



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Estado del arte sobre planificación agregada de la producción

Orlando Dante Boiteux; Albert Corominas; Amaia Lusa

EOLI: Enginyeria d'Organització i Logística Industrial

*IOC-DT-P-2007-4
Febrer 2007*

**Institut d'Organització i Control
de Sistemes Industrials**



Estado del arte sobre planificación agregada de la producción

Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales
Universidad Politécnica de Cataluña

Doctorando: Orlando Dante Boiteux

Directores: Dr. Albert Corominas Subias y Dra. Amaia Lusa García

Barcelona, marzo de 2007

Índice

1. Introducción	4
2. Planificación agregada en la jerarquía de la planificación	6
3. Características principales de la planificación agregada	7
3.1. Características temporales: Horizonte temporal, periodos, plazo de rigidez y plazo de revisión.	7
3.2. Criterios de evaluación	8
3.2.1. Criterios económicos	8
3.2.2. Otros criterios	9
3.3. Variables de decisión	10
3.4. Restricciones	10
4. Métodos para la planificación agregada propuestos en la literatura	11
4.1. Métodos de comparación de alternativas	11
4.1.1. Métodos gráficos de planificación agregada	11
4.1.2. Proceso de planificación agregada mediante una hoja de cálculo	12
4.2. Métodos con reglas de decisión	13
4.2.1. Regla de decisión lineal (LDR) (1955)	13
4.2.2. Modelo de los coeficientes de la dirección (1963)	13
4.2.3. LDR y la capacidad de la planta (1967)	14
4.2.4. Método de la regla de decisión por búsqueda (1968)	14
4.2.5. LDR con múltiples productos y ciclos largos de producción (1970)	15
4.3. Modelos de programación lineal	15
4.3.1. Método del transporte de Bowman (1956)	15
4.3.2. La LDR y el modelo de programación lineal de Hanssmann-Hess (1960)	16
4.3.3. Planificación agregada mediante programación lineal	16
5. Reseña de la planificación agregada en los cursos de grado	18
6. Referencias de planificación agregada en <i>Handbooks</i>	23
7. Aportaciones recientes en revistas especializadas	23
8. Análisis del estado del arte	30
9. Conclusiones	32

1. Introducción

La planificación de la producción es un proceso continuo cuyo objeto es determinar anticipadamente decisiones que permitan optimizar el uso de los recursos productivos.

Urwich y Brech (1984) introducen la primera referencia sobre la planificación de la producción y afirma que forma parte del esquema de Rathenau W. y no de Taylor o Fayol. Rathenau en 1918, en su libro *The New Economy*, según Urwich y Brech (1984), indica que toda aquella persona que esté familiarizada con la industria apreciará la enorme ventaja que se obtiene de un análisis de las necesidades, si es posible, para todo el año. Indica que cuando uno conoce, a intervalos regulares de tiempo, la cantidad de producción que será demandada, es posible desarrollar programas para la manufactura y distribuir el trabajo, con el resultado de que la compañía o fábrica alcance un pleno rendimiento, la producción se abarate enormemente, que no sea necesario mantener grandes stocks en tiempos excesivos, que el capital y el interés se economicen, y que, en general, aumente la eficacia. Rathenau afirma que la industria puede estimar la magnitud de la demanda.

Sin una planificación no es posible gestionar de manera correcta el sistema productivo. La planificación debe poseer pronósticos sobre la demanda, es decir, debemos conocer bien las circunstancias que se producirán (y cuándo) para poder anticiparse a ellas. Esto significa que se debe disponer fundamentalmente de información sobre la demanda, las capacidades y la disponibilidad de recursos, y los costes. Frente al problema de la planificación de producción, Alford (1945) propone que la compañía debe invertir mucho esfuerzo en pronosticar la demanda y sugiere trabajar mediante un análisis estadístico teniendo en cuentas la propia experiencia de la empresa en cuanto a las condiciones generales mercantiles. Manifiesta que una vez formulado un plan de producción en función de la demanda pronosticada (plan agregado), se debe traducir en cantidad de producción por periodos dentro de un horizonte de tiempo, plazos y fechas de entregas, cantidad de recursos necesarios y fuerza laboral.

La planificación es un proceso complejo, en el que hay que tener en cuenta muchos factores y considerar ciertos objetivos. Precisamente por este motivo no es posible tenerlos en cuenta a la vez y, por lo tanto, se debe establecer una metodología racional si se desean obtener resultados útiles. Por eso, se consideran diferentes niveles de planificación relacionados entre sí, con distintos niveles de detalle, y plazos de tiempo para llevarlos a cabo. Estos diferentes niveles de planificación se explican en el apartado 2.

A continuación se presenta una definición de planificación agregada:

Planificación agregada es un método para determinar la cantidad de producción y su desarrollo en el tiempo a medio plazo (Heizer y Render, 2001).

La planificación agregada se refiere a la determinación de la fuerza laboral, a la cantidad de producción y niveles de inventario en orden a satisfacer la demanda para un horizonte temporal de planificación específico a medio plazo. La planificación agregada puede desempeñar un papel dominante en la gestión de la empresa, debido a que planifica los recursos de la misma e integra todos los aspectos de la organización, ligando las operaciones de producción, la contabilidad, el área financiera, con la gestión de la tesorería, las políticas de la gerencia de recursos humanos, a cargo de los niveles de fuerza laboral, empleo y despidos, el área comercial, con la responsabilidad de introducir el producto al mercado empleando diferentes estrategias, como por ejemplo: políticas de precios, promociones, discriminación de precios, entre otras.

El término “agregada” hace referencia a que la planificación de la producción a medio plazo no desglosa la cantidad de producción por detalles de productos sino que los considera en varias familias de productos, sin importar sus diferentes variantes de diseño o modelo (ejemplo; color final de cada producto, si el coche debe o no llevar aire acondicionado, etc.). De igual manera son considerados los recursos para la producción; éstos se agrupan en familias de recursos (por ejemplo; materia prima, las instalaciones, procesos productivos, la tecnología, entre otros). Con respecto al tiempo de planificación, no se detalla el trabajo día a día sino que la producción se planifica en periodos de tiempo (meses o quincenas) que conforman un horizonte temporal de planificación, que puede ser de 6 a 18 meses. La producción, los recursos y tiempos agregados son posteriormente desagregados a un nivel detallado, en cantidades de productos según sus características particulares, en los recursos necesarios para cada producto, y en periodos de tiempo reducidos y controlados. Con esta desagregación se genera una planificación detallada desde el plan agregado.

El objetivo de este documento es ofrecer una visión de la planificación agregada y métodos, desde sus inicios hasta la actualidad, destacando las referencias y las propuestas de cada autor que trata sobre este tema en libros de texto y publicaciones en revistas de prestigio internacional. En el apartado 2 se muestra la planificación agregada situada en la jerarquía de planificación; en el apartado 3 se introducen las características de la planificación agregada; en el apartado 4 se indican los métodos y modelos para determinar la planificación agregada publicados en libros de textos y manuales; en el apartado 5 se muestran tablas resúmenes con autores y trabajos que hacen reseña de la planificación agregada en los cursos de grado; en el apartado 6 se dan las aportaciones recientes de interés para el desarrollo del estado del arte, en revistas especializadas; en el apartado 7 se realiza un análisis crítico sobre el estado del arte de la planificación agregada; y en el apartado 8 se da una conclusión de este trabajo de investigación, destacando los aportes de interés.

2. Planificación agregada en la jerarquía de la planificación

Planificar la producción en función de la demanda es complejo de abordar en un solo nivel, debido a la gran cantidad de detalles que se deben contemplar para alcanzar los objetivos deseados. Debido a ello, el proceso de planificación y control de la producción debe seguir un enfoque jerárquico, en el que se logre una integración vertical entre los objetivos estratégicos, tácticos y operativos del sistema productivo y además se establezca su relación horizontal con el resto de áreas funcionales de la empresa (Companys y Corominas, 1989; Miranda et al., 2005).

La jerarquía de los planes de la función productiva, como se aprecia en la figura 1, se inicia con la *planificación estratégica o a largo plazo*, con un horizonte temporal superior al año. En este nivel se determina la capacidad instalada (instalaciones, proveedores, procesos productivos, etc.), que se convierte en restricción para los planes de orden inferior. El siguiente nivel lo constituye la *planificación agregada o a medio plazo*, que con un horizonte temporal de entre 6 y 18 meses, determina la fuerza de trabajo necesaria, la tasa de producción, el nivel de stock, contratos de suministros a medio plazo, etc. (Miranda et al., 2005).

En corto plazo se desarrolla el *plan maestro de producción*, que partiendo de las restricciones establecidas en el plan agregado, determina la cantidad a fabricar de cada artículo, así como el momento en que se debe iniciar dicha producción. La jerarquía de planes finaliza con la *programación y control de la producción a corto plazo*, en la que se procede a asignar la producción a cada centro de trabajo, se consideran los tiempos de servicio de los procesos, se controla el correcto cumplimiento de los plazos de entrega, etc. (Hax, 1978; Companys y Corominas, 1989; Chase et al., 2000; Gallien y Jennings, 2004; Miranda et al., 2005).

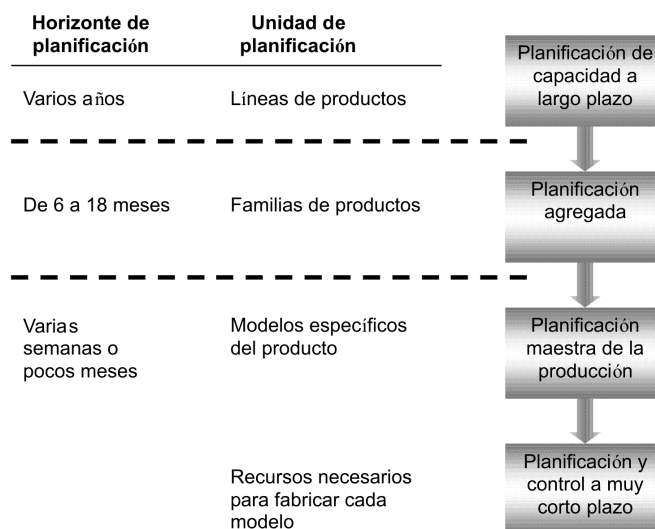


Figura 1: *Planificación jerárquica de la producción*, (Miranda et al., 2005)

3. Características principales de la planificación agregada

En el momento de desarrollar un plan agregado de producción es necesario tener en cuenta determinadas características referidas en especial al tiempo que se desea planificar, a los criterios de evaluación, las variables necesarias y las restricciones que deben contemplarse.

3.1. Características temporales: Horizonte temporal, periodos, plazo de rigidez y plazo de revisión.

El *horizonte temporal* es el periodo de tiempo que se tiene en cuenta en el plan; para la planificación a nivel agregado es normalmente entre 6 y 18 meses.

Los *periodos* o *segmentos temporales* son segmentos de tiempo que componen al horizonte temporal para determinar el nivel específico de fuerza de trabajo, la tasa de producción, los niveles de stocks aceptables para ese periodo de tiempo, entre otras decisiones. Estos periodos normalmente se establecen desde un par de semanas a un mes.

Los *plazos de rigidez* son periodos de tiempo en los que se definen las decisiones de planificación, y una vez tomadas no se pueden modificar; generalmente van de 2 a 4 meses.

El tiempo que transcurre entre dos versiones sucesivas del plan se denomina *frecuencia* o *ritmo de revisión*, depende de aspectos tecnológicos y organizativos del

sistema productivo: las decisiones se caracterizan por una determinada inercia que impide cambiarlas de manera instantánea; además, es frecuente que la frecuencia de revisión sea diferente para un cierto tipo de aspectos que para otro, e incluso puede resultar variable con el tiempo.

Para determinar el horizonte temporal, los periodos de tiempo, la frecuencia o ritmo de revisión y los plazos de rigidez se deben considerar factores tales como las características de los mercados, de los proveedores de materias primas y de la naturaleza de las operaciones y controles internos. Si el mercado en el que se debe competir es estacional por cualquier razón, este factor puede ser dominante en la selección de un intervalo temporal para la planificación, según Buffa y Taubert (1972); Hax (1978); y Buffa y Sarin (1992).

3.2. Criterios de evaluación

En el momento de elaborar la planificación agregada se deben tener en cuenta una serie de criterios, los cuales se observan a continuación.

3.2.1. Criterios económicos

Maximización del beneficio El beneficio es la diferencia entre el ingreso (ventas) y los costes totales. Maximizar el beneficio cuando el ingreso es constante (se cubre toda la demanda y los precios de venta son constantes), es equivalente a minimizar los costes. Entre los costes se suelen considerar todos o algunos de los siguientes:

- *Mano de obra*
 - Conforme aumenta el nivel de producción, es necesario un mayor volumen de mano de obra directa, por lo tanto mayores costes en salarios.
 - El aumento de producción requiere turnos extras, por lo tanto una plantilla de personal mayor.
- *Contratación*
 - Entrevistas y selección: consumo de tiempo en las entrevistas, gastos de oficina, publicidad, etc.
 - Investigación, referencias y comprobaciones.
 - Exámenes de aptitud física.
 - Preparación de plantillas de admisión.
 - Adiestramiento del nuevo personal.
- *Despidos*

- Compensación por cesantía.
 - Relaciones con la comunidad.
- *Horas extras*
 - *Subcontratación*
 - *Stock*: no todos los costes por stock implican pagos, pero sí se ven reflejados en costes de mantenimiento del mismo, dependiendo de la naturaleza del producto (por ejemplo; alimentos perecederos), de utilización de espacio físico para su contención (uso de espacios propios, pudiéndolo emplear para actividades de mayor rendimiento, o alquiler).
 - Los costes del dinero invertido en stock deben estimarse tomando por base el rendimiento que se obtendría si el capital estuviese invertido en alguna otra forma.
 - Las existencias están sujetas a costes por daños, deterioro de artículos y caída en desuso de los mismos.
 - Seguridad y almacenamiento.
 - Alquiler de instalaciones para el almacenamiento.
 - *Ruptura de stock*: esto ocurre cuando el stock y la producción no son suficientes para cumplir con los pedidos. En estos casos puede recurrirse a perder demanda o a diferir la demanda o parte de ella, esto es dependiendo de los tiempos que los clientes acepten esperar.
 - *Costes de oportunidad*: son costes que no generan pagos pero que sí existen en realidad cuando se toma una decisión dejando de lado otra que podría haber proporcionado una mayor rentabilidad (por ejemplo el dinero invertido en stock en un determinado periodo, tal vez podría haber entregado una mayor rentabilidad invirtiéndolo en renta fija).
 - *Costes financieros*: se producen cuando se debe recurrir a una financiación externa, como por ejemplo: créditos bancarios para pagar a proveedores, salarios, horas extras de producción, entre otras.

3.2.2. Otros criterios

Aparte de los criterios puramente económicos se pueden mencionar algunos otros que, de forma indirecta, también tienen influencia en la economía de la empresa:

- *Minimizar las demoras en las entregas de los pedidos*

- *Minimizar las variaciones en el nivel de fuerza de trabajo*
- *Minimizar las variaciones en el nivel de producción*

3.3. Variables de decisión

Entre las principales variables de decisión para la planificación agregada se pueden mencionar las siguientes:

- *Stock*
- *Nivel de fuerza laboral*
- *Nivel de producción*
- *Subcontratación*
- *Horas de trabajo*

3.4. Restricciones

Todo sistema en el cual es necesario asignar recursos para llevar a cabo una serie de tareas, está sujeto a restricciones de diversos tipos; según Eilon (1982):

- **Especificaciones del producto**, que se refieren a sus características físicas, químicas y de calidad.
- **Restricciones técnicas**, impuestas por la capacidad de las máquinas y las personas para realizar ciertas tareas.
- **Requerimientos del mercado**, respecto a las fechas de entrega y a la necesidad de evitar la ruptura de stock.
- **Aspectos de operación**, relacionados con la capacidad y disponibilidad de instalaciones, con los problemas de flujo y almacenamiento debido a la distribución de las instalaciones y al medio físico, con las limitaciones impuestas a las horas extras y/o a la subcontratación, con la rapidez con que el sistema se puede adaptar a los cambios del ritmo de producción y de la mezcla de productos, y con la flexibilidad en el uso de la mano de obra.

Al tener en cuenta las restricciones en el momento de llevar a cabo la planificación se debe conocer el entorno de producción de la compañía. El entorno de producción puede contemplar múltiples productos que compiten por los mismos recursos, como por ejemplo máquinas, mano de obra, dinero, etc.; múltiples procedimientos, que son variantes posibles para la obtención de determinados productos, como son rutas

alternativas en la misma planta, plantas de fabricación distintas, etc.; y múltiples etapas o fases de fabricación, es decir, productos en cuya elaboración intervienen distintos centros de producción.

4. Métodos para la planificación agregada propuestos en la literatura

Para la resolución del problema de la planificación agregada de la producción, la mayoría de los métodos se pueden clasificar en tres grupos: en primer lugar métodos de comparación de alternativas; en segundo lugar, métodos que utilizan reglas de decisión; y por último métodos basados en modelos de programación matemática.

4.1. Métodos de comparación de alternativas

Los métodos de comparación de alternativas consisten en generar varios planes alternativos y seleccionar uno en función de ciertos criterios. Para ello se puede hacer uso de herramientas que faciliten la evaluación de los planes, como métodos gráficos, hojas de cálculo, entre otros. Debido a los resultados obtenidos a través de estos métodos y la sencillez de aplicación, son ampliamente utilizados por la dirección de empresas. Son de amplia utilidad para evaluar estrategias, no para crearlas. Para crear estrategias es necesario un método sistemático que considere todos los costes y ofrezca una solución efectiva, como son los métodos matemáticos para la planificación.

4.1.1. Métodos gráficos de planificación agregada

Alford (1945) propone un método de planificación de la producción agregada a lo largo de un periodo de tiempo, mediante una gráfica en la que relaciona cantidad de producción con tiempo. En ésta presenta una curva representando a la producción y al stock acumulado a lo largo del tiempo, en contraste con una curva que representa las ventas acumuladas, una recta representando el índice de producción (lo propone constante, de forma de no variar la plantilla del personal), y coloca las cantidades de productos vendidos por cada periodo de tiempo que conforma al horizonte temporal. Propone mantener un determinado nivel de stock de seguridad, pero para el caso en que la demanda supere la cantidad de producción y stock, se deberá recurrir a tiempo de trabajo extra, y si es de forma contraria sugiere la pérdida de ventas.

Este enfoque se puede aplicar a la generación de alternativas. En primer lugar se traza la curva de los requerimientos acumulados de producción, como se observa en la figura 2. Luego se trazan diferentes alternativas, por ejemplo: la alternativa 1, que se adapta muy bien a la demanda, pero este proceso requiere de variación de la cantidad de producción dos veces a lo largo del horizonte temporal de planificación;

la alternativa 2, sólo cambia una vez la cantidad de producción, nunca se produce ruptura de stock, pero en la segunda mitad del horizonte temporal genera un alto nivel de stock; y la tercera alternativa permanece con un índice de producción (producción/unidad de tiempo) fijo en todo el horizonte temporal, pero en la primera mitad se produce ruptura de stock, y en la segunda mitad genera altos niveles de stock.

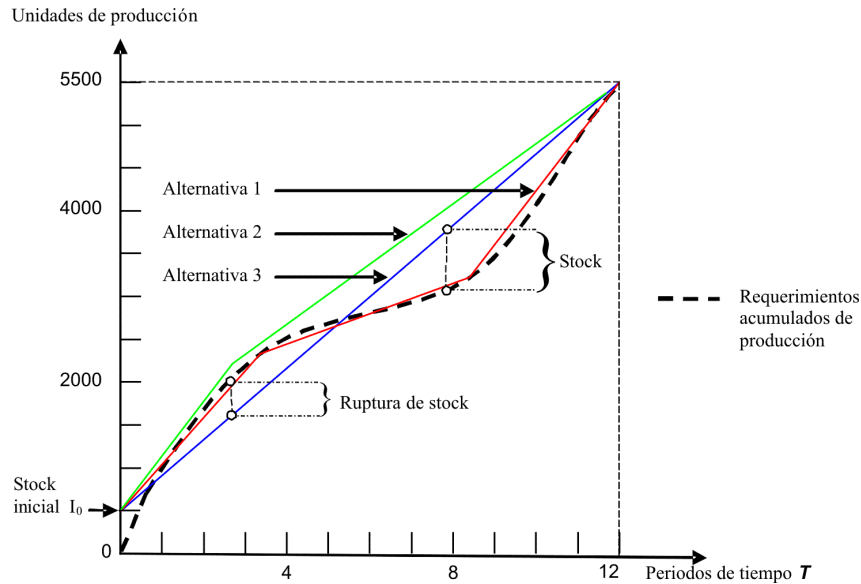


Figura 2: *Alternativas gráficas para la planificación agregada*

4.1.2. Proceso de planificación agregada mediante una hoja de cálculo

Es una herramienta para desarrollar un plan, comparar el plan obtenido con otros planes y, por último modificarlo según se requiera hasta estar satisfechos con los resultados. La hoja de cálculo muestra los valores de entrada, que reflejan los requisitos de demanda y las alternativas propuestas para cada periodo. Otra parte muestra los valores derivados, que deben provenir de los valores de entrada. En otra sección de la hoja de cálculo se muestran los costes calculados del plan. La hoja de cálculo facilita el análisis de los planes y ofrece una nueva serie de posibilidades para desarrollar planes agregados.

Con este proceso se logra encontrar soluciones, por medio de comparaciones del coste total luego de una serie de revisiones y correcciones de los datos propuestos por el planificador, pero no dan garantía de que la solución determinada sea óptima.

4.2. Métodos con reglas de decisión

Son métodos que proporcionan un plan agregado (nivel de producción, nivel de fuerza de trabajo, horas extras, stock, etc.) a partir de los datos (pronósticos de demanda, costes, stock actuales, etc.), mediante un conjunto de expresiones matemáticas que pueden ser lineales o no.

4.2.1. Regla de decisión lineal (LDR) (1955)

La regla de decisión lineal (LDR), desarrollada por Holt, Modigliani, Muth y Simon (1955), es una importante aportación al desarrollo de modelos matemáticos para la planificación agregada. Singhal y Singhal (2006) afirman que la planificación agregada en la actualidad es de utilidad para la planificación de ventas y operaciones, ya que cumple una función de pivote para la integración de las funciones de operación de producción, de comercialización y financieras. El método se basa en el desarrollo de una función cuadrática de los costes asociados con la nómina regular, cambios en la cantidad de producción, stock, horas extras, nuevas contrataciones y despidos, de la cual se obtienen, derivando e igualando a cero para minimizar el coste total, dos reglas de decisión lineal para calcular la tasa de producción y el nivel de la fuerza laboral del siguiente periodo, usando pronósticos agregados de ventas.

Estas reglas de decisión lineal son ecuaciones que están compuestas de una serie de términos con los pronósticos de demanda para un número de periodos futuros, acompañado cada uno por coeficientes constantes, y cada regla tiene en cuenta los niveles actuales de fuerza de trabajo y de stock.

Si bien el método produce resultados óptimos, éstos dependen de que la función de costes sea cuadrática, lo cual con frecuencia no es cierto. Otra limitación del método es que las variables de decisión no están restringidas, y esto es poco representativo de la realidad.

4.2.2. Modelo de los coeficientes de la dirección (1963)

Bowman (1963), que había recibido muchas críticas a su modelo basado en el algoritmo del transporte (que se explica en el apartado 3.3.1) estudió un enfoque enteramente distinto que consiste en modelizar directamente el proceso de decisión de las personas que toman decisiones de planificación según el procedimiento que sigue. Se debe notar que se pasa de un enfoque prescriptivo, en el que se buscan los valores óptimos de las variables de decisión a base de tratar matemáticamente un modelo en el que aparecen una función objetivo y unas restricciones con dichas variables, a uno descriptivo en el que se busca la forma en que los expertos agregan, informaciones disponibles para transformarlas en decisiones.

Inicialmente se debe definir cuáles son las variables de acción y las informaciones que se utilizan para establecer su valor, considerando las primeras como variables dependientes de las segundas, variables independientes. Mediante entrevistas con los expertos se procura estructurar un modelo que represente la relación entre dichas variables. Dicho modelo contendrá unos coeficientes cuyos valores representarán los pesos que los decisores asignan a los distintos elementos de información. Para estimar los valores de dichos coeficientes se pueden utilizar técnicas tales como la regresión múltiple a partir de datos históricos, probando estadísticamente la significación de la influencia de los distintos elementos de información en las decisiones tomadas, lo cual permitirá simplificar el modelo eliminando los elementos de poca influencia. Este modelo podrá usarse en el futuro para prever lo que habría hecho el decisor enfrentándose a una situación descrita por determinados elementos de información.

El interés de disponer de un modelo que describe el comportamiento del decisor estriba en la idea de que éste conoce su oficio y por consiguiente toma decisiones acertadas en promedio pero que, impulsado por las urgencias y presiones, altera a veces poco hábilmente el peso que da a los datos de un periodo a otro. La utilización de métodos estadísticos permite paliar dicha variabilidad de criterio y estimar los valores reales de los coeficientes de ponderación, con lo cual se puede ayudar al decisor a o incluso en algunos casos sustituirle.

4.2.3. LDR y la capacidad de la planta (1967)

Buffa y Taubert (1972) hacen referencia a que Sypkens (1967) elaboró una extensión del modelo LDR, donde se identifica la capacidad de la planta como una variable de decisión además de la fuerza de trabajo y el índice de producción. Aunque se reconoce que la capacidad a corto plazo del sistema se fija en el modelo convencional de la LDR mediante la determinación de la fuerza de trabajo, hay algunos casos en que también se pueden hacer con ventaja algunos ajustes fundamentales de la capacidad física.

4.2.4. Método de la regla de decisión por búsqueda (1968)

Taubert (1968), desarrolló la metodología básica de la regla de decisión por búsqueda (SDR), utilizando como funciones de prueba los datos de una fábrica de pinturas con las soluciones de la LDR.

El enfoque de Taubert propone la construcción del modelo de costes o beneficios lo más real posible, expresándolo en la forma de una subrutina de computadora que tenga la capacidad de calcular el coste asociado con cualquier conjunto dado de valores de las variables de decisión. Matemáticamente, la subrutina define una superficie de respuesta de coste con una dimensionalidad determinada por el número

de variables de decisión y el número de periodos de tiempo incluidos en el horizonte temporal de la planificación agregada. En resumen, el modelo de costes forma un modelo de sistemas de decisión de múltiples etapas, y en cada etapa representa la estructura de costes de la operación en el momento en que se toman las decisiones, sea cada mes, cada trimestre, etc. Luego se utiliza una rutina de análisis por computadora para examinar sistemáticamente la superficie de respuesta del modelo de costes, en búsqueda del punto (combinación de decisiones) que represente el menor coste total en todo el horizonte temporal de planificación. No garantiza una solución óptima, pero el método encuentra soluciones que en su momento no se podían mejorar fácilmente.

4.2.5. LDR con múltiples productos y ciclos largos de producción (1970)

Chang y Jones (1970), generalizaron el método LDR para aplicarlo a la planificación tanto agregada como detallada, en una situación de múltiples productos y ampliaron el marco conceptual para manejar situaciones en que el inicio y fin de la producción no puede verificarse en el mismo periodo. El inicio y final de la producción en un periodo es factible para procesos a granel o de grandes cantidades (por ejemplo, de pintura, bebidas, entre otros) y para productos pequeños, pero no para productos tales como aviones, barcos, turbinas de vapor, etc., que implican ciclos prolongados de fabricación, ensamble y prueba. El enfoque de Chang y Jones supone el empleo de una matriz de distribución de mano de obra D_{it} , la cual especifica la fracción del esfuerzo total de la fuerza de trabajo que requiere el producto i en un mes t del ciclo de producción. Conceptualmente el método supone que el producto i está listo para su venta, en un periodo, k , por ejemplo, y luego calcula los requerimientos de mano de obra en los periodos, k , $k - 1$, $k - 2$, etc., usando la matriz D_{it} .

4.3. Modelos de programación lineal

Uno de los métodos más importantes para resolver el problema de la planificación agregada es la programación lineal. A continuación se explican los modelos y/o métodos más referenciados.

4.3.1. Método del transporte de Bowman (1956)

Bowman (1956), propone un modelo de programación lineal para la planificación de la producción agregada, que es conocido como el *modelo del transporte de Bowman*. En el cual propone como *origen* los binomios formados por la alternativa de producción (producción en horas regulares, en horas extras y subcontratación) y el periodo en que se produce; y como *destino* los periodos a los que asignará la entrega de dichas producciones. Al trabajar con este modelo se considera el número máximo de unidades que se pueden producir durante un periodo determinado con

tiempo de trabajo regular, con horas extras, y unidades subcontractadas, el número de unidades del producto terminado que se entregarán durante el periodo determinado, los costes por almacenamiento unitario por periodo, costes de producción unitario en tiempo regular, costes de producción con horas extras, y los costes por subcontractar.

4.3.2. La LDR y el modelo de programación lineal de Hanssmann-Hess (1960)

Hanssmaan y Hess (1960) construyeron un modelo de programación lineal para la planificación agregada, que es equivalente al modelo de la LDR en su estructura general. En ambos modelos las decisiones se toman de acuerdo con la fuerza de trabajo y la tasa de producción; la función de criterio del coste incluye exactamente los mismos componentes: costes de la nómina regular, de contratación, liquidación, horas extras, stock y escasez. La diferencia básica se encuentra entonces en el hecho de que en el modelo de programación lineal de Hanssmann-Hess la función del coste es lineal, mientras que en el modelo LDR es cuadrática. Definieron curvas lineales (lineales a tramo) de coste con base en las curvas cuadráticas de coste empleadas en la aplicación de LDR en el mismo caso de estudio de una fábrica de pinturas propuesta por Holt et al. (1955), también los cambios de la cantidad de producción son lineales por tramo. Hanssmann y Hess no informaron sobre cómo aplicar extensamente su modelo en un marco industrial, pero Kolenda (1970) realizó un trabajo de comparación, sin obtener conclusiones relevantes, entre el modelo LDR y el modelo de programación lineal de Hanssmann y Hess, ambos implementados al caso de la fábrica de pinturas.

4.3.3. Planificación agregada mediante programación lineal

La programación lineal (PL), la programación lineal entera (PLE) y la programación lineal entera mixta (PLEM) constituyen herramientas muy poderosas para resolver los modelos de planificación agregada.

Las características relevantes de los problemas de planificación modelizados mediante PL, PLE y/o PLEM se presentan en el cuadro 1. En ésta tabla se indica que el horizonte temporal de planificación puede estar compuesto por un solo periodo, o por múltiples periodos de planificación para llevar a cabo el plan agregado. La organización puede producir un solo producto, o múltiples productos que compiten por los mismos recursos, esto se debe definir a la hora de diseñar el plan. Los recursos críticos pueden ser uno o múltiples, por ejemplo; máquinas, materia prima, mano de obra especializada, dinero, entre otros. Las etapas o fases de fabricación, es decir, productos en cuya elaboración intervienen distintos centros de fabricación o sólo uno. En unas organizaciones se puede admitir la ruptura de stock tomando otras alternativas ante esta situación, como es diferir demanda o retrasos en los pedidos, pero en

otros no se permite. A la hora de realizar un plan de producción se pueden encontrar situaciones en que la demanda es conocida, determinista, pero en otras existe incertidumbre sobre el futuro, no determinista. La plantilla de la fuerza laboral puede ser considerada fija, sin tener que recurrir al empleo y despido de personal, o variable. Las instalaciones en una organización pueden ser fijas, o variables dependiendo de la flexibilidad, del nivel de producción necesario y de los tipos de productos, como son: rutas alternativas en la misma planta; plantas de fabricación distintas; métodos distintos de producción, etc. El nivel de producción, dependiendo de las estrategias de planificación implementadas, puede ser constante o variable. En una compañía dependiendo de la naturaleza del producto que elabora, precedero o no, de la capacidad de la instalación y de los costes que producen, se puede mantener stock o no. La función objetivo del modelo puede contemplar un solo criterio, o múltiples criterios de planificación agregada.

Características de los modelos lineales de planificación	
Horizonte	Mono-periodo
	Multi-periodo
Producto	Mono-producto
	Multi-producto
Recursos críticos	Uno
	Multi-recursos
Etapas de fabricación	Mono-etapa
	Multi-etapa
Ruptura de stock	No se admite
	Retrasos/pérdidas
Demanda	Determinista
	No-determinista
Plantilla	Fija
	Variable
Instalaciones	Definidas
	Variables
Nivel de producción	Constante
	Variable
Procesos	Definidos
	Variables
Stocks	Se puede almacenar
	No se puede almacenar
Función objetivo	Mono-criterio
	Multi-criterio

Cuadro 1: *Características de los modelos lineales de planificación*

5. Reseña de la planificación agregada en los cursos de grado

En este apartado se presentan cuadros resumen (cuadro 2 y cuadro 3) sobre la literatura dedicada a la planificación agregada, desde el año 1955, citada en libros de texto, manuales y cursos de grado. Se indica si cada autor trata los diferentes temas considerados en la planificación agregada, cómo han evolucionado en el tiempo según trabajos del mismo autor, y la importancia dedicada a cada tema, por cada uno de los autores citados (cuadro 2) y a qué métodos o modelos de planificación agregada hacen referencia o simplemente mencionan en sus trabajos (cuadro 3). A continuación se presenta una simple descripción de cada tema a los que hacen referencia los autores en sus trabajos.

- **Naturaleza de la planificación agregada:** en ella los autores explican qué es la planificación agregada y a qué se refieren con el término “agregado”. La mayoría de los autores emplean un ejemplo de un caso real, con datos de producción y las características de los productos, para entender la agregación de productos individuales a familias de productos. Proponen el horizonte temporal de planificación e identifican las variables de entrada necesarias para desarrollar el plan agregado (pronósticos de demanda, capacidad de las instalaciones, los niveles totales de stock actuales, la plantilla disponible, materias primas, la tecnología, etc.), y describen las variables de salida (cantidades a producir en cada periodo de tiempo, los niveles de fuerza laboral necesaria, tiempos extras de trabajo, subcontrataciones, niveles de stock, etc.) que este plan entrega a los niveles de planificación detallada.
- **Jerarquía de la planificación:** los autores presentan la planificación agregada dentro de una estructura de relación jerárquica entre los distintos niveles de planificación que una organización tiene en cuenta a la hora de plantear sus objetivos desde largo plazo (años) hasta muy corto plazo (horas). Algunos autores proponen estructuras gráficas con bloques unidos por flechas indicando el flujo de información, órdenes y restricciones en el marco jerárquico de planificación. Se indican los periodos de tiempo con que cada sector de la compañía, a cargo de un nivel de planificación, dispone para cumplir con sus objetivos. Se observa como cada nivel de planificación de mayor plazo genera entradas hacia el nivel inmediato inferior, desde la planificación estratégica de años hasta definir las horas necesarias en una determinada máquina, con un operador específico, para elaborar cierta cantidad de productos por unidad de tiempo.
- **Proceso de planificación agregada:** algunos autores exponen un proceso de planificación agregada e indican etapas para este proceso. En este proceso desarrollan una serie de pasos en los que analizan las previsiones de la demanda

dentro de un horizonte temporal establecido, determinan la demanda agregada para cada familia de productos y calculan a partir de estos datos la necesidad de los recursos, para satisfacer el plan agregado, desarrollando planes y evaluando sus resultados.

- **Estrategias o alternativas de planificación agregada:** se proponen distintas estrategias para hacer frente al problema de la planificación agregada. Algunas apuntan a actuar sobre la demanda, tratando de nivelar picos de alta o baja demanda, elaborando acciones de marketing, modificando precios, promociones, etc.; otras estrategias apuntan a la capacidad de la organización, como son las estrategias puras denominadas de caza o persecución (tratan de adaptarse lo mejor posible a la demanda) y de nivelación (producción o fuerza de trabajo constante), y las estrategias mixtas (combinación de estrategias puras).
- **Criterios u objetivos en la planificación agregada:** en el momento de resolver el problema de la planificación agregada deben fijarse criterios u objetivos a medio plazo, sobre los que se conduce la toma de decisiones. Los autores en sus trabajos enumeran distintos criterios u objetivos a alcanzar con este plan agregado, entre otros mencionan los criterios económicos (minimización de costes), de servicio al cliente, mantener constante la plantilla laboral, etc.

En la búsqueda de asignaturas, dictadas en carreras de grado de universidades, que en sus programas involucren la planificación agregada de la producción, se ha encontrado una pequeña cantidad (diez universidades) debido a que vía Internet la mayoría de las universidades no disponen, en detalles, las materias y sus programas. Las referencias de la bibliografía que emplean en estas asignaturas se basan en autores mencionados en el cuadro 2. Ninguna de las asignaturas halladas informa de manera detallada cómo tratan el tema de planificación agregada de producción, pero observando la bibliografía a la que hacen referencia se puede obtener un perfil de la forma en que estudian este tema en las carreras de ingeniería industrial o licenciaturas en administración de empresas, en donde se forman los futuros profesionales del sector industrial. En los cursos de grado de universidades españolas son muy referenciados los trabajos de Buffa y Taubert (1972), Chase y Aquilano (1973, 1992 y 2000), Krajewski y Ritzman (2000 y 2005), Domínguez et al. (1995), Heizer y Render (1997 y 2001) y Miranda et al. (2005). Buscando en cursos del Massachusetts Institute of Technology, Graves (1999) y Gallien y Jennings (2004), se encontró acceso a algunos programas de asignaturas y algunas exposiciones sobre el tema, observando también algunos trabajos de consulta y bibliografía empleada, en la cual son mencionados los trabajos de Holt et al. (1955 y 1960), Hax (1978), Buffa y Taubert (1975), entre otros.

Autores	Temas	Naturaleza	Jerarquía	Procesos	Estrategias	Criterios
Holt C.C. et al. (1960)		X	X	X	X	X
Buffa E.S. (1968a)		X	X	X		X
Buffa E.S. (1968b)		X		X	X	X
Buffa E.S. y Taubert W. H. (1972)		X	X			X
Buffa E.S. y Sarin R.K. (1992)		X		X	X	X
Mize J.H. et al. (1971)		X	X		X	X
Chase R.B. y Aquilano N.J. (1973)				X	X	
Chase R.B. y Aquilano N.J. (1992)			X		X	X
Chase R.B. et al. (2000)		X	X		X	X
Davis M.M. et al. (2001)		X	X		X	X
Hax A.C. (1978)		X	X		X	X
Meal H.C. (1978)		X	X			X
Johnson L.A. y Montgomery D.C. (1974)		X				X
Eilon S. (1982)						X
Krajewski L.J. y Ritzman L.P. (1987)		X	X		X	X
Krajewski L.J. y Ritzman L.P. (2000)		X	X	X	X	X
Krajewski L.J. y Ritzman L.P. (2005)		X	X	X	X	X
Larrañeta J. et al. (1988)		X			X	X
Fogarty D.W. et al. (1989)		X	X			X
Fogarty D.W. et al. (1991)		X	X	X	X	X
Companys R. y Corominas A. (1989)		X	X	X	X	X
Blocher J.D. y Chand S. (1992)		X			X	X
Dominguez M. J. et al. (1995)		X	X	X	X	X
Heizer J. y Render B. (1997)		X	X	X	X	X
Heizer J. y Render B. (2001)		X	X	X	X	X
Algeo M.E. y Barkmeyer E.J. (2001)			X			
Miranda G. F. et al. (2005)		X	X	X	X	X

Cuadro 2: Autores y los temas tratados en planificación agregada de la producción.

Como conclusión de la tabla 2, se observa que la mayoría de los autores que en sus diferentes trabajos se refieren a la planificación agregada de la producción, mantienen un mismo perfil en cuanto a cómo tratan el tema, como lo hace Buffa (1968a y 1968b) y Buffa y Sarin (1992), Chase y Aquilano (1973) en su primera obra no tratan el tema en profundidad, pero después de muchos años Chase y Aquilano (1992 y 2000), y en un trabajo en conjunto con Davis, Davis et al (2001), exploran al máximo el tema dando ejemplos reales y manteniendo una misma estructura en cada obra, pero actualizando sus ejemplos. Hax (1978) trabaja en profundidad el tema y presenta el trabajo de Meal (1978), pero en años posteriores no actualiza este tema.

Krajewski y Ritzman (1987, 2000 y 2005) actualizan ejemplos y datos reales. Por su parte, Fogarty (1991), demuestra mayor importancia y dedicación en el tema de planificación agregada que en su bibliografía anterior, Fogarty (1989). Otros autores muy citados en la actualidad son Heizer y Render (1997 y 2001), quienes en estas dos obras presentan una estructura clara del tema, y proponen ejemplos de casos para analizar.

En el cuadro 3 se resumen los métodos de planificación agregada más importantes desde el año 1955 hasta la actualidad, y se relacionan con la bibliografía que hace referencia a cada uno de ellos.

Como es posible observar en el cuadro 3, se han presentado los autores y sus respectivos trabajos más referenciados en universidades y publicaciones de revistas, desde los inicios de los años 50. Como conclusión de esta revisión se observa que el método de planificación agregada más sugerido en los libros y manuales es el de programación lineal desde los años 80. Esto se debe al surgimiento de nuevas herramientas de programación que hacen posible una mayor aplicación de este método. En segundo lugar la técnica más citada y que ha sido base de otros métodos es de la regla de decisión lineal (LDR) con una notable importancia en la literatura en los años 90. Luego los métodos gráficos; de transporte; de simulación; el de coeficientes gerenciales; y la regla de decisión por búsqueda son bastante citados. Los demás métodos tienen sus aportes e importancia, pero no son muy tratados en la literatura referenciada.

Autores	Métodos	Método gráfico	Hoja de calculo	LDR	Extensiones de LDR	Método de transporte	Coeficientes gerenciales	SDR	Programación lineal
Holt C.C. et al. (1960)				X					
Buffa E.S. (1968a)				X			X		X
Buffa E.S. (1968b)									
Buffa E.S. y Taubert W. H. (1972)				X	X	X	X	X	X
Buffa E.S. y Sarin R.K. (1992)	X			X				X	X
Mize J.H. et al. (1971)	X	X							
Chase R.B. y Aquilano N.J. (1973)	X			X		X	X	X	X
Chase R.B. y Aquilano N.J. (1992)	X			X		X	X	X	X
Chase R.B. et al. (2000)	X			X		X	X		X
Davis M.M. et al. (2001)	X	X							
Hax A.C. (1978)				X	X			X	X
Meal H.C. (1978)									
Johnson L.A. y Montgomery D.C. (1974)							X		X
Eilon S. (1982)				X			X		X
Krajewski L.J. y Ritzman L.P. (1987)	X							X	X
Krajewski L.J. y Ritzman L.P. (2000)			X			X			X
Krajewski L.J. y Ritzman L.P. (2005)	X	X				X			X
Larrañeta J. et al. (1988)									X
Fogarty D.W. et al. (1989)				X					X
Fogarty D.W. et al. (1991)				X		X		X	X
Company's R. y Corominas A. (1989)	X	X		X		X	X	X	X
Blocher J.D. y Chand S. (1992)	X			X				X	X
Dominguez M. J. et al. (1995)	X			X		X	X		X
Heizer J. y Render B. (1997)	X			X		X	X	X	X
Heizer J. y Render B. (2001)	X			X		X	X	X	X
Algeo M.E. y Barkmeyer E.J. (2001)									
Miranda G. F. et al. (2005)				X					X

Cuadro 3: Los métodos de planificación agregada propuestos por cada autor en su trabajo.

Como conclusión sobre el contenido del cuadro 3, los autores presentan los métodos gráficos y tablas, indicando que no proporcionan soluciones óptimas pero sí son implementados en la industria por su fácil entendimiento e implementación. Los métodos de programación lineal sí alcanzan soluciones óptimas, pero resaltan que el responsable de planificar, en una industria, no comprende con claridad los modelos matemáticos, y es ésta la causa por la que no optan por esforzarse en utilizarlos.

En la práctica de la industria, los que ofrecen grandes oportunidades también, son los métodos de simulación (por búsqueda de soluciones factibles) que reproducen, en cierto grado razonable, el proceso de adopción de decisiones típico del directivo. También tienen en cuenta que los supuestos que concurren en un modelo de simulación se pueden establecer con mayor libertad, lo cual contribuye en gran medida a minimizar las dificultades con que se tropieza a la hora de llevarlo a la práctica. En los libros y manuales investigados, la mayoría de los publicados en los últimos 25 años dedican mucho espacio a ejemplos prácticos y la mayoría resueltos con métodos de comparación de alternativas (técnicas gráficas y hoja de cálculo) y comparan los resultados con soluciones dadas con el método del transporte. Esto es a modo práctico para que los estudiantes logren ejercitar, con mayor claridad posible, planes agregados de producción aunque que las soluciones alcanzadas no sean las óptimas.

6. Referencias de planificación agregada en *Handbooks*

Como conclusión de las aportaciones sobre planificación agregada en *Handbooks*, el primero es el de Alford (1945), en donde se manifiesta el problema de la planificación de la cantidad de producción por periodos dentro de un horizonte de tiempo de medio plazo, un año, plazos y fechas de entrega, cantidad de recursos necesarios y fuerza laboral. En este manual como ya se ha explicado en el apartado 4.1.1, el autor desarrolla un método gráfico para realizar un plan agregado.

Maynard (1956) presenta la primera edición del *Industrial Engineering Handbook*, pero al igual que en las ediciones posteriores (segunda edición (1963), y tercera edición (1971)) no hace referencia al plan agregado, solo desarrolla el tema de la programación de producción a muy corto plazo.

Salvendy (1982) edita el *Handbook of Industrial Engineering*, en el que se detalla el problema de planificación agregada, planteando su naturaleza, características, y métodos de planificación. Manteniendo el mismo marco de la planificación agregada, pero con ejemplos actualizados, Salvendy (1992) presenta la segunda edición de este manual. Salvendy (2001) presenta la tercera y última edición de este manual, en esta no trata el problema de la planificación agregada, como se aprecia en el apartado 5 del presente trabajo, se focaliza en la programación de la producción a corto plazo.

7. Aportaciones recientes en revistas especializadas

Nam y Logendran (1992), mediante un *survey*, presentan un esquema de clasificación de las técnicas de planificación agregada en dos grandes grupos; uno representa a las técnicas que alcanzan soluciones óptimas y el otro a las técnicas que no garantizan soluciones óptimas. Con este esquema presentan la investigación sobre el

problema de planificación agregada entre los años 1953 y 1990, dejando a disposición la información sobre algunos métodos de planificación agregada, sin mencionar todas, tanto para los que deseen llevarlas a la industria como para los investigadores que requieran información en este tema.

En su primera clasificación (técnicas de solución óptima) se refieren a los modelos de programación lineal; la regla de decisión lineal; modelos de programación por metas, entre otros, y muestran tablas con cada autor y métodos implementados. En la segunda clasificación (técnicas de solución no-óptima) mencionan la regla de decisión por búsqueda, métodos heurísticos de cambio de producción, el método de los coeficientes gerenciales, y propuestas de simulación, también con cuadros de autores y métodos utilizados. No hacen referencia a las técnicas de comparación de alternativas.

En este survey Nam y Logendran (1992) han investigado la bibliografía en libros desde el año 1953 hasta el año 1985, y artículos hasta el año 1990. En nuestro trabajo hemos profundizando más la investigación remontándonos al año 1918, cuando Rathenau hizo la primera referencia al problema de la planificación agregada, hasta la actualidad.

Con una búsqueda actualizada de artículos sobre el problema de planificación agregada, se describirán estos trabajos siguiendo un orden cronológico.

Damon y Schramm (1972) afirman que el modelo de planificación agregada de la producción de Holt, Modigliani, Muth and Simon (1950) se puede extender incorporando variables que representan al área comercial y a la gerencia financiera. Proponen modelos secuenciales con métodos de programación no-lineal, basados en las reglas de decisión del modelo HMMS, que contemplan en un modelo las decisiones de producción, en otro las decisiones del área comercial, y por último las decisiones financieras. Estos modelos secuenciales posteriormente son incorporados en un modelo simultaneo pero sin lograr una integración total de las diferentes áreas de la empresa, y sin alcanzar soluciones óptimas.

Kirca y Köksalan (1996) frente a la necesidad de proponer un plan de producción y su implementación en una compañía manufacturera, proponen un modelo de programación lineal que integra la planificación de la producción y la planificación financiera. En este modelo integran un plan de producción, para el cual contemplan posibles contrataciones y despidos de mano de obra, el empleo de horas extras, y generar inventarios para enfrentar las variaciones de la demanda. No tienen en cuenta una planificación del tiempo de trabajo de la plantilla para lograr una mayor flexibilidad de trabajo. En su modelo proponen una planificación financiera, contemplando los cobros de los clientes, y algunos pagos. Entre sus pagos tienen en cuenta los salarios del personal, y contemplan dentro del salario el pago de la seguridad

social, los pagos de horas extras, y los costes de despedir personal, el pago del impuesto al valor añadido (IVA), y un coste fijo por impuestos sin ser mencionados. No contemplan los pagos de la retención de la renta a la persona física, del cual se pueden obtener beneficios al postergar el pago de dichas retenciones, y los pagos de la seguridad social también. Proponen en la función objetivo maximizar el valor del dinero futuro, es decir, la diferencia entre el dinero invertido para ganar intereses en periodos futuros y los créditos por préstamos pedidos a los bancos. No introducen una serie de elementos en la gestión de la tesorería que pueden dar mayores beneficios al plan agregado integrado a la hora de pedir créditos o de gestionar los excedentes monetarios.

Tadei et al. (1995) frente a un caso real de una empresa con productos múltiples, algunos estacionales y otros no, proponen para resolver el problema de la planificación agregada de la producción en un año un modelo de programación lineal entera mixta cuya función objetivo es minimizar los niveles de stock necesarios, sin permitir ruptura de stock, para satisfacer una demanda conocida, determinando la cantidad de personal necesario para cada mes del año, de este modo conocer la cantidad de personal que se debe subcontratar en los meses de demanda alta. Utilizan variables enteras para el número de líneas, para la cantidad de los diferentes productos a ser procesados en cada línea, el número total de días laborales en cada mes y la cantidad de cambios de productos en cada línea por día. Proponen un procedimiento heurístico para encontrar las soluciones, basado en un algoritmo de búsqueda local con generación de soluciones vecinas y comparándolas hasta hallar soluciones factibles próximas a las óptimas.

Dobos (1996) obtiene los diferentes niveles de producción (mono-producto) para cada uno de los meses que contribuyen el horizonte de planificación (un año) según los niveles de demanda conocidos. Para satisfacer dicha demanda no recurre al uso de stock, sólo propone hacer uso del empleo y despido de personal, también utilizar horas extras y tiempo de ocio. Con un modelo propuesto en base a una ley de control de óptimo continuo, alcanzan una solución final que es minimizar los costes totales generados de emplear y despedir personal, y de las horas extras y tiempo de ocio, disponiendo de una plantilla de personal totalmente flexible sin considerar restricciones. Con este trabajo el autor logra implementar su propuesta de una ley de control óptimo en tiempo continuo, sin la necesidad de recurrir al control discreto, en un caso de planificación agregada de producción observado como un problema de control.

Hsieh y Wu (2000) proponen un modelo estocástico de programación lineal para considerar la incertidumbre en la demanda y los costes involucrados en el plan agregado. Emplean un método de distribución estocástica triangular, en el que cada coeficiente, restricción y variables pueden tomar tres valores posibles: uno se deno-

mina valor más posible (es la probabilidad de un valor normalizado), otro puede ser el valor más pesimista (el peor de los casos), y el tercero es el valor más optimista (el mejor de los casos). Hacen uso del modelo clásico de Holt et al. (1955) y el de Hanssman-Hess (1969), pero contemplando por cada variable valores estocásticos. Para el plan agregado tienen en cuenta variaciones de la fuerza de trabajo por cada periodo, niveles de empleo y despidos, cantidades de horas extras por trabajador por periodo, variaciones en el nivel de stock y recurrir a pedidos pendientes en casos necesarios. En la función objetivo minimizan los costes totales, logrando soluciones robustas, pero no óptimas.

Fung et al. (2003) y Tang et al. (2003) consideran el problema de la incertidumbre de la demanda del mercado y la incertidumbre en las capacidades de producción. Para enfrentarse a este problema plantean un modelo de programación no-lineal con lógica difusa para la planificación de la producción agregada con múltiples productos. Para este modelo formulan la demanda y la capacidad difusas, y proponen una ecuación de balance de producción y stock para un mismo periodo, y una ecuación de balance dinámico; son ecuaciones difusas, que representan los niveles posibles que puede tomar la demanda incierta del mercado. Determinan los niveles de producción, de fuerza de trabajo, de stock, y pedidos pendientes, que logren un valor esperado del coste total mínimo, utilizando el método de programación paramétrica. No utilizan horas extras ni tiempo de ocio, pero sí consideran la posibilidad de modificar la plantilla de personal respetando ciertas restricciones.

Techawiboonwong y Yenradee (2003) ante el problema de manejar la capacidad de producción disponible, fija, junto con el plan de transferencia de mano de obra (trabajadores polivalentes), proponen un modelo de planificación agregada formulado en base al formato de una hoja de cálculo (método de comparación de soluciones alternativas) usada como herramienta, con una opción dinámica de corrección, por parte del planificador, entre diferentes datos posibles de parámetros ante la observación de las soluciones halladas. El propósito de este modelo de productos múltiples es minimizar los costes totales de producción (fuerza de trabajo, niveles de stock, y horas extras), tratando de optimizar la capacidad de las instalaciones disponibles para satisfacer la demanda conocida de antemano. Mantiene los niveles de fuerza de trabajo constante, reorganizando los trabajadores en los puestos de trabajo requeridos, y recurriendo al empleo de stock. Se implementó con datos de un caso real, el cual no se detallada en el artículo.

Leung et al. (2003) se enfrentan al problema de planificar la producción de una compañía multinacional de ropa interior en Hong Kong. La compañía posee instalaciones en diferentes países, es decir con producción en múltiples fases o etapas. Los autores proponen un modelo de planificación agregada de múltiples etapas con múltiples objetivos, entre ellos maximizar el beneficio, reduciendo las penalizaciones

por impuesto de exportación e importación de la producción por los requisitos de regulación de las diferentes naciones involucradas en la cadena de suministro, haciendo mínimos los costes totales, y mínimos los cambios en el nivel de fuerza laboral. El modelo contempla además productos múltiples, la posibilidad de despedir y contratar fuerza de trabajo para periodos de alta demanda y recurrir a generar niveles de stock para satisfacer una demanda pronosticada. El modelo es desarrollado en programación lineal por metas. Leung et al. (2006) enfrentan el mismo problema de la planificación agregada de producción en la compañía multinacional de Hong Kong, pero en este trabajo proponen un modelo estocástico con distribuciones probabilísticas sobre los pronósticos de la demanda, empleando el mismo método de programación por metas para su resolución.

Corominas et al. (2002), Corominas et al. (2004), y Corominas et al. (2007a) refiriéndose al problema de adaptar la capacidad de producción a las variaciones de la demanda en un horizonte temporal de un año, abordan el problema de la planificación del tiempo de trabajo con jornada anualizada (el tiempo de trabajo se puede distribuir de forma irregular a lo largo del año), analizando y clasificando las principales características del problema. Resaltan la importancia de la flexibilidad que proporciona la anualización a la empresa, ya que tiene la oportunidad de planificar el tiempo de trabajo de forma eficiente, pero a la vez genera nuevos problemas de planificación del tiempo de trabajo, de programación de horarios y, en el caso más complejo, de asignación de tareas a trabajadores. Lusa (2003) describe y formaliza los problemas de planificación del tiempo de trabajo de una plantilla de trabajadores con jornada anualizada, en empresas de servicios y de manufactura; describe detalladamente y de forma estructurada el modo de formular los modelos en programación lineal entera mixta (PLEM) apropiados para cada uno de los casos que se derivan de la clasificación propuesta; propone un procedimiento de resolución basado en la programación lineal entera mixta (PLEM) y realiza una amplia experiencia computacional comprobando que para la mayoría de los casos, los modelos propuestos son totalmente operativos, y propone alternativas de resolución para los casos en que la PLEM no siempre proporciona la solución exacta en tiempos satisfactorios. Por otro lado, Lusa (2003) modeliza y resuelve un caso en el que los productos son perecederos (es decir, pueden estar almacenados durante un tiempo limitado). Para ello, considera la posibilidad de que tanto el precio de venta como el coste de mantenimiento del stock dependan de la edad del producto. Indica que el coste de posesión de stock puede ser constante o aumentar con la vida del producto, pudiendo ser el caso de productos perecederos que necesiten un mantenimiento especial conforme se acerca su fecha de caducidad. En Corominas et al. (2007b) tratan un caso industrial, con posibilidad de diferir demanda (productos no perecederos) y, además, presentan los modelos de planificación como herramienta de negociación de las condiciones de

anualización (por ejemplo flexibilidad semanal y número de horas anuales) entre la empresa y los trabajadores.

Singhvi et al. (2004) consideran un modelo de programación lineal entera mixta para resolver el problema de la planificación agregada recurriendo a la subcontratación, a contratar y despedir fuerza laboral, a horas extras y mantener stock, sin y con rupturas de éste, para satisfacer los pronósticos de demanda conocidos. La función objetivo del modelo maximiza los beneficios reduciendo los costes totales involucrados en la planificación. Proponen un horizonte temporal de seis meses con periodos de un mes. En primer lugar proponen un modelo mono-producto con el objetivo de maximizar el beneficio sin aceptar la ruptura de stock recurriendo a horas extras y subcontratación, y en segundo lugar desarrollan otro modelo mono-producto, cuya función objetivo también es maximizar el beneficio, aceptando la ruptura de stock (coste de diferir demanda) a cambio de no recurrir a la subcontratación de unidades de producción y a horas extras.

Wang y Liang (2004) adoptan la posibilidad de variar la fuerza laboral por medio de despidos y contratación, permitiendo mantener stock y si es necesario considerar rupturas de stock para satisfacer una demanda incierta en un horizonte temporal de un año para la planificación agregada. Para alcanzar las soluciones del plan desarrollan un modelo de programación lineal de múltiples objetivos para un entorno de variables de lógica difusa. Proponen un algoritmo de cinco pasos en los que se linealiza por partes la función objetivo, obteniendo una serie de funciones lineales y luego aplican la programación lineal a cada una, generan una función de satisfacción en función de los resultados obtenidos para que la persona que toma la decisión pueda evaluar y si es necesario modificar parámetros del modelo original hasta alcanzar cierto grado de satisfacción. Entre los múltiples objetivos que se proponen están la minimización del coste total de producción; minimizar los costes de transporte y pedidos pendientes, y minimizar el índice de cambios en el nivel de fuerza laboral. Evalúan este algoritmo con datos reales. Luego Wang y Liang (2005a) presentaron una aplicación de este modelo a un caso de la corporación tecnológica Daya, con esto demuestran la fiabilidad de este modelo para el problema de planificación agregada de la producción.

Leung y Wu (2004) indican que es muy frecuente que la gerencia encuentre incertidumbre y ruidos en los datos de la demanda pronosticada, y en los costes de producción, por esto las variables y parámetros que ellos plantean son estocásticos. Los autores desarrollan un modelo estocástico de optimización robusta para resolver un problema de planificación agregada de la producción en un ambiente altamente incierto, en el que disponen de la posibilidad de generar y mantener stock, sin llegar a la ruptura, proponen variar la fuerza laboral cuando necesiten modificar los niveles de producción debido al aumento incierto en los niveles de la demanda, recurriendo

al empleo y despido de personal, respetando ciertas restricciones por convenios. Proponen un método de programación paramétrica para minimizar el valor esperado del coste total (la suma de los costes de producción, de mantener stock, y de variar la fuerza laboral) a través de penalización de parámetros en un horizonte temporal de un año, de manera que la persona responsable de decidir sobre el plan agregado pueda determinar una estrategia de producción favorable, niveles de producción, niveles de stock, y cantidad de fuerza de trabajo necesaria que alcancen un mínimo coste, satisfaciendo los posibles niveles de demanda.

Ganesh y Punniyamoorthy (2005) introduciéndose en la planificación agregada de un producto simple, encuentran los niveles de producción y sus variaciones, considerando las posibilidades de empleo y despido de personal, recurrir a la subcontratación de productos, hacer uso de horas extras y stock, para satisfacer los pronósticos conocidos de la demanda. Desarrollan un modelo de programación lineal entera con una función objetivo que minimiza los costes totales involucrados en la planificación agregada y minimizar los cambios en el nivel de fuerza laboral. Implementan métodos heurísticos para encontrar las soluciones, como son los algoritmos genéticos (GA), de recocido simulado (SA) y algoritmos híbridos, combinación (GA-SA). Desarrollan y prueban el modelo propuesto con estos métodos sólo para demostrar que los algoritmos híbridos alcanzan mejores soluciones que los algoritmos puros para el problema de planificación agregada, sin analizar otros métodos o soportes de programación, como es CPLEX (software para la resolución de PL, PLE y PLEM).

Wang y Liang (2005b) con las mismas características del caso planteado en Wang y Liang (2004), consideran el problema de la imprecisión de los pronósticos de demanda y los costes de operación y capacidad en la planificación agregada de la producción. Proponen un modelo de programación lineal estocástica, desarrollando un método con una función objetivo resuelta por medio de un proceso de seis pasos dirigidos por la persona encargada de tomar las decisiones de forma interactiva con el ordenador. El modelo es de múltiples objetivos entre ellos: minimizar los costes totales, maximizar la probabilidad de obtener costes totales más bajos, y minimizar el riesgo de obtener costes totales muy altos. Este modelo es aplicado al caso de estudio de la corporación tecnológica Daya.

Gomes da Silva et al. (2006) consideran tres aspectos importantes para tener en cuenta en la planificación agregada de la producción, que son el beneficio de la compañía, la satisfacción del cliente, y el ambiente de trabajo. Para alcanzar estos tres objetivos los autores proponen, ante un caso real de una compañía que elabora materiales para la construcción en Portugal, el desarrollo de un modelo de programación lineal entera mixta con múltiples criterios. En este modelo consideran los siguientes aspectos: las restricciones legales sobre la reducción o aumento del tamaño de la fuerza laboral, y las horas extras, adoptan la posibilidad de subcontratar

producción y de almacenar stock, también aceptan la ruptura de stock. Con estas consideraciones ante una demanda determinista proponen tres funciones objetivo por separado, la primera maximiza el beneficio de la compañía, la segunda minimiza los retrasos de los pedidos de los clientes, y la tercera minimiza las variaciones en la fuerza laboral, todas estas a lo largo de un horizonte temporal de un año dividido en periodos mensuales. Para encontrar soluciones a este problema los autores desarrollan un método de generación, evaluación y comparación de soluciones vecinas, a través de un ambiente interactivo, en el cual el responsable de tomar la decisión puede ir agregando, quitando o modificando datos hasta hallar una solución satisfactoria, aunque no necesariamente óptima.

8. Análisis del estado del arte

Como se manifiesta en el apartado de la introducción, la planificación agregada puede desempeñar un papel dominante en la gestión de la empresa, pero no sólo en el área de producción, sino que puede integrar todas las áreas de la organización.

Singhal y Singhal (2006) expresan que la planificación agregada, surgiendo como propuesta desde el año 1955 por Holt, Modigliani, Muth y Simon, en la actualidad es una buena referencia para la planificación de ventas y operaciones, en la cual puede cumplir la función de pivote al integrar las funciones de operaciones de producción, de comercialización y financieras. Durante los pasados 50 años la idea de integrar estas funciones ha provocado un fuerte impacto en la evolución de las operaciones de la producción, la gerencia de la cadena de suministros y en la administración de rentas de la compañía, pero no se ha llegado a concretar trabajos con dichas integraciones simultáneamente. No obstante se debe resaltar el trabajo de Kirca y Köksalan (1996) quienes si han logrado un plan de producción agregado integrado, pero sin tener en cuenta la planificación del tiempo de trabajo y con un plan financiero en el que tienen en cuenta los instrumentos de tesorería, pero algunos de ellos de manera superficial.

Entre los trabajos encontrados sobre planificación agregada y presentados en este estado del arte, todos contemplan el aspecto de producción, pero sin integrar simultáneamente las áreas que conforman la gestión de la empresa, que son la producción, la plantilla, el tiempo de trabajo, y la gestión de la tesorería.

Desde el aspecto de la integración de las operaciones de producción y tesorería se mencionan los trabajos de Badell et al. (1998); Badell et al. (2004); Badell et al. (2005); Guillén et al. (2006) y Guillén et al. (2007), pero no tratan el problema de planificación agregada, sino de programación de la producción.

Badell et al. (1998) desarrollan un primer paso hacia la integración de la programación de la producción con la tesorería. Proponen la programación de la produc-

ción respetando un límite mínimo y uno máximo, impuestos sobre la liquidez de la compañía. Siguiendo en la misma línea Badell et al. (2004) y Badell et al. (2005) desarrollan una propuesta de análisis y evaluación en la inversión sobre la capacidad de la planta de producción de una compañía química con procesos de hornada. Los autores optimizan de manera simultánea la cadena de suministro (programación de la producción, fechas de pedidos de materiales, fechas de entrega debidas a los clientes, etc.), las decisiones de modernizar la planta (inversiones), y las operaciones financieras con un modelo de programación lineal entera mixta.

Guillén et al. (2006), y Guillén et al.(2007) alcanzan la intergación total de un modelo de programación de la producción con un modelo de tesorería. Dividen este trabajo en dos partes, una en el que desarrollan el modelo de programación de la producción, cuyos resultados obtenidos se introducen a un modelo de tesorería. En la segunda parte integran completamente ambos modelos, obteniendo como conclusión una mejora amplia de los resultados obtenidos en comparación con el primer trabajo.

Chien y Cunningham (2000) contemplan la importancia de una planificación agregada integrada a las áreas de comercialización y de finanzas. Para lograr una aproximación a esta integración proponen trabajar con hojas de cálculo vinculadas entre sí. En una hoja de cálculo determinan los pronósticos de ventas por cada mes con base en la información recaudada de tres años anteriores por el área comercial. Estos pronósticos son introducidos en una segunda hoja donde se determina el plan agregado de la producción de menor coste total, entre tres planes diferentes. En una tercera hoja de cálculo ligada a la segunda se ingresan los datos del plan agregado seleccionado y en función de datos financieros previos determinan el presupuesto necesario para desarrollar este plan de producción. Con este método solo determinan un plan agregado de producción con su respectivo presupuesto sin que sea el óptimo, solo se conforman con el plan de menor coste total obtenido de la comparación de tres alternativas.

Haciendo referencia a la integración del área comercial a la planificación agregada, no se encuentra ningún trabajo que logre dicha integración. Pero sí es importante mencionar propuestas que se pueden tener en cuenta para ser integradas en la planificación agregada. Britan y Caldentey (2003) presentan una revisión de los modelos de precios para la gerencia de ingresos de la compañía. Entre los trabajos destacados en esta revisión está el trabajo de Gallego y Van Ryzin (1994) y Britan y Mondshein (1997) quienes desarrollan una propuesta hacia el problema de la fijación de precios dinámica a cargo de la gerencia de ingresos o rentas, proponiendo un modelo matemático que resuelven mediante programación dinámica. Estos modelos encuentran una política de precios que maximiza la esperanza matemática del ingreso. Se permiten los cambios de precios, dentro de un horizonte temporal establecido para la venta de productos y se considera una demanda estocástica.

Gallego y Van Ryzin (1997) siguen en la misma línea del método propuesto en el año 1994 para la fijación de precios, proponen en este otro trabajo múltiples productos y trabajan con demanda determinista.

Maglaras y Meissner (2006) proponen un modelo en la misma línea de Gallego y Van Ryzin (1994, 1997), logrando maximizar los ingresos previstos totales de una compañía sobre un horizonte temporal finito, mediante el desarrollo de estrategias dinámicas y estáticas para cada producto, de múltiples productos, y para el caso de optar por precios fijos, se puede optar por seleccionar una regla dinámica que controla la asignación de la capacidad de producción a los pedidos de los diferentes productos.

Baker y Collier (2003) realizan una comparación de un método de fijación de precios fijos tradicional con un método de fijación de precios dinámicos, obteniendo muy buenos resultados con el segundo método respecto al ingreso de efectivo a la compañía. La implementación y comparación la realizan mediante un caso de estudio real de una compañía de servicios hoteleros.

Geoffrion (2002) reconoce la importancia de la incorporación de nuevas tecnologías y métodos de optimización para la gerencia de operaciones, y determina que la fijación de precios dinámica "*dynamic pricing*" de los productos es fácil de implementar especialmente en empresas de servicios, logrando mejorar los precios fijados en tiempo real. El autor como conclusión de su trabajo de investigación considera que la fijación de precios dinámica es un punto de convergencia entre la gerencia de comercialización y la gerencia de operaciones de producción como disciplinas gerenciales. La fijación de precios se convierte cada vez menos en una clase de decisión tomada esporádicamente por especialistas de comercialización y cada vez más en un proceso de la gestión de producción, en el cual las decisiones de fijar precios están integradas dinámicamente con los pasos de operaciones y decisiones que son una preocupación tradicional de la gerencia de operaciones.

9. Conclusiones

- Con este trabajo se presenta un estado del arte sobre planificación agregada que contiene información de la bibliografía desde el año 1918 hasta el año 2006. Se ha investigado los libros y manuales relevantes a este tema que son citados, entre otros, en la bibliografía de los programas de grado de carreras universitarias, y también de postgrados, se han revisado algunas presentaciones de clases en cursos de grados sobre planificación agregada. Se ha realizado una revisión y análisis de los artículos que plantean métodos para trabajar en planificación agregada hasta el año 2006, logrando ofrecer una idea sobre el panorama actual de la planificación agregada desde el aspecto científico.

- En concordancia con la idea obtenida de cómo se plantea la planificación agregada en los libros a que hacen referencia los cursos de grado, el panorama obtenido desde el análisis de las aportaciones en artículos de revistas demuestran una tendencia similar en cuanto a la importancia dada a cada técnica de planificación en el transcurso del tiempo. Entre 1950 y 1980, surgieron y se analizaron con más importancia las técnicas gráficas y los modelos matemáticos de muy simple aplicación, debido en gran parte a las limitaciones computacionales. Desde el año 1980 la tendencia es hacia la programación lineal con múltiples objetivos. Analizando las aportaciones recientes en revistas, se observa claramente esta tendencia, debido a que la mayoría de los trabajos citados se basan en la metodología de la programación lineal, y programación lineal entera mixta.
- Se resaltan las propuestas de Corominas et al. (2002), Lusa (2003), Corominas et al. (2004), Corominas et al. (2007a), y Corominas et al. (2007b) explicadas antes, para la implementación de la planificación del tiempo de trabajo con jornada anualizada en el método de planificación agregada de la producción con plantilla de trabajadores fija. Con estos trabajos se dispone de una opción ventajosa y relativamente nueva a la hora de realizar un modelo integrado de planificación agregada, y evaluar estas propuestas junto con las opciones de la subcontratación, del uso de horas extras, de recurrir a ampliar o reducir la plantilla laboral con empleos y despidos respectivamente, de los modelos clásicos, para encontrar una solución óptima en cuanto a los diferentes criterios de evaluación que se planteen.
- Como se explica en el apartado 8, al realizar el estado del arte sobre planificación agregada solo se ha encontrado un trabajo que integra las áreas de producción, la plantilla y la tesorería (Kirca y Köksalan, 1996), pero ninguno que integra la producción, la plantilla, el tiempo de trabajo, y la gestión de tesorería simultáneamente. Pero si se hace referencia a trabajos de investigación que determinan la importancia de una integración entre las áreas que forman parte de la gerencia de la empresa (Singhal y Singhal, 2006; Badell et al., 1998; Badell et al., 2004; Badell et al., 2005; Guillén et al., 2006; Guillén et al., 2007; Chien y Cunningham, 2000; Damon y Sachramm, 1972; y Geoffrion, 2002).

10. Referencias

- Alford, L.P. (1945). *Production Handbook*. The Ronald Press Co.
- Algeo M.A. y Barkmeyer E.J. (2001). Capitulo 11, Enterprise Resource Planning Systems in Manufacturing en Gavriel Salvendy ed. *Handbook of industrial engineering. Technology and Operations Management*. John Wiley & Sons.
- Badell, M.; Nougués, J.M.; Puigjaner, L. (1998). Integrated on line production and financial scheduling with intelligent autonomous agents based information system. *Computers & Chemical Engineering*, 22, S271-S278.
- Badell, M.; Romero, J.; Huertas, R.; Puigjaner, L. (2004). Planning scheduling and budgeting value-added chains. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 45-61.
- Badell, M.; Romero, J.; Puigjaner, L. (2005). Optimal budget and cash flows during retrofitting periods in batch chemical process industries. *International Journal of Production Economics*, 95, 359-372.
- Baker, T.K.; Collier, D.A. (2003). The benefits of optimizing prices to manage demand in hotel revenue management systems. *Production and Operations Management*, 12, 502-518.
- Bitran, G.R.; Mondschein, S. (1997). Periodic pricing of seasonal product in retailing. *Management Science*, 43, 427-443.
- Bitran, G.R.; Caldentey, R. (2003). An overview of pricing models for revenue management. *Manufacturing and Service Operations Management*, 5, 203-229.
- Blocher, J.D.; Chand, Z. (1992). Capitulo 78; Resource Planning for Aggregate Production en Gavriel Salvendy ed. *Handbook of Industrial Engineering*. John Wiley & Sons.
- Bowman, E.H. (1956). Production Scheduling by the Transportation Method of Linear Programing. *Operations Research*, 4-1, 100-103.
- Bowman, E.H. (1963). Consistency and Optimality in Managerial Decision Making. *Management Science*, 9-2, 310-321.
- Buffa, E.S (1968a). *Production-Inventory Systems: planning and control*. Irwin.
- Buffa, E.S (1968b). *Operations Management; Problems and Models*. John Wiley & Sons.
- Buffa, E.S; Taubert, W.H. (1972). *Production-Inventory Systems*. Irwin.

- Buffa E.S. y Taubert W.H. (1975). *Sistemas de Producción e Inventario. Planificación y Control*. Limusa.
- Buffa, S.; Sarin, R.K. (1992). *Administración de la producción y de las operaciones*. Limusa.
- Chang, R. H.; Jones, C.M. (1970). Production and Workforce Scheduling Extensions. *AIIE Transactions*, 2-4, 326-333.
- Chase, R.B.; Aquilano, N.J. (1973). *Production and Operations Management*. Irwin.
- Chase, R.B.; Aquilano, N.J. (1992). *Production and Operations Management*. 6^a edition. Irwin.
- Chase, R.B.; Aquilano, N.J.; Jacobs, F.R. (2000). *Administración de Producción y Operaciones. Manufactura y Servicios*. Mc Graw-Hill Co.
- Chien, Y.I.; Cunningham, W.H.I. (2000). Incorporating production planning in business planning: a linked spreadsheet approach. *Production Planning & Control*, 11-3, 299-307.
- Companys, R. y Corominas, A. (1989). *Organización de la producción I: Dirección de operaciones*. Edicions UPC.
- Corominas, A.; Lusa, A.; Pastor, R. (2002). Using MILP to plan annualised hours. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 1101-1108.
- Corominas, A.; Lusa, A.; Pastor, R. (2004). Planning Annualised Hours with a Finite Set of Weekly Working Hours and Joint Holidays. *Annals of Operations Research*, 128, 217-233.
- Corominas, A.; Lusa, A.; Pastor, R. (2007a). Planning annualised hours with a finite set of weekly working hours and cross-trained workers. *European Journal of Operational Research*, 176, 1, 230-239.
- Corominas, A.; Lusa, A.; Pastor, R. (2007b). Using a MILP model to establish a framework for an annualised hours agreement. *European Journal of Operational Research*, 177, 3, 1495-1506.
- Damon, W.W.; Schramm, R. (1972). A simultaneous decision model for production, marketing and finance. *Management Science*, 9, 2, 161-172.
- Davis, M.M.; Chase, R.B.; Aquilano, N.J. (2001). *Fundamentals of Operations Management*. 3^a ed. McGraw-Hill Co.

- Dobos, I. (1996). Aggregate planning with continuous time. *International Journal of Production Economics*, 43, 1-9.
- Dominguez Machuca, J.A.; Alvarez Gil, M.J.; Dominguez Machuca, M.A.; Garcia Gonzalez, S.; Ruiz Jiménez, A. (1995). *Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*. McGraw-Hill.
- Eilon, S. (1982). Capitulo 11.3; Programación de la producción agregada de Gavriel Salvendy ed. *Handbook of industrial engineering*. John Wiley & Sons.
- Fogarty, D.W.; Hoffmann, T.R.; Stonebraker, P.W. (1989). *Production and Operations Management*. South-Western Publishing Co.
- Fogarty, D.W.; Blackstone, J.H.; Hoffmann, T.R. (1991). *Production & Inventory Management*. South-Western Publishing Co.
- Fung, R.Y. K.; Tang, J.; Wang, D. (2003). Multiproduct aggregate production planning with fuzzy demands and fuzzy capacities. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Human*, 33-3, 302-313.
- Gallego, G.; Van Ryzin, G. (1994). Optimal dynamic pricing of inventories with stochastic demand over finite horizons. *Management Science*, 40, 999-1020.
- Gallego, G.; Van Ryzin, G. (1997). A multiproduct dynamic pricing problem and its applications to network yield management. *Operations Research*, 45, 24-41.
- Gallien, J.; Jennings O. (2004). Introduction to Operations Management. Massachusetts Institute of Technology (MIT). <http://web.mit.edu>. Página web de los cursos del MIT. 14/03/06.
- Ganesh, K.; Punniyamoorthy, M. (2005). Optimization of continuous-time production planning using hybrid genetic algorithms-simulated annealing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26 (1-2), 148-154.
- Geoffrion, A.M. (2002). Progress in operations management. *Production and Operations Management*, 11, 92-100.
- Gomes da Silva, C.; Figueira, J.; Lisboa, J.; Barman, S. (2006). An interactive decision support system for an aggregate production planning model based on multiple criteria mixed integer linear programming. *Omega* 34, 167-177.
- Graves, S. (1999). Manufacture planning and control. Massachusetts Institute of Technology (MIT). <http://mit.ocw.universia.net>. Página web de los cursos del MIT. 14/03/06.

- Guillén, G.; Badell, M.; Espuña, A.; Puigjaner, L. (2006). Simultaneous optimization of process operations and financial decisions to enhance the integrated planning/scheduling of chemical supply chains. *Computers & Chemical Engineering*, 30, 421-436.
- Guillén, G.; Badell, M.; Puigjaner, L. (2007). A Holistic framework for short-term supply chain management integrating production and corporate financial planning. *International Journal of Production Economics*, 106, 288-306.
- Hanssmann, F.; Hess S.W. (1960). A Linear Programming Approach to Production and Employment Scheduling. *Management Technology*, 1, 46-54.
- Hax, A.C. (1978). *Handbook of Operations Research. Models and Applications*. Litton Educational Publishing ed.
- Heizer J. y Render B. (1997). *Dirección de la producción-Decisiones Tácticas*. 4^a ed. Prentice-Hall Iberia.
- Heizer, J.; Render, B. (2001). *Dirección de la producción-Decisiones tácticas*. 6^a ed. Prentice-Hall Iberia.
- Holt, C.C.; Modigliani, F.; Muth J.F.; Simon H.A. (1955). A Linear Decision Rule for Production and Employment Scheduling. *Management Science*, 2-1, 1-30.
- Holt, C.C.; Modigliani, F.; Muth J.F.; Simon H.A. (1960). *Planning Production, Inventories and Work Force*. Prentice-Hall.
- Hsieh, S.; Wu, M. (2000). Demand and cost forecast error sensitivity analyses in aggregate production planning by possibilistic linear programming models. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, 355-364.
- Johnson, L.A.; Montgomery, D.C. (1974). *Operations research in production planning, scheduling and inventory control*. John Wiley & Sons.
- Kirca, Ö.; Köksalan, M.M. (1996). An integrated production and financial planning model and an application. *IIE Transactions*, 28, 677-686.
- Kolenda, J. F. (1970). *A Comparison of Two Aggregate Planning Models*. Tesis de Maestría inédita, Wharton School of Finance and Commerce.
- Krajewski, L.J.; Ritzman, L.P. (1987). *Operations Management. Strategy and Analysis*. Addison-Wesley Publishing Co.
- Krajewski, L.J.; Ritzman, L.P. (2000). *Administración de Operaciones. Estrategia y análisis*. 5^a ed. Pearson Educación.

- Krajewski, L.J.; Ritzman, L.P. (2005). *Operations Management. Processes and Value Chains*. 7^a ed. Pearson Education.
- Larrañeta J.; Onieva L. y Lozano S. (1988). *Métodos modernos de gestión de la producción*. Alianza Universidad Textos ed.
- Leung, S.C.H.; Wu, Y.; Lai, K.K. (2003). Multi-site aggregate production planning with multiple objectives: a goal programming approach. *Production Planning & Control*, 14-5, 425-436.
- Leung, S.C.H.; Wu, Y. (2004). A robust optimization model for stochastic aggregate production planning. *Production Planning & Control*, 15-5, 502-514.
- Leung, S.C.H.; Wu, Y.; Lai, K.K. (2006). A stochastic programming approach for multi-site aggregate production planning. *Journal of the Operational Research Society*, 57-2, 123-132.
- Lusa, A. (2003). *Planificación del tiempo de trabajo con jornada anualizada*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Maglaras, C.; Meissner, J. (2006). Dynamic pricing strategies for multiproduct revenue management problems. *Manufacturing & Service Operations Management*, 8-2, 136-148.
- Maynard, H.B. (1956). *Industrial engineering handbook*, 1^a ed. McGraw-Hill Book.
- Maynard, H.B. (1963). *Industrial engineering handbook*, 2^a ed. McGraw-Hill Book.
- Maynard, H.B. (1971). *Industrial engineering handbook*, 3^a ed. McGraw-Hill Book.
- Meal H.C. (1978). Capitulo 9; A study of multi-stage production planning en Hax A.C. ed. *Studies in Operations Management*. North-Holland, Elsevier.
- Miranda Gonzalez, F.J.; Rubio, S.; Chamorro, A.; Bañegil, T. (2005). *Manual de dirección de operaciones*. Thomson.
- Mize, J.H.; White, C.R.; Brooks, G.H. (1971). *Planificación y Control de Operaciones*. Prentice Hall.
- Nam, S.; Logendran, R. (1992). Aggregate production planning - A survey of models and methodologies. *European Journal of Operational Research*, 61, 255-272.

- Salvendy G. (1982). *Handbook of industrial engineering*. John Wiley & Sons.
- Salvendy G. (1992). *Handbook of industrial engineering*. John Wiley & Sons.
- Salvendy G. (2001). *Handbook of industrial engineering*. John Wiley & Sons.
- Singhal, J.; Singhal, K. (2006). Holt, Modigliani, Muth, and Simons work and its role in the renaissance and evolution of operations management. *Journal of Operations Management*, doi:10.1016/j.jom.2006.06.003.
- Sinhvi, A.; Madhavan, K.P.; Shenoy, U.V. (2004). Pinch analysis for aggregate production planning in supply chains. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 993-999.
- Sypkens, H. A. (1967). Planning of Optimal Plant Capacity. Tesis de Maestría inédita, Sloan School of Management, MIT.
- Tadei, R.; Trubian, M.; Avendaño, J.L.; Della Croce, F.; Menga, G. (1995). Aggregate planning and scheduling in the food industry: A case study. *European Journal of Operational Research*, 87, 564-573.
- Tang, J.F.; Fung, R.Y.K.; Yung, K.L. (2003). Fuzzy modelling and simulation for aggregate production planning. *International Journal of Systems Science*, 34 (12-13), 661-673.
- Taubert, W. H. (1968). A Search Decision Rule for the Aggregate Scheduling Problem. *Management Science*, 14-6, 343-359.
- Techawiboonwong, A.; Yenradee, P. (2003). Aggregate production planning with workforce transferring plan for multiple product types. *Production Planning & Control*, 14-5, 447-458.
- Urwick, L.; Brech, E.F.L. (1984). *La historia del management*. Orbis.
- Wang, R.; Liang, T. (2004). Application of fuzzy multi-objective linear programming to aggregate production planning. *Computers & Industrial Engineering*, 46, 17-41.
- Wang, R.C.; Liang, T.F. (2005a). Aggregate production planning with multiple fuzzy goals. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25 (5-6), 589-597.
- Wang, R.C.; Liang, T.F. (2005b). Applying possibilistic linear programming to aggregate production planning. *International Journal of Production Economics*, 98, 328-341.