamiento	16 semanas	semanal	semana	3 sem.	prod. o familias + % mix
CÁLCULO DE NECESIDADES (**)	emisión órdenes aprov.y fabric.	12 semanas	semanal	semana	2 sem.	orden (art. + cant. + fechas)
PROGRAMA DE OPERACIONES	situar operaciones en instal. y tiempo	5 días	diaria	día	1 día	oper.
(*)	el nombre PROGRAMA OPERATIVO era utilizado en la metodología de planificación del INI para designar un plan a 3 años.					
(**)	se considera que el cálculo de necesidades se desarrolla tanto a nivel materiales como al nivel carga, y que por tanto se efectúa una preprogramación de las órdenes (en este sentido recibirá en el próximo capítulo el nombre de PLANIFICACIÓN DETALLADA); en caso contrario el CÁLCULO DE NECESIDADES es formalmente una elaboración directa del PLAN MAESTRO DETALLADO sin adopción de nuevas decisiones.					

*Fig. 3.1.1.1 Diferentes tipos de planes y programas*

### 3.1.1.1 Necesidad de la planificación

La planificación consiste en un conjunto de decisiones anticipadas, por lo que sólo será necesaria en la medida que lo sea la anticipación. Si una empresa tiene la posibilidad de contratar o despedir mano de obra con facilidad, así como de decidir hacer o no horas extraordinarias sobre la marcha, adaptándose a las necesidades del momento, parece que no es necesario que se prevean las necesidades de capacidad a largo plazo, pero ésta no es la situación más habitual.

Lo mismo sucede con el aprovisionamiento de materiales: si el plazo de entrega que nos exigen nuestros clientes es inferior al plazo de fabricación y aprovisionamiento, será necesario comprar los materiales con una cierta anterioridad basada en una previsión. Podría optarse también por la alternativa de tener siempre suficiente stock como para producir cualquier cosa que se requiera, pero esto nos exige, además de una considerable inversión en materiales, el conocimiento exhaustivo del catálogo de productos que pueden ser solicitados (no siempre fácil en el taller abierto).

Por otra parte, si una empresa trabaja fundamentalmente sobre pedido sólo podrá planificar a nivel de detalle de las operaciones a realizar las correspondientes a los pedidos que tenga en cartera, puesto que desconoce las características de los artículos que pueden pedírsele en el futuro. Sin embargo, sí que puede prever el nivel de actividad global a largo plazo (y debe preverlo para poder orientar los esfuerzos comerciales consecuentes, hacia una búsqueda de pedidos inmediatos o, todo lo contrario, hacia un retraso de los pedidos, sin perderlos, hacia períodos de tiempo más aptos).

Todo esto nos indica que la necesidad de realizar la planificación, así como sus características, dependerá de:

- Tipo de fabricación: sobre catálogo, por pedido.
- Estructura de los plazos de aprovisionamiento, fabricación, entrega.
- Restricciones de la estructura del producto.

### 3.1.1.2 Elementos planificables

Como se ha dicho anteriormente la planificación consiste en tomar una serie de decisiones sobre la asignación de los recursos productivos y sobre la ordenación general de trabajos a realizar. Puesto que la planificación es el primer conjunto de una serie de decisiones debe abarcar sólo un cierto grupo de elementos para ser operativa y precisamente aquellos elementos que precisan de una anticipación en su conocimiento. Estos elementos suelen ser:

- *Medios productivos*: sólo los críticos, es decir, los que exigen una cierta anticipación en la decisión para variar su capacidad, pero además considerados con un cierto nivel de agregación supeditado a los datos previsionales disponibles.
- *Capacidades productivas externas*: correspondientes a operaciones que se subcontratan a otras empresas auxiliares con las que deberán establecerse conciertos de actuación con la suficiente antelación.
- *Mano de obra*: en muchos casos es deducible de la carga de los medios productivos y en otros se trata de un recurso más, sobre el que debe conocerse su evolución para ajustar las plantillas a su dedicación (horas extra).
- *Materiales*: los plazos de aprovisionamiento suelen ser largos en algunos materiales de tipo específico de los artículos, por lo que es necesario para éstos conocer con suficiente antelación las necesidades previstas; en otros casos las razones de escasez o fluctuación de precios son los que obligan a establecer una determinada política de aprovisionamiento en función de las necesidades previstas.
- *Recursos financieros*: en la mayoría de los casos pueden derivarse de la planificación de los recursos anteriormente expuestos.

Todos estos recursos tienen una serie de características comunes, de cara a la planificación, que comentamos a continuación:

- *Coste*: la disponibilidad de los recursos (adquisición de equipo) o la utilización de los mismos (uso de la mano de obra) tiene asociado un cierto coste que es función en principio de la cantidad de recursos y de su variación. Así, el utilizar mano de obra en horas fuera de la jornada laboral regular supone un coste horario superior.
- *Limitación*: la disponibilidad de los recursos en muchos casos no es ilimitada; por ejemplo, la capacidad disponible para la subcontratación o el espacio para almacenamiento o las horas de trabajo obtenibles de una determinada máquina.
- *Almacenamiento*: las disponibilidades productivas excedentarias no pueden trasladarse de un período a otro (las horas no utilizadas de una máquina no pueden ser utilizadas el mes siguiente), pero los recursos materiales y financieros sí admiten esta característica; todo trasvase de recursos de este tipo de un intervalo a otro llevará asociado también un cierto coste.

### 3.1.1.3 Determinación del plan maestro de producción

La planificación de operaciones, como se ha indicado anteriormente, tiene por objeto establecer un plan maestro de producción que indique qué productos deben fabricarse y



cuándo deben estar disponibles. En su forma más simple tendrá el aspecto de la tabla de la *figura 3.1.1.2*, a la que en forma explícita o implícita se añadirán las modalidades de utilización de los recursos para alcanzar dicha producción, incluyendo el stock a final de cada intervalo, como un recurso más.

intervalo (mes)	1 JUN	2 JUL	3 AGO	4 SEP	5 OCT	..... .....	11 ABR	12 MAY	TOTAL
días laborables	20	18	8	22	22	.....	21	22	220
producto JPX-18	23	42	11	37	41	.....	35	32	335
JPY-25	18	21	9	16	32	.....	28	26	208
HHE-10	39	17	18	27	7	.....	28	31	280
...	..	..	..	..	..	.....	..	..	..
WXZ-05	12	7	3	12	10	.....	11	13	115
TOTAL productos	239	220	100	250	254	.....	248	258	2640

*Fig. 3.1.1.2 Forma del plan maestro*

Según la complejidad y variedad de los productos y los objetivos perseguidos, los *intervalos* podrán corresponder a unidades de tiempo mayores o menores (por ejemplo, meses o semanas), y las filas de productos corresponderán a cada producto final diferenciado o bien a agrupaciones de los mismos en familias o grupos homogéneos. Los objetivos que se persiguen al establecer el PMP son dos, uno a medio plazo y otro a corto plazo (relativamente). A medio plazo el PMP permite saber lo que se pretende producir con un horizonte suficientemente amplio como para poder tomar las medidas adecuadas de ajuste en los recursos críticos de producción (esencialmente relativas a las capacidades de producción) tales como adaptación de maquinaria, variaciones de plantilla, subcontratación, introducción de turnos especiales, constitución de stocks provisionales, subcontratación, etc. A corto plazo, el plan maestro, que recibe el adjetivo de detallado (PMD), debe definir sin ambigüedad los productos que se ha decidido fabricar en cada intervalo a fin de que pueda constituir la alimentación de la función *gestión de materiales* y de su instrumento privilegiado, el *cálculo de necesidades* de sub-conjuntos, componentes y materiales, y, a través de él, de las funciones *aprovisionamiento* o *programación de proveedores* y *programación de operaciones*.

Ambos objetivos, cuando se traducen a horizonte, frecuencia y grado de detalle tienen, en general, requerimientos diferentes. El primero precisa mayor horizonte que el segundo, pero permite menor frecuencia y grado de detalle. Por ello en la *figura 3.1.1.1* hemos diferenciado ambos planes, lo que no está reñido con el hecho de que el plan detallado

pueda considerarse como la visión de la primera parte del plan maestro con una subdivisión en intervalos y un grado de detalle mayor (dado su objetivo, la determinación del plan maestro detallado podría haberse clasificado dentro del segundo nivel de decisión, el de cálculo de necesidades, y algunos autores así lo hacen)

La manera genérica de realizar la planificación se recoge en la *figura 3.1.1.3*, en la que podemos observar que a partir de unas previsiones de demanda de productos terminados, de unos pedidos en firme de dichos productos y de las previsiones de demanda y pedidos de semielaborados (para recambios o para montajes en otras plantas) establecemos un plan de demanda. De hecho la apelación plan es engañosa, ya que lo que se ha realizado en él es la reunión de los datos anteriores una vez efectuadas las inevitables correcciones de unidades (tanto temporales como de nivel de detalle del producto). Este plan de la demanda resume las solicitudes y no tiene que coincidir, salvo en grandes líneas, con el plan de operaciones, que se obtendrá a continuación, por tres razones principales:

- a) Lo que se va a distribuir y vender puede no ser lo que se ha producido a corto plazo, puesto que entre la producción y la venta se interpone toda la problemática de la distribución y de la política comercial. Los artículos producidos pueden enviarse directamente desde fábrica a los clientes o bien almacenarse en espera de que los clientes los soliciten o bien pueden existir delegaciones comerciales con almacén propio, cuya gestión de reposición está fijada y que origina pedidos a fábrica o la situación similar producida por un almacén regulador a pie de fábrica, etc.
- b) Es posible que las capacidades de producción sean muy diferentes a las que exigiría la satisfacción de la demanda, por lo que haya que recortar la demanda atendida respecto a la potencial, dejando una parte insatisfecha o bien haya que completar el plan con cantidades que se destinan a stock, a fin de no dejar inempleados recursos disponibles.
- c) Aunque globalmente las necesidades y capacidades sean coherentes, tal vez su distribución temporal no coincida, en cuyo caso habrá que modular la producción en forma diferente a la demanda, constituyendo stock cuando la demanda sea inferior a la producción, y utilizándolos en el caso contrario.

Por los motivos anteriores, el plan de operaciones será diferente del plan de demanda; se parte de un plan maestro tentativo, para el cual se determinan (mediante unos datos técnicos) las necesidades de recursos críticos y se comparan con las disponibilidades. Si las necesidades superan a las disponibilidades será preciso corregir el plan de maestro (o liberar más recursos) hasta que se logre que las necesidades sean inferiores o iguales a las disponibilidades. Como existen diversas formas de hacer frente a las necesidades, y por consiguiente varios planes maestros factibles, los diversos Planes se evalúan mediante unos datos económicos y otros criterios, y se selecciona finalmente el que más se adapta a los objetivos fijados por la dirección.

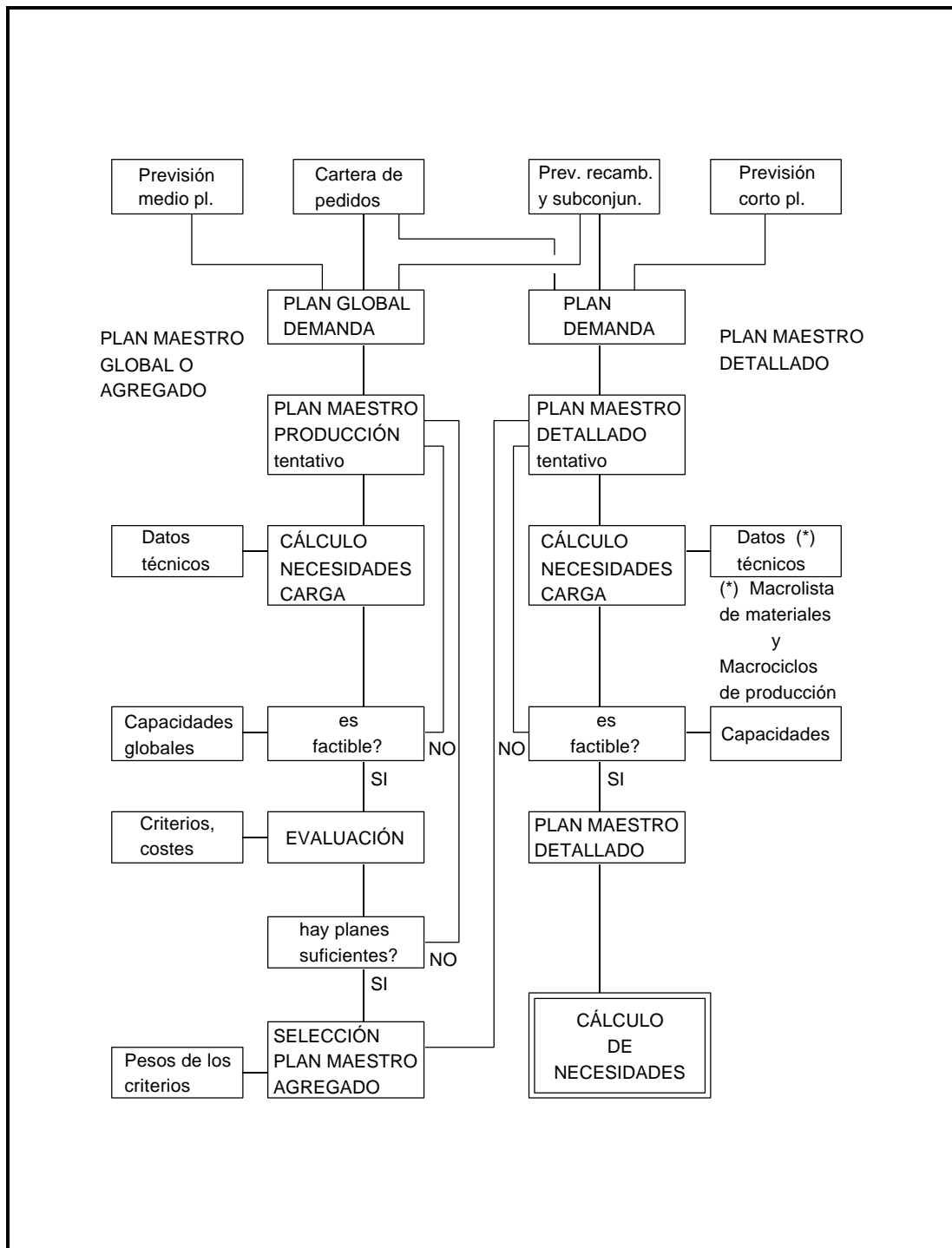


Fig. 3.1.1.3 Esquema del proceso de planificación

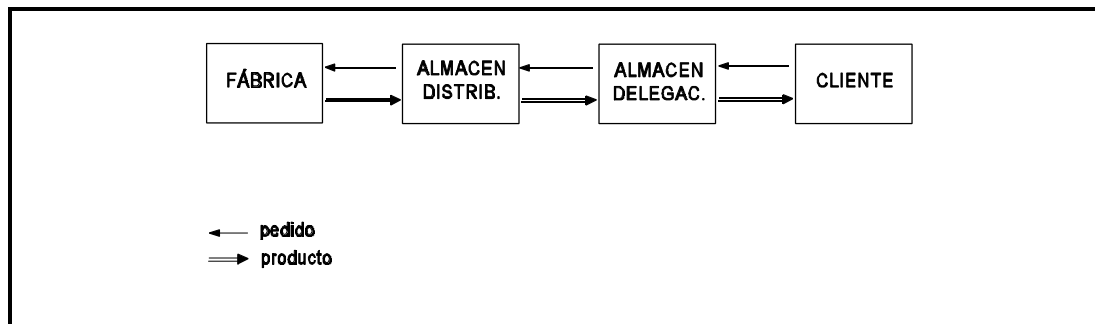


Fig. 3.1.1.4 Sistema de distribución que distorsiona la percepción por producción de la demanda del cliente

Las fases para la determinación del plan detallado son las mismas que las citadas anteriormente, aunque aplicadas a un grado de detalle, temporal y de agrupación de productos, más fino, y con horizonte más corto dentro del marco fijado por el plan maestro. A partir de un plan de la demanda, coherente con el plan maestro, se determinan las necesidades de recursos, a partir de unos datos técnicos, teniendo en cuenta una desagrupación mayor de recursos. Se comparan las necesidades con las disponibilidades y, tras algunas correcciones, si es preciso, se llega al plan maestro detallado definitivo factible.

Los datos técnicos y capacidades utilizados en ambas fases poseen el mismo significado, salvo el grado de agregación. En el segundo caso los hemos denominado *macro-ciclos* y *macro-lista de materiales*, por corresponder a los entes que más adelante denominaremos *ciclos* y *lista de materiales*, dado que en los casos de gran complejidad productiva los macro-ciclos y la macro-lista serán más globales y sintéticos que éstos, debido a la utilización de una visión macroscópica del sistema productivo.

### 3.1.1.4 Informaciones necesarias para la planificación

Las principales entradas de información en el proceso de planificación son:

- Catálogo de productos (agrupados en la forma conveniente a los fines de la planificación).
- Macro-estructura del producto, si para su obtención intervienen diferentes plantas.
- Cartera de pedidos actual.
- Previsión de la demanda durante los intervalos del horizonte.

- Niveles actuales de stock de productos terminados y de los componentes críticos tenidos en cuenta en la planificación.
- Evolución prevista en virtud de las órdenes vigentes en curso de dichos componentes críticos.
- Capacidad de los centros de trabajo críticos.
- Evolución de dicha capacidad en el horizonte.
- Carga en curso de fabricación en los centros de trabajo críticos.
- Carga prevista dentro del horizonte en los centros de trabajo críticos en virtud de órdenes vigentes en firme o atribuible a causas distintas de las planificadas (p.ej. porcentaje de carga para recambios, etc.)
- Niveles actuales de la mano de obra por especialidades.
- Evolución de la mano de obra en el horizonte.
- Estándares de producción (consumo unitario de recursos de cada producto, etc.)
- Calendario laboral.
- Costes estándar y precios de venta.
- Situación financiera y políticas de dirección.

Del conocimiento tempestivo de esta información debidamente actualizada podrá obtenerse como resultado para cada intervalo del horizonte:

- Cantidades a producir de cada producto o familia, desglosadas, en su caso, por procesos alternativos de producción si existen.
- Niveles de stock objetivo de los productos terminados.
- Niveles de mano de obra empleada en producción.
- Cantidad de horas extra, turnos adicionales, capacidad residual, etc.
- Cantidades de materiales y semielaborados a transportar entre distintos estadios productivos si hay, por ejemplo, varias plantas.
- Trabajos a subcontratar.

La función de transferencia entendida como el procedimiento por el que la entrada se convierte en decisión o resultado puede tomar formas muy distintas. La evaluación de los planes alternativos se realiza mediante los costes asociados a las decisiones de planificación, tales como:

- coste de lanzamiento.
- coste de producción.
- coste de cambio de ritmo de producción.

- coste de la variación de la fuerza de trabajo.
- coste de posesión de stock.
- coste de ruptura, de diferir entregas o de perder ventas, etc.

Los costes de producción se dividen normalmente en fijos y variables; los fijos son independientes de las cantidades producidas. Típicamente son los de preparación de los procesos necesarios para que la maquinaria productiva funcione (*setup cost*) y los de finalización del proceso al acabarse la producción (*takedown cost*). Puede suceder que estos costes de preparación y finalización dependan de la secuencia de elaboraciones que deban efectuar los recursos productivos.

Los costes variables de producción son costes relacionados con los trabajadores, el material, la energía, los suministros, etc., que dependen del nivel de producción. La suposición más usual es que el coste variable unitario es constante en toda la amplitud del intervalo de producción que se considere y que, por tanto, el coste variable total puede obtenerse multiplicando la cantidad producida por este coste unitario. Sin embargo, cuando la producción es en lotes, el coste variable unitario promedio puede depender del tamaño del lote. Al producirse el lote van disminuyendo progresivamente los problemas de calidad y rechazos y se va produciendo el aprendizaje de los trabajadores, con que disminuyen los costes variables. Es el efecto de la *curva de aprendizaje*, que induce una función de coste variable total cóncava.

El efecto contrario sobre el coste total variable se produce cuando el incremento de producción obliga a emplear procedimientos más costosos; por ejemplo cuando se deben realizar horas extra para respetar la planificación se aumenta el coste de producción a causa del mayor coste de éstas y de las eventuales primas. Además puede ocurrir que la eficiencia sea menor durante este tiempo extra. Lo mismo puede decirse de turnos que se añadan a los habituales. Otros ejemplos de situaciones conducente a coste variable total convexo son aquellas que corresponden a la utilización de maquinaria menos adaptada, personal menos formado, procedimientos especiales más caros, a la subcontratación, etc., para lograr aumentos en la tasa de producción.

Cuando se piensa en cambiar la tasa de producción de un período a otro es necesario considerar los costes asociados a dicho cambio, tales como el de modificar máquinas y equipos, el de transferir personal de unas secciones a otras, el de la replanificación de las tasas individuales de producción y el de controlar el resultado real del cambio, etc.; costes que se habrían evitado de mantenerse el ritmo igual que antes.

Si hay que variar el número de empleados debido al incremento o a la reducción de la tasa de producción, se producirán costes asociados a la contratación o al despido, costes asociados al adiestramiento y a la readaptación del personal, además de los intangibles causados por unas relaciones laborales más tensas, etc.

A largo plazo los planes de producción se relacionan íntimamente con los de adquisición de más capacidad, por ejemplo nuevas plantas o nuevos equipos. En este caso habrá que considerar toda una serie de factores económicos externos para tomar las decisiones adecuadas. Al corto plazo relativo en el que se mueve la planificación de operaciones aquí estudiado se deberá suponer habitualmente la capacidad definida por otro tipo de decisiones tomadas en otro contexto.

Los planes de producción afectan al nivel de stock; los planes pueden llevar a generar stock en unos períodos para ser consumido al cabo de cierto tiempo cuando la demanda esté en alza debido a factores estacionales, o bien a causa de que sea necesario fabricar series largas para no incurrir en costes totales elevados de preparación. Esto creará así mismo una obra en curso importante. Tendrá que buscarse un equilibrio entre el coste de almacenar y el de producir.

No producir lo que la demanda solicita ocasiona pérdidas de ventas o retrasos en las entregas, que se traducen en unos costes tangibles de pérdida de ganancias o penalizaciones por retrasos en la entrega, a los que se añaden otros intangibles de reducción de la confianza de los clientes. El no poder ofrecer plazos de entrega competitivos hará perder ventas. El problema consiste en coordinar la producción con la demanda sin que las faltas de sincronización originen retrasos importantes, haciendo intervenir adecuadamente el stock. Si esta coordinación no se alcanza a través de la función planificación se actuará con escasa eficiencia.

La planificación tendrá, tal como se ha visto ya, una problemática específica según el entorno productivo de que se trate. En general pueden presentarse características de:

- Múltiples productos que compiten por los mismos recursos, que pueden ser máquinas, trabajo, dinero, etc. El problema consistirá en asignar de forma eficiente éstos a cada uno de los productos.
- Múltiples procedimientos que son variantes posibles para la obtención de determinados productos; pueden ser rutas alternativas en la misma planta, plantas de fabricación distintas, la disyuntiva subcontratar versus hacer, horas extra frente a horas normales, materiales alternativos, métodos distintos de elaboración, etc. El problema consiste en fijar la cantidad de producto a hacer por cada uno de los procedimientos.
- Múltiples etapas o fases de fabricación, es decir, productos en cuya elaboración intervienen distintos centros. Aquí el problema consiste en planificar la producción de cada centro pero controlando el nivel de stocks entre ellos y garantizando que la demanda externa se satisface con las salidas de la última etapa.
- Demanda estática o dinámica, es decir, si en el horizonte de planificación se considera o no constante la demanda por intervalo; en el caso más frecuente de demanda cambiante se pueden adoptar varias líneas puras de acción:

1. Constituir stock en intervalos de baja demanda para servir desde aquél cuando ésta crezca en el futuro, manteniendo prácticamente constante el nivel de producción en cada intervalo.
2. Aceptar retrasos y pérdidas de ventas en los intervalos de máxima actividad y demanda.
3. Realizar las horas extra necesarias en los períodos punta y trabajar menos en los de baja demanda para variar la producción sin cambios en la mano de obra o en los equipos.
4. Subcontratar parte del trabajo en los momentos de demanda punta.
5. Variar la capacidad de producción mediante cambios en la cantidad de mano de obra a base de contratación y despido, empleo temporal, regulación, etc.
6. Variar la capacidad mediante cambios en la planta y en los equipos; habitualmente dado el largo plazo de ejecución de esta medida no es utilizable en la planificación a corto (relativamente) plazo, menos de un año, y por consiguiente la consideraremos no posible suponiendo fijas las capacidades de los medios, máquinas e instalaciones (lo que no quiere decir constantes, pues serán función de las variaciones definidas por decisiones de otro nivel).

Ya se ha dicho que la mejor política seguramente no es ninguna de las anteriores, sino una combinación adecuada de ellas, que tenga en cuenta los costes asociados y obtenga una suma de costes lo más reducida posible.

### **3.1.2 Práctica de la planificación global**

En el presente apartado vamos a analizar algunos procedimientos, de distinta índole, que en las circunstancias apropiadas permiten desarrollar la planificación global o agregada.

#### **3.1.2.1 Determinación intuitiva de un plan maestro**

Vamos a desarrollar un ejemplo de determinación de un plan maestro en un caso ficticio muy sencillo, en el que todos los productos de la empresa se han agrupado en uno sólo utilizando una unidad común (familia única o recurso crítico único). Sean los datos de la *figura 3.1.2.1* que corresponden a un horizonte de 12 meses.



(1) Mes	(2) Días lab.	(3) Acumul.	(4) Demanda	(5) D. acum.	(6) (5)/(3)
ENE	23	23	1.050	1.050	45,65
FEB	20	43	950	2.000	46,51
MAR	22	65	900	2.900	44,62
ABR	19	84	800	3.700	44,05
MAY	22	106	750	4.450	41,98
JUN	21	127	700	5.150	40,55
JUL	23	150	600	5.750	38,33
AGO	5	155	500	6.250	40,32
SEP	21	176	750	7.000	39,77
OCT	22	198	1.000	8.000	40,40
NOV	22	220	1.200	9.200	41,82
DIC	20	240	1.400	10.600	44,17
Σ	240		10.600		44,17

Fig. 3.1.2.1 Datos para la planificación

Para producir en 240 días las 10.600 unidades de la demanda basta utilizar una tasa constante de 44,17 unidades/día. Sin embargo, en ausencia de stock inicial, con dicha tasa no puede cubrirse la demanda de los 3 primeros meses, enero, febrero y marzo. Hacen falta para sobrepasar FEBRERO, donde existe el mayor valor en la columna (6), por lo menos:

$$2.000 - 43 \times 44,77 = 101 \text{ unidades de stock inicial}$$

En la *figura 3.1.2.2* hemos representado la demanda acumulada en función de los días laborables. En dicha figura también aparecen unas líneas que indican diferentes posibilidades de planes maestros de producción. La línea recta superior corresponde a un plan con tasa homogénea de producción (44,17 unidades/día) que se ha trazado para visibilidad de la figura a partir de una existencia de stock inicial de unas 500 unidades. Al estar por encima siempre dicha línea de la demanda acumulada significa que siempre la producción acumulada supera la demanda, es decir que según este plan siempre existe stock. El coste de este stock, que será proporcional al número de unidades existentes por el tiempo, viene indicado por el área comprendida entre ambas líneas. Para reducir el stock existente, y por tanto su coste, será conveniente utilizar otro plan, tal como el plan 1, en el que la tasa de la demanda sea diferente según los meses, y por tanto en el que el área comprendida entre la línea de la producción acumulada y la demanda acumulada sea menor.

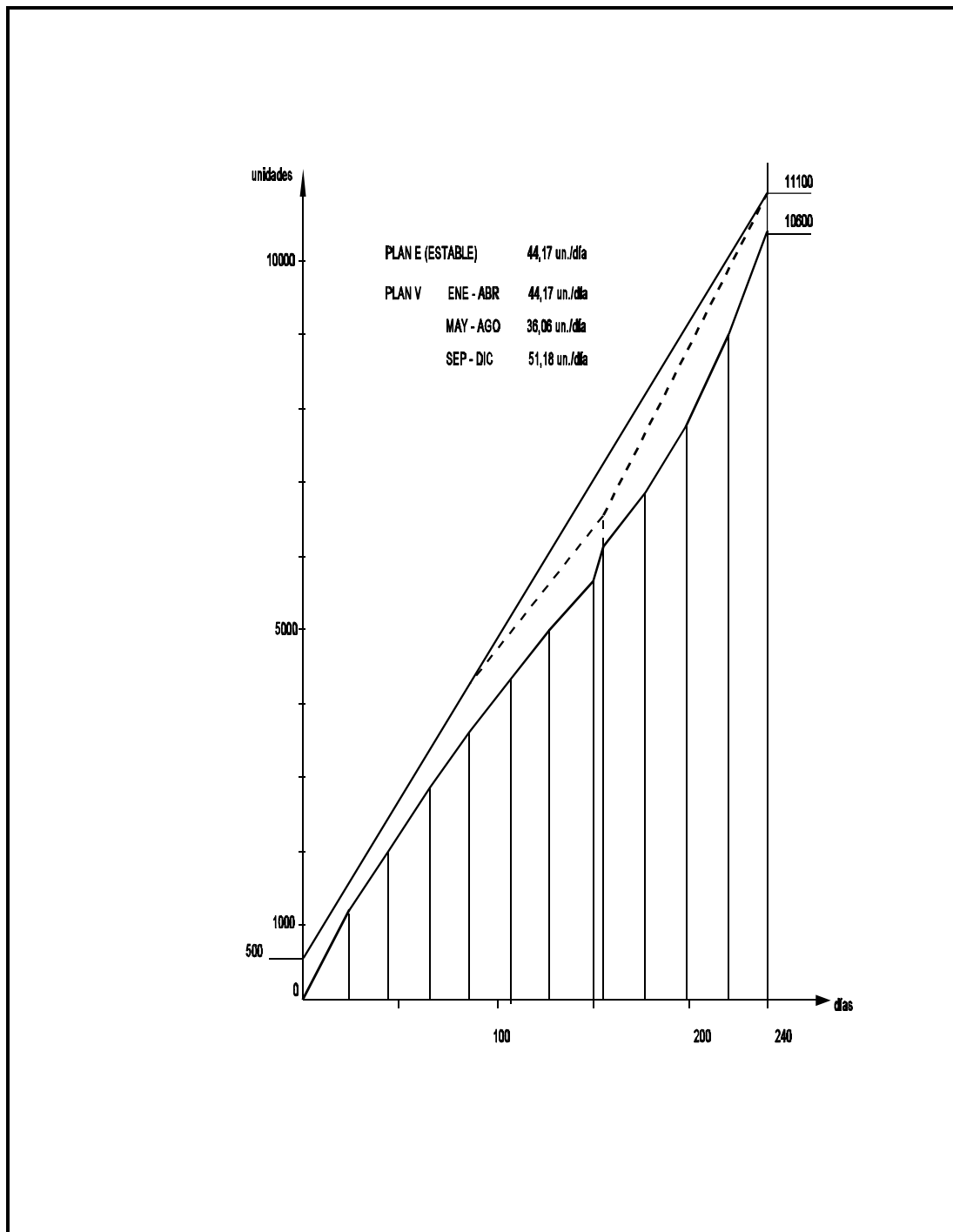


Fig. 3.1.2.2 Representación de la demanda y la disponibilidad (producción más stock) acumuladas en el caso de la figura 3.1.2.1

Consideremos además los siguientes datos adicionales:

- Tasa de producción en horas normales: 40 un./día
- Tasa de producción en horas extra: hasta 10 un./día
- Coste de producción en h. normal: 100 um/unidad
- Coste de producción en h. extra: 150 um/unidad
- Stock de seguridad: 10% de la demanda prevista mensual
- Stock inicial: 90 unidades
- Coste de exceso de stock: 20 um/unidad-mes
- Coste de defecto de stock: 40 um/unidad-mes

Estudiemos en primer lugar el concepto de stock de seguridad: si la demanda de la columna (4) se basara en compromisos en firme fiables, para atenderla sería necesario planificar para cada mes una producción tal que sumada al stock inicial del mismo fuese superior o igual a la demanda de dicho mes, pero dado que en general la demanda se basa en una previsión el valor de la columna (4) sólo puede interpretarse como un valor esperado y es posible que se produzcan desviaciones entre la demanda real y dicho valor previsto. Las desviaciones en sentido negativo (demanda real inferior a la prevista) se traducirán solamente en exceso de stock, que se intentará corregir en las sucesivas planificaciones; pero las desviaciones positivas se traducirán verosímelmente en rotura de stock y pérdidas de venta o entregas diferidas, con el consiguiente coste. Para paliar en parte estos efectos se nos solicita un plan tal que, de cumplirse estrictamente las previsiones, mantenga a final de cada mes un stock igual al 10% de la demanda de dicho mes. Para lograrlo vamos a corregir la demanda para tener en cuenta dicho stock como puede verse en la *figura 3.1.2.3*.

En la columna (5) hemos indicado el stock ideal (aunque en la primera posición hemos reseñado el stock inicial real), lo que nos ha permitido en la columna (6) denominada diferencia, indicar el incremento o decremento de stock, que es la cantidad en la que hay que corregir la demanda. En enero la diferencia es 15 (se empieza con 90 unidades de stock y quiere terminarse con 105) lo que nos lleva a una demanda corregida de  $1.050 + 15 = 1.065$  unidades. En definitiva, al empezar el horizonte de 12 meses con 90 unidades de stock y pretender terminar en diciembre con 140, la diferencia global es de 50 unidades que se suman a la demanda acumulada. Con las reglas dadas pretendemos pues fabricar 10.650 unidades (en lugar de las 10.600 de la tabla anterior) lo que nos da una tasa media de 44,375 unidades/día (en lugar de las 44,17). Con esta tasa, mantenida homogéneamente los doce meses, tampoco es posible obtener una producción acumulada que supere a la demanda en los meses de enero, febrero y marzo (es decir, que además de atender la demanda real, permita constituir el stock ideal).

(1) Mes	(2) Días lab.	(3) Acum.	(4) Demanda	(5) Stock ideal	(6) Dif.	(7) Demanda corregida	(8) Demanda c. acum.	(9) (8)/(3)
stock inicial				90				
ENE	23	23	1.050	105	15	1.065	1.065	46,30
FEB	20	43	950	95	-10	940	2.005	46,63
MAR	22	65	900	90	-5	895	2.900	44,62
ABR	19	84	800	80	-10	790	3.690	43,93
MAY	22	106	750	75	-5	745	4.435	41,84
JUN	21	127	700	70	-5	695	5.130	40,39
JUL	23	150	600	60	-10	590	5.720	38,13
AGO	5	155	500	50	-10	490	6.210	40,06
SEP	21	176	750	75	25	775	6.985	39,69
OCT	22	198	1.000	100	25	1.025	8.010	40,45
NOV	22	220	1.200	120	20	1.220	9.230	41,95
DIC	20	240	1.400	140	20	1.420	10.650	44,38
Σ	240		10.600		50	10.650		44,375

Fig. 3.1.2.3 Datos de la demanda corregidos

(1) Mes	(2) Días lab.	(3) Demanda	(4) Stock ideal	PLAN ESTABLE		(7) tasa	PLAN 1	
				(5) Producción	(6) Stock final		(8) Producción	(9) Stock final
stock inicial					90			90
ENE	23	1.050	105	1.021	61	50	1.150	190
FEB	20	950	95	888	-1	50	1.000	240
MAR	22	900	90	976	75	45	990	330
ABR	19	800	80	843	118	40	760	290
MAY	22	750	75	976	344	40	880	420
JUN	21	700	70	932	576	40	840	560
JUL	23	600	60	1.021	997	40	920	880
AGO	5	500	50	222	719	40	200	580
SEP	21	750	75	932	901	40	840	670
OCT	22	1.000	100	976	877	45	990	660
NOV	22	1.200	120	976	653	50	1.100	560
DIC	20	1.400	140	888	141	50	1.000	160
Σ	240	10.600		10.651			10.670	

Fig. 3.1.2.4 Dos planes alternativos

En la *figura 3.1.2.4* se indican dos planes, el estable y el plan 1, y se comparan sus efectos en el stock final de cada mes. El plan estable es el que corresponde a la tasa constante 44,375 unidades/día, que ya hemos señalado no era suficiente para darnos el stock de seguridad deseado del 10%, e incluso ni para atender la demanda esperada: en el mes de febrero se produce una ruptura de stock de 1 unidad, es decir, la demanda esperada supera en una unidad a la producción planificada más el stock inicial; dada la pequeña cuantía de la ruptura la hemos mantenido tratándola como un caso más de defecto de stock respecto al ideal.

El plan 1, determinado intuitivamente con valores muy concretos y en número limitado de la tasa de producción:

- 40 unidades/día: producción sin horas extra
- 45 unidades/día: producción con utilización de la mitad de las horas extra
- 50 unidades/día: producción con utilización de todas las horas extra

proporciona un stock final de cada mes que supera el stock ideal.

	PLAN ESTABLE	PLAN 1
prod.normal (unidades)	9.600	9.600
prod.extra (unidades)	1.051	1.070
defecto stock (un.-mes)	155	0
exceso stock (un.-mes)	4.556	4.480
)))))))))	))))))	))))))
coste prod.normal	960.000	960.000
coste prod.extra	157.650	160.500
coste defecto stock	6.200	- - -
coste exceso stock	91.120	89.600
	))))))	))))))
TOTAL	1.214.970	1.210.100

*Fig. 3.1.2.5 Costes comparados de los planes*

Dados los inevitables redondeos, el plan estable conduce a una producción 1 unidad por encima de lo estrictamente necesario (stock final de diciembre 141), mientras que la utilización de los valores fijos 40, 45 y 50 de la tasa conduce en el plan 1 a una producción 20 unidades superior a la deseada (160 unidades de stock final en diciembre). Podría paliarse este efecto utilizando un valor de la tasa algo inferior a 45 unidades/día en octubre (44,09 unidades/día). Sin embargo ya en las condiciones actuales el plan 1 tiene una evaluación económica mejor que el plan estable, como puede verse en la *figura 3.1.2.5*, consistente en una mejora de 4.870 *um*, aún teniendo en cuenta el coste excesivo de producción (3.000 *um*) debido a las unidades producidas por encima de las necesidades.

Un plan de las características del plan 1, pero que se ajustase a la producción de las 10.650 unidades que se precisan, tendría un valor económico unas 8.000 *um* inferior al plan estable.

### 3.1.2.2 Determinación del plan maestro mediante la tabla de costes (método de Bowman)

Una forma alternativa de tratar el problema anterior es la de construir una tabla de 144 casillas, 12 x 12, en donde en las filas se indican las necesidades definidas por la demanda corregida de cada mes, y en columna las posibilidades de producción, dado que es posible producir en horas normales y en horas extraordinarias, cada columna tiene dos subcolumnas, una encabezada por las disponibilidades de producción en horas normales (días laborables x 40) y otra por las de producción en horas extra (días laborables x 10). En la parte central de las casillas hemos indicado el coste correspondiente a atender la demanda con las disponibilidades: por ejemplo, atender la demanda de un mes con la producción normal de dicho mes tiene un coste de 100 *um*/unidad, y de 150 si se atiende con las horas extraordinarias; sin embargo si atendemos la demanda con las disponibilidades de producción de un mes anterior, dichas cantidades deben ser aumentadas en 20 unidades por cada mes de almacenaje que ello represente. La tabla, que es muy voluminosa, se ha descompuesto en dos y la *figura 3.1.2.6* muestra sólo la mitad izquierda antes de proceder a rellenar la tabla efectuando la asignación de la producción potencial a la demanda. Hemos supuesto, de momento, la imposibilidad de atender la demanda mediante la producción en un mes *posterior* al de la necesidad. Estrictamente en nuestro caso esto es posible (como en el plan estable) al coste de 40 *um* por mes de retraso, pero hemos preferido eliminar inicialmente esta posibilidad para incrementar la sencillez de la presentación.

Una vez establecido el cuadro vamos a atender sucesivamente la demanda de cada mes, con la fuente o posibilidad *más económica*, es decir, primero atenderemos enero, después febrero, etc. Para ello cada vez que asignemos parte de la producción potencial a una demanda deberemos efectuar las sustracciones subsiguientes para conocer el remanente de capacidad de producción que queda para la eventual utilización en meses siguientes.

Entre enero y abril necesitamos utilizar cada mes parte de las horas extra para atender las necesidades de dicho mes, pero no la constitución de stock. Los remanentes para meses posteriores, si se precisan, son exclusivamente los correspondientes a las horas extra no utilizadas y, por consiguiente, de coste elevado.

En mayo, junio y julio con parte de las horas normales podemos atender la demanda de dichos meses. Aunque en agosto la demanda es baja, también lo es el número de días laborables y, por consiguiente, la oferta de producción, por ello la demanda, 490 unidades se atiende con 200 unidades, todas las producibles en agosto en horas normales, más 290 producidas en julio, también en horas normales, almacenadas durante un mes, ya que resultan más baratas que las producidas en agosto en horas extra.

	ENE 920 230	FEB 800 200	MAR 880 220	ABR 760 190	MAY 880 220	JUN 840 210
ENE 1.065	920 230 100 150					
FEB 940	120 170	100 150				
MAR 895	140 190	120 170	100 150			
ABR 790	160 210	140 190	120 170	100 150		
MAY 745	180 230	160 210	140 190	120 170	100 150	
JUN 695	200 250	180 230	160 210	140 190	120 170	100 150
JUL 590	220 270	200 250	180 230	160 210	140 190	120 170
AGO 490	240 290	220 270	200 250	180 230	160 210	140 190
SEP 775	260 310	240 290	220 270	200 250	180 230	160 210
OCT 1.025	280 330	260 310	240 290	220 270	200 250	180 230
NOV 1.220	300 350	280 330	260 310	240 290	220 270	200 250
DIC 1.420	320 370	300 350	280 330	260 310	240 290	220 270
remanen. producc.						

Fig. 3.1.2.6 Bowman-1: Tabla inicial (mitad izquierda)

	ENE 920 230	FEB 800 200	MAR 880 220	ABR 760 190	MAY 880 220	JUN 840 210
ENE 1.065	920 230 100 150 920 145					
FEB 940	---- 85 120 170	800 200 100 150 800 140				
MAR 895	85 140 190	---- 60 120 170	880 220 100 150 880 15			
ABR 790	85 160 210	60 140 190	---- 205 120 170	760 190 100 150 760 30		
MAY 745	85 180 230	60 160 210	205 140 190	---- 160 120 170	880 220 100 150 745	
JUN 695	85 200 250	60 180 230	205 160 210	160 140 190	135 220 120 170	840 210 100 150 695
JUL 590	85 220 270	60 200 250	205 180 230	160 160 210	135 220 140 190	145 210 120 170
AGO 490	85 240 290	60 220 270	205 200 250	160 180 230	135 220 160 210	145 210 140 190
SEP 775	85 260 310	60 240 290	205 220 270	160 200 250	135 220 180 230	145 210 160 210
OCT 1.025	85 280 330	60 260 310	205 240 290	160 220 270	135 220 200 250	145 210 180 230
NOV 1.220	85 300 350	60 280 330	205 260 310	160 240 290	135 220 220 270	145 210 200 250
DIC 1.420	85 320 370	60 300 350	205 280 330	160 260 310	135 220 240 290	145 210 220 270 145
remanen. producc.	85 920 145	60 800 140	205 880 15	160 760 30	135 220 745 ----	---- 210 840 ----

Fig. 3.1.2.7 (a) - Bowman-1: Tabla final (mitad izquierda)



	JUL 920 230	AGO 200 50	SEP 840 210	OCT 880 220	NOV 880 220	DIC 800 200
ENE 1.065						
FEB 940						
MAR 895						
ABR 790						
MAY 745						
JUN 695						
JUL 590	920 230 100 150 590					
AGO 490	330 230 120 170 290	200 50 100 150 200				
SEP 775	40 230 160 210	---- 50 120 170	840 210 100 150 775			
OCT 1.025	40 230 160 210	50 160 210	65 210 120 170 65	880 220 100 150 880 80		
NOV 1.220	40 230 180 230	50 160 210	---- 210 140 190	---- 140 120 170 120	880 220 100 150 880 220	
DIC 1.420	40 230 200 250 40	50 180 230 5	210 160 210 210	20 140 190 20	---- ---- 120 170	800 200 100 150 800 200
remanen. producc.	---- 230 960 ----	45 200 5	---- 840 210	---- 880 220	---- 880 220	---- ---- 800 200

Fig. 3.1.2.7 (b) - Bowman-1: Tabla final (mitad derecha)

En septiembre volvemos a la situación de JULIO, con parte de las horas normales podemos atender la demanda. Los tres últimos meses del año, con demanda creciente, debemos proceder a la búsqueda de los remanentes de oferta productiva más baratos y cada vez es más difícil encontrarlos, por lo que debemos retroceder más en el tiempo y más caro resultan. Por ejemplo, en diciembre utilizamos 145 unidades que se producen en junio (con las que se agotan todas las horas normales de junio), aunque las más caras sean 5 producidas en horas extra en agosto.

Los resultados finales se encuentran en la doble *figura 3.1.2.7 (a) y (b)*, en cuyas dos últimas filas aparecen los remanentes sin utilizar, así como las unidades producidas cada mes en horas normales y extra.

Dichos resultados se han resumido en la *figura 3.1.2.8*, en la que hemos destacado la producción en horas normales y extras de cada mes (columnas (11a) y (11b)), así como el stock final de cada mes (columna (12)), que dadas las hipótesis adoptadas es forzosamente superior o igual al ideal.

PLAN BOWMAN_1								
(1)	(2)	(3)	(4)	(10)	(11)	(11a)	(11b)	(12)
Mes	Días lab.	Demanda	Stock ideal	tasa	Producción	PHN	PHE	Stock final
stock inicial								90
ENE	23	1.050	105	50	1.065	920	145	105
FEB	20	950	95	47,0	940	800	140	95
MAR	22	900	90	40,7	895	880	15	90
ABR	19	800	80	41,6	790	760	30	80
MAY	22	750	75	33,9	745	745	--	75
JUN	21	700	70	40	840	840	--	215
JUL	23	600	60	40	920	920	--	535
AGO	5	500	50	40,1	205	200	5	240
SEP	21	750	75	50	1.050	840	210	540
OCT	22	1.000	100	50	1.100	880	220	640
NOV	22	1.200	120	50,0	1.100	880	220	540
DIC	20	1.400	140	50,0	1.000	800	200	140
Σ	240	10.600			10.650	9.46	1.185	
						5		

*Fig. 3.1.2.8 Resumen de los resultados obtenidos mediante el método de la tabla PLAN Bowman\_1*

En la *figura 3.1.2.9* hemos determinado el coste del plan, que es, como cabía suponer, mejor que los anteriormente evaluados.

PLAN BOWMAN_1	
prod.normal (unidades)	9.465
prod.extra (unidades)	1.185
defecto stock (un.-mes)	0
exceso stock (un.-mes)	2.235
)))))))))	))))))
coste prod.normal	946.500
coste prod.extra	177.750
coste defecto stock	---
coste exceso stock	44.700
	))))))
TOTAL	1.168.950

*Fig. 3.1.2.9 Costes del Plan Bowman\_1*

En el caso de que consideráramos la posibilidad de diferir entregas (o de tener un stock inferior al ideal) a un coste, que en nuestro caso es 40 *um/un.-mes*, el aspecto de la tabla sería análogo al ya utilizado, salvo que todas las casillas serían utilizables y no sólo las comprendidas en y debajo de la diagonal principal.

No obstante el cálculo de la solución óptima del problema exigiría procedimientos más sofisticados, en general, que el empleado hasta el momento, basados en el llamado *algoritmo del transporte*. Incluimos la solución para nuestro caso que, dada su simplicidad, es intuitivamente inmediata, y a la que corresponde, respecto a la solución anterior, el ridículo decremento de coste de 300 *um*. La hemos hallado a partir de la observación de que, dada la estructura de costes, únicamente podríamos obtener razonablemente beneficio de un retraso de producción fabricando en horas normales lo que hubiésemos estado fabricando el mes anterior en horas extra (140 *um/un.* contra 150 *um/un.*). Dada la forma cóncava de la curva de la demanda esto solamente se produce entre abril/mayo, y cuando el número de unidades fabricadas en horas extra está en franco decremento. En las *figuras 3.1.2.10* y *3.1.2.11* hemos resumido los resultados y costes del plan Bowman\_2.

	ENE 920 230	FEB 800 200	MAR 880 220	ABR 760 190	MAY 880 220	JUN 840 210
ENE 1.065	920 230 100 150 920 145	140 190	180 230	220 270	260 310	300 350
FEB 940	---- 85 120 170	800 200 100 150 800 140	140 190	180 230	220 270	260 310
MAR 895	85 140 190	---- 60 120 170	880 220 100 150 880 15	140 190	180 230	220 270
ABR 790	85 160 210	60 140 190	---- 205 120 170	760 190 100 150 760	140 190 30	180 230
MAY 745	85 180 230	60 160 210	205 140 190	---- 190 120 170	850 220 100 150 745	140 190
JUN 695	85 200 250	60 180 230	205 160 210	190 140 190	105 220 120 170	840 210 100 150 695
JUL 590	85 220 270	60 200 250	205 180 230	190 160 210	105 220 140 190	145 210 120 170
AGO 490	85 240 290	60 220 270	205 200 250	190 180 230	105 220 160 210	145 210 140 190
SEP 775	85 260 310	60 240 290	205 220 270	190 200 250	105 220 180 230	145 210 160 210
OCT 1.025	85 280 330	60 260 310	205 240 290	190 220 270	105 220 200 250	145 210 180 230
NOV 1.220	85 300 350	60 280 330	205 260 310	190 240 290	105 220 220 270	145 210 200 250
DIC 1.420	85 320 370	60 300 350	205 280 330	190 260 310	105 220 240 290	145 210 220 270 145
remanen. producc.	85 920 145	60 800 140	205 880 15	190 760	105 220 775 ----	---- 210 840 ----

Fig. 3.1.2.10(a) Bowman-2: Tabla final (mitad izquierda)

PLAN BOWMAN_2								
(1)	(2)	(3)	(4)	(10)	(11)	(11a)	(11b)	(12)
Mes	Días lab.	Demanda	Stock ideal	tasa	Producción	PHN	PHE	Stock final
stock inicial								90
ENE	23	1.050	105	50	1.065	920	145	105
FEB	20	950	95	47,0	940	800	140	95
MAR	22	900	90	40,7	895	880	15	90
ABR	19	800	80	40,0	760	760	--	50
MAY	22	750	75	35,2	775	775	--	75
JUN	21	700	70	40	840	840	--	215
JUL	23	600	60	40	920	920	--	535
AGO	5	500	50	40,1	205	200	5	240
SEP	21	750	75	50	1.050	840	210	540
OCT	22	1.000	100	50	1.100	880	220	640
NOV	22	1.200	120	50,0	1.100	880	220	540
DIC	20	1.400	140	50,0	1.000	800	200	140
Σ	240	10.600			10.650	9.495	1.155	

Fig. 3.1.2.10(b) Resumen del plan Bowman\_2

PLAN BOWMAN_2	
prod.normal (unidades)	9.495
prod.extra (unidades)	1.155
defecto stock (un.-mes)	30
exceso stock (un.-mes)	2.235
))))))))))	))))))
coste prod.normal	949.500
coste prod.extra	173.250
coste defecto stock	1.200
coste exceso stock	44.700
	))))))
TOTAL	1.168.650

Fig. 3.1.2.11 Costes del Plan Bowman\_2

### 3.1.2.3 Otro ejemplo de planificación intuitiva

En una planta se fabrican varios productos cuya demanda mensual se ha estimado para el próximo año. Todos los productos precisan para su realización cierto número de unidades del único recurso crítico existente, una línea de montaje que funciona con gran aportación de mano de obra, y se ha transformado la demanda mensual de dichos productos en necesidades de dicho recurso, obteniéndose los datos de la *figura 3.1.2.12* (por tanto las cantidades de los productos *se miden* en cierta forma en unidades- equivalentes del recurso). El stock inicial (fin de diciembre) equivale a 500 unidades del recurso, y se desea que a final del año próximo se tenga un stock semejante. Se realiza la planificación durante el mes de diciembre, y la tasa diaria de utilización del recurso durante dicho mes es de 30 unidades/día, con un nivel de mano de obra en la sección correspondiente de 30 trabajadores.

(1) Mes	(2) Días lab.	(3) Acumul.	(4) Necesid.	(5) N. acum.	(6) (4)/(2)	(7) (5)/(3)
ENE	22	22	840	840	38,20	38,20
FEB	18	40	1.080	1.920	60,00	48,00
MAR	22	62	1.320	3.240	60,00	52,26
ABR	21	83	1.080	4.320	51,40	52,05
MAY	22	105	780	5.100	35,50	48,57
JUN	21	126	720	5.820	34,30	46,19
JUL	21	147	660	6.480	31,40	44,08
AGO	13	160	480	6.960	36,90	43,50
SEP	20	180	480	7.440	24,00	41,33
OCT	23	203	360	7.800	15,70	38,42
NOV	21	224	360	8.160	17,10	36,43
DIC	20	244	380	8.640	24,00	35,41
Σ	244		8.640		35,41	

*Fig. 3.1.2.12 Datos de iniciales para la planificación*

La utilización del recurso puede realizarse:

- en horario normal, con una capacidad máxima de 36 unidades/día,
- en horario extra, siendo la capacidad máxima adicional de 7 unidades/día,

aunque su producción máxima efectiva depende de la mano de obra:

- en horario normal 1 unidad/día por operario (hasta límite de 36 unidades/día),

- en horario extra 0,25 unidades/día por operario (hasta el límite de 7 unidades/día).

Existe una posibilidad adicional:

- subcontratar horas de una instalación análoga en una empresa vecina, hasta un máximo de 15 unidades/día.

Se tienen estimaciones de los siguientes costes:

- coste medio de almacenaje (posesión de stock): 12.000 PTA por unidad-equivalente y año (se trata del resultado de una elaboración puesto que lo que se almacenan son productos terminados y no unidades del recurso),
- coste de cambiar el nivel de la mano de obra: 250.000 PTA por operario contratado o despedido (según lo dicho anteriormente la variación de un operario repercute en la capacidad de producción de la sección crítica en 1 unidad diaria en horario normal y 0,25 unidades diarias en horas extra, hasta los límites fijados por las instalaciones),
- sobrecoste de las horas extra: 1.300 PTA más por unidad- equivalente (se trata del resultado de una elaboración así mismo),
- sobrecoste de la subcontratación: 1.650 PTA más por unidad-equivalente subcontratada (id.),
- coste de diferir entregas: 2.300 PTA por unidad y mes de retraso (id.),

Analizaremos distintos planes alternativos de producción para el próximo año y los evaluaremos económicamente. El perfil de las necesidades acumuladas y las tasas de producción medias necesarias, teniendo en cuenta los días laborables, aparecen en las columnas (5) y (7) de la *figura 3.1.2.12* y una visión intuitiva la podemos obtener en la *figura 3.1.2.13*, en la que hemos incluido una representación de algunos planes de producción más o menos adaptados a la demanda, jugando con el stock (curva del plan por encima de la de necesidades) y con los retrasos de entregas (por debajo).

Plan\_1: Mantener constante la tasa de producción durante todo el año:

$$\frac{8640}{244} = 35,41 \text{ un./día}$$

En la *figura 3.1.2.13* se observa que se producirán retrasos importantes en las entregas durante buena parte del año (diferencia en abscisas entre demanda y plan, sirviéndose los pedidos en el mismo orden de llegadas).

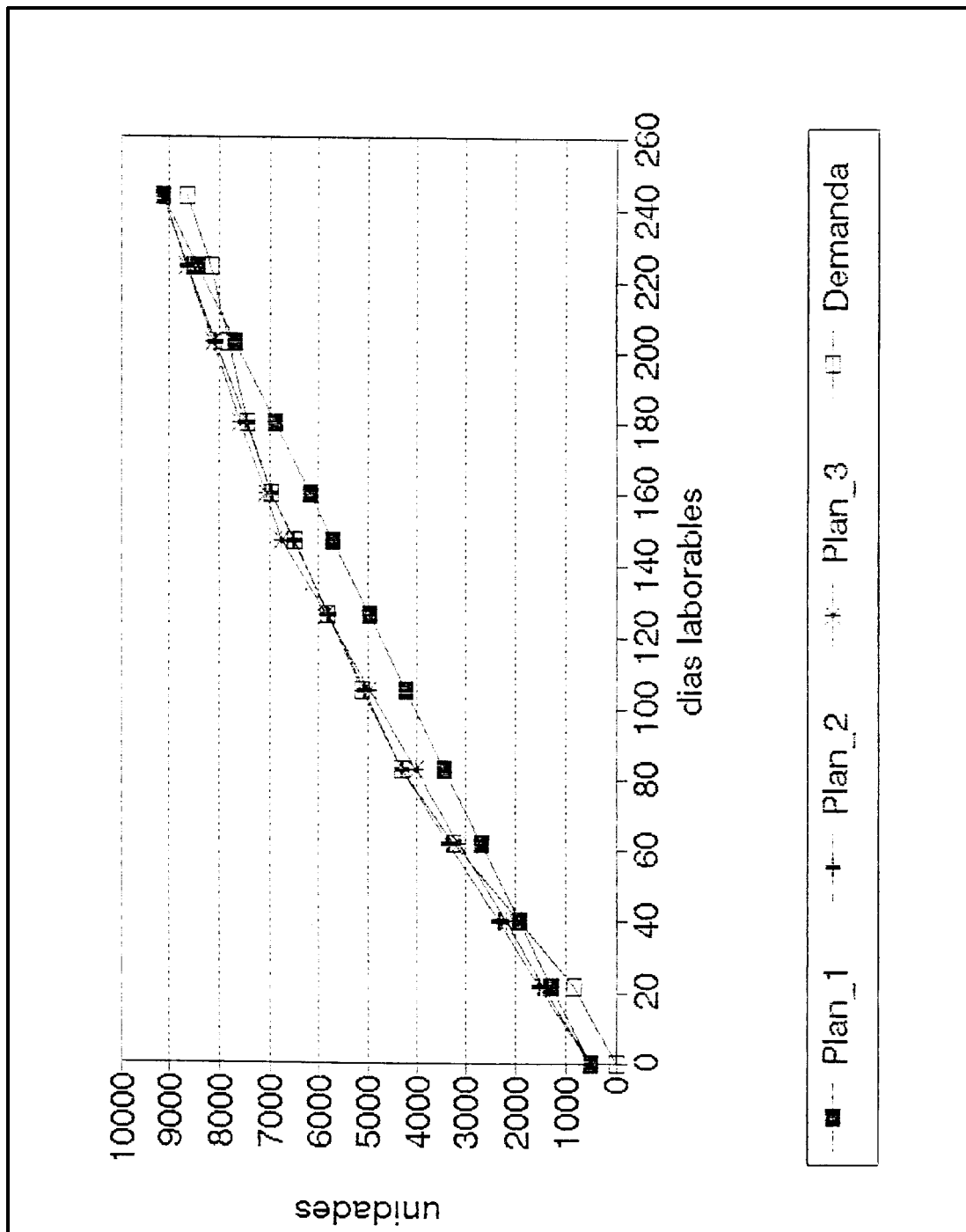


Fig. 3.1.2.13 Representación de la demanda acumulada y de las disponibilidades correspondientes a los planes en el caso definido en la figura 3.1.2.12



Plan\_2: Variar la tasa de producción dos veces no incurriendo en rupturas prácticamente nunca. Por ejemplo:

del día 1 al 83 tasa:  $\frac{4320 - 500}{83} = 46,02 \text{ un./día}$

del día 84 al 160 tasa:  $\frac{6960 - 4320}{77} = 34,29 \text{ un./día}$

del día 161 al 244 tasa:  $\frac{8640 - 6960 + 500}{84} = 25,95 \text{ un./día}$

Plan\_3: Plan intermedio que intenta no tener ni mucho stock ni muchos retrasos, cambiando sólo una vez la tasa de producción. Por ejemplo:

del día 1 al 147 tasa:  $\frac{6750 - 500}{147} = 42,52 \text{ un./día}$

del día 148 al 244 tasa:  $\frac{8640 - 6750 + 500}{97} = 24,64 \text{ un./día}$

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Mes	Días	Neces.	Plantilla total ±		Produc.	Stock	Retras.	unid.en hora-ex	unidad subcon.
inicial			30			500			
ENE	22	840	36	(+) 6	779	439			
FEB	18	1.080	36		637		4		
MAR	22	1.320	36		779		545		
ABR	21	1.080	36		744		881		
MAY	22	780	36		779		882		
JUN	21	720	36		744		858		
JUL	21	660	36		744		774		
AGO	13	480	36		460		794		
SEP	20	480	36		708		566		
OCT	23	360	36		814		112		
NOV	21	360	36		744	272			
DIC	20	380	36		708	500			
Σ	244	8.640	432	6		1.211	5.416		
cost. unit. (KPTA)				250		1	2,3	1,3	1,65
coste total				1.500		1.211	12.456,8		
15.167,800 KPTA									

Fig. 3.1.2.14 Comportamiento del Plan\_1

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Mes	Días	Neces.	Plantilla total ±		Produc.	Stock	Retras.	unid.en hora-ex	unidad subcon.
inicial			30			500			
ENE	22	840	36 (+) 6		1.013	673		154	67
FEB	18	1.080	36		828	421		126	54
MAR	22	1.320	36		1.013	114		154	67
ABR	21	1.080	36		966			147	63
MAY	22	780	34		754		26	6	
JUN	21	720	34 (-) 2		720		26	6	
JUL	21	660	34		720	34		6	
AGO	13	480	34		446			4	
SEP	20	480	26		519	39			
OCT	23	360	26 (-) 8		597	276			
NOV	21	360	26		545	461			
DIC	20	380	26		519	500			
Σ	244	8.640	384	16		2.518	52	603	251
cost. unit. (KPTA)				250		1	2,3	1,3	1,65
coste total				4.000		2.518	119,6	783,9	414,15
7.835,650 KPTA									

Fig. 3.1.2.15 Comportamiento del Plan\_2

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Mes	Días	Neces.	Plantilla total ±		Produc.	Stock	Retras.	unid.en hora-ex	unidad subcon.
inicial			30			500			
ENE	22	840	36 (+) 6		935	595		143	
FEB	18	1.080	36		765	280		117	
MAR	22	1.320	36		935		105	143	
ABR	21	1.080	36		893		292	137	
MAY	22	780	36		935		137	143	
JUN	21	720	36		893	36		137	
JUL	21	660	36		893	269		137	
AGO	13	480	28 (-) 8		320	109			
SEP	20	480	28		493	122			
OCT	23	360	28		567	329			
NOV	21	360	28		518	487			
DIC	20	380	28		493	500			
Σ	244	8.640		14		2.727	534	957	
cost. unit. (KPTA)				250		1	2,3	1,3	1,65
coste total				3.500		2.727	1.228,2	1.244,1	
8.669,300 KPTA									

Fig. 3.1.2.16 Comportamiento del Plan\_3

Es decir:

	<u>Coste total</u>
Plan N° 1	15.167.800 PTA
Plan N° 2	7.835.650 PTA
Plan N° 3	8.669.300 PTA

El plan N° 2 es el mejor de los tres propuestos. Evidentemente se pueden proponer otros, con criterios de selección *intuitivos*, mejores que el plan N° 2.

### 3.1.2.4 Utilización de una hoja electrónica de cálculo

En este último ejemplo no es aplicable el procedimiento tabular de Bowman a causa de la discontinuidad que introduce la posibilidad de variación de plantilla. Más adelante veremos cómo modelizar dicha situación mediante esquemas lineales, pero uno de los instrumentos prácticos utilizables tanto en este caso como en el anterior (y en otros notablemente más complejos) es la hoja electrónica de cálculo soportada mediante un software de uso general (Multiplan, Lotus\_123, Quattro, etc. para citar algunas que hemos utilizado) o bien específico. En la *figura 3.1.2.17* hemos indicado la estructura de la hoja electrónica de cálculo correspondiente a este ejemplo.

Las columnas están designadas por letras, las filas por números y las casillas por la letra de la columna seguida del número de la fila. La fila 1 está destinada a los nombres de los conceptos de cada columna, y la 2 a valores iniciales; de la 3 a la 14 situaremos los datos correspondientes a cada mes, en la 15 las totalizaciones o sumas, y de la 16 a la 20 (columna E) los costes por conceptos; su suma o coste total se encuentra en la E22.

Consideremos la zona de los datos mensuales (filas 3 a 14):

- en la columna A tenemos el nombre de los meses,
- en la B los días de cada mes,
- en la C la demanda de cada mes,
- en la D la plantilla existente cada mes,
- en la E la variación de plantilla (en valor absoluto),
- en la F la producción realizada cada mes,
- en la G el stock al final de cada mes,
- en la H los retrasos al final de cada mes,
- en la I las unidades producidas en horario normal cada mes,

HOJA ELECTRÓNICA DE CÁLCULO												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	mes	días	dem.	plan	var.	prod.	stock	ret.	p.n.	p.e.	p.s.	rest.
2				30			500	0				
3	ENE	22	840									
4	FEB	18	1080									
5	MAR	22	1320									
6	ABR	21	1080									
14	DIC	20	380									
15	Σ	244	8640									
16	coste	var.	plan	=								
17	coste	sobr.	stock	=								
18	coste	sub.	stock	=								
19	coste	prod.	extr.	=								
20	coste	prod.	subc.	=								
21					-----							
22	coste	total		=								

E3	=	@ABS(D2 - D3)	copy to (E4..E14)
G3	=	@MAX(0 , G2 - H2 + F3 - C3)	copy to (G4..G14)
H3	=	@MAX(0 , H2 - G2 + C3 - F3)	copy to (H4..H14)
I3	=	@MIN(F3 , B3*@MIN(36 , D3))	copy to (I4..I14)
J3	=	@MIN(F3 - I3 , B3*@MIN(7 , .25*D3))	copy to (J4..J14)
K3	=	@MIN(F3 - I3 - J3 , B3*15)	copy to (K4..K14)
L3	=	F3 - I3 - J3 - K3	copy to (L4..L14)
E15	=	@SUM(E3..E14)	E16 = 250*E15
G15	=	@SUM(G3..G14)	E17 = 1.0*G15
H15	=	@SUM(H3..H14)	E18 = 2.3*H15
J15	=	@SUM(J3..J14)	E19 = 1.30*J15
K15	=	@SUM(K3..K15)	E20 = 1.65*K15
E22	=	@SUM(E16..E20)	

Fig. 3.1.2.17 Esquema de la hoja de cálculo correspondiente al segundo ejemplo

- en J las unidades producidas en horas extra cada mes,
- en K las unidades subcontractadas cada mes,
- en L el resto de unidades hasta llegar a la producción establecida (deben ser 0 en los planes factibles).

Los datos de estas columnas pueden clasificarse en tres tipos:

tipo 1: datos del problema, columnas A, B, C (más las casillas D2, plantilla existente el mes 0; G2, stock inicial; H2, retrasos iniciales),

tipo 2: variables de acción, que el operador puede modificar a su gusto, columnas D y F,

tipo 3: resultados, que se obtienen por cálculo, columnas E, G, H, I, J, K, L (además de las casillas con las sumas E15, G15, H15, J15, K15 y las correspondientes a los costes E16, E17, E18, E19, E20 y E22)

Las fórmulas correspondientes a las casillas del tipo 3 aparecen en la tabla. El procedimiento a seguir para construir un plan de producción factible y eficiente consiste en ajustar los valores de las columnas D y F, procurando que en la columna L todos los valores sean nulos y que el valor de la casilla E22 sea lo más pequeño posible. Accesoriamente, otro condicionante que progresivamente aprenderemos a considerar es el centrado en saturar las horas normales de la plantilla con la producción. Fácilmente llegaremos a un plan tal como el plan\_4 resumido en la *figura 3.1.2.18*.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Mes	Días	Neces.	Plantilla total ±		Produc.	Stock	Retras.	unid.en hora-ex	unidad subcon.
inicial			30			500			
ENE	22	840	30		1.013	673		154	199
FEB	18	1.080	30		828	421		126	162
MAR	22	1.320	30		1.013	114		154	199
ABR	21	1.080	30		966			147	189
MAY	22	780	30		780			120	
JUN	21	720	30		720			90	
JUL	21	660	30		720	60		90	
AGO	13	480	30		446	26		56	
SEP	20	480	26	(-) 4	500	46			
OCT	23	360	26		588	274			
NOV	21	360	26		546	460			
DIC	20	380	26		520	500			
Σ	244	8.640		4		2.574		937	749
cost. unit. (KPTA)				250		1	2,3	1,3	1,65
coste total 6.027,950 KPTA				1.000		2.574	0,0	1.218,1	1.235,85

Fig. 3.1.2.18 Comportamiento del Plan\_4

Un punto que puede preocuparnos es el hecho de que si en la *figura 3.1.2.18* no procedemos en setiembre a la reducción de las 4 unidades de personal el resultado económico será superior, ya que eliminaremos las 1.000 KPTA del coste de variación de plantilla; de ahí nuestra insistencia en mantener dicha plantilla coherente con la producción realizada en horas normales. Una visión más general consistiría en adoptar una de las dos vías siguientes, la más adaptada a la situación real que queremos representar:

- penalizar las horas normales no utilizadas productivamente, con lo que se tendría un elemento para poder comprobar el interés de aumentar o disminuir la plantilla,
- considerar un salario mensual (o diario) fijo de la plantilla, lo que constituye una medida análoga a la anterior (idéntica si el salario se refiere a días laborables).

Adoptando la visión de salario mensual, la alteración de nuestra hoja electrónica de cálculo sería:

$$D15 = @SUM(D3..D14)$$

la adición de las filas 23 con el título de *nómina* y 24 con el de *cost.global*:

$$E23 = s * D15 \quad E24 = E22 + E23$$

donde *s* es el salario considerado. Por ejemplo, tomando *s* igual a 150.000 PTA tenemos que la solución anterior tiene un coste global de:

coste de explotación .....	6.027,95
nómina .....	51.600
coste global .....	57.627,95

aunque se pueden obtener soluciones mejores, por ejemplo la de la *figura 3.1.2.19*.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Mes	Días	Neces.	Plantilla total ±		Produc.	Stock	Retras.	unid.en hora-ex	unidad subcon.
inicial			30			500			
ENE	22	840	26	(-) 4	1.013	673		143	298
FEB	18	1.080	26		828	421		117	243
MAR	22	1.320	26		1.013	114		143	298
ABR	21	1.080	26		966			136,5	283,5
MAY	22	780	24	(-) 2	780			132	120
JUN	21	720	24		720			126	90
JUL	21	660	24		660			126	30
AGO	13	480	24		480			78	90
SEP	20	480	24		480				
OCT	23	360	24		552	192			
NOV	21	360	24		548	380		44	
DIC	20	380	24		600	500		120	
Σ	244	8.640		6		2.280		1.165,5	1.452,5
cost. unit. (KPTA)				250		1	2,3	1,3	1,65
coste total				1.500		2.280	0,0	1.515,15	2.396,63
7.691,775 KPTA + 44.400,000				=		52.091,775		0	

*Fig. 3.1.2.19 Comportamiento del Plan\_5*