

TESIS DOCTORAL  
**MRP IV**

PLANIFICACIÓN DE  
REQUERIMIENTOS DE  
MATERIALES

CUARTA GENERACIÓN

INTEGRACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE  
LA PRODUCCIÓN Y DEL TRANSPORTE DE  
APROVISIONAMIENTO



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**AUTOR:**

D. F. MANUEL DÍAZ-MADROÑERO BOLUDA

**DIRECTORES:**

DRA. DÑA. JOSEFA MULA BRU

DR. D. DAVID PEIDRO PAYÁ

DICIEMBRE  
MMXIV



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

# **MRP IV: PLANIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS DE MATERIALES CUARTA GENERACIÓN**

Integración de la planificación de la producción y  
del transporte de aprovisionamiento

**TESIS DOCTORAL**

**AUTOR:** D. F. Manuel Díaz-Madroñero Boluda

**DIRECTORES:** Dra. Dña. Josefa Mula Bru  
Dr. D. David Peidro Payá

Diciembre de 2014

Esta tesis se ha desarrollado dentro del Grupo de Investigación CIGIP (Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción) de la Universitat Politècnica de València, en el marco de los proyectos denominados *Modelos de optimización fuzzy y computación evolutiva y de simulación de los procesos de planificación de la producción y del transporte en una cadena de suministro. Propuesta de planificación colaborativa soportada por sistemas multi-agente. Integración en un sistema de decisión. Aplicaciones* (EVOLUTION) (Ref. DPI2007-65501); *Tecnología de Producción basada en la Realimentación de Decisiones de Planificación de Producción, Transporte y Descargas y el Rediseño de Almacenes en Cadena de Suministro* (REVOLUTION) (Ref. DPI2010-19977) y *Diseño y gestión de operaciones en cadenas globales de suministro* (GLOBOP) (Ref. DPI2012-38061-C02-01), financiados por el Gobierno de España, y los proyectos *Requerimientos de Materiales Cuarta Generación* (MRP IV) (Ref. PAID-05-12) y *Modelos Cuantitativos para el Diseño de Cadenas de Suministro Socialmente Responsables bajo condiciones de Incertidumbre. Aplicación de Estrategias de Solucion basadas en Metaheurísticas Híbridas* (Ref. PAID-06-12), financiados por la Universitat Politècnica de València.

## RESUMEN

El sistema de planificación de requerimientos de materiales o MRP (*Material Requirement Planning*), desarrollado por Orlicky en 1975, sigue siendo en nuestros días y, a pesar de sus deficiencias identificadas, el sistema de planificación de la producción más utilizado por las empresas industriales. Las evoluciones del MRP se vieron reflejadas en el sistema MRPII (*Manufacturing Resource Planning*), que considera restricciones de capacidad productiva, MRPIII (*Money Resource Planning*), que introduce la función de finanzas; y la evolución comercial del mismo en el ERP (*Enterprise Resource Planning*), que incorpora modularmente todas las funciones de la empresa en un único sistema de decisión, cuyo núcleo central es el MRP. Los desarrollos posteriores de los sistemas ERP han incorporado las nuevas tecnologías de la información y comunicaciones. Asimismo, éstos se han adaptado al contexto económico actual caracterizado por la globalización de los negocios y la deslocalización de los proveedores desarrollando otras funciones como la gestión de la cadena de suministro o del transporte, entre otros. Por otro lado, existen muchos trabajos en la literatura académica que han intentado resolver algunas de las debilidades del MRP tales como la optimización de los resultados, la consideración de la incertidumbre en determinados parámetros, el inflado de los tiempos de entrega, etc. Sin embargo, tanto en el ámbito comercial como en el científico, el MRP y sus variantes se centran en el requerimiento de los materiales y en la planificación de las capacidades de producción, lo que es su desventaja principal en aquellas cadenas de suministro donde existe una gran deslocalización de los proveedores de materias primas y componentes. En estos entornos, la planificación del transporte adquiere un protagonismo fundamental, puesto que los elevados costes y las restricciones logísticas suelen hacer subóptimos e incluso infactibles los planes de producción propuestos, siendo la re-planificación manual una práctica habitual en las empresas. Esta tesis doctoral propone un modelo denominado MRPIV, que considera de forma integrada las decisiones de la planificación de materiales, capacidades de recursos de producción y el transporte, con las restricciones propias de este último, tales como diferentes modos de recogida (*milk-run*, camión completo, rutas) en la cadena de suministro con el objetivo de evitar la suboptimización de estos planes que en la actualidad se generan usualmente de forma secuencial e independiente. El modelo propuesto se ha validado en una cadena de suministro del sector del automóvil confirmando la reducción de costes totales y una planificación más eficiente del transporte de los camiones necesarios para efectuar el aprovisionamiento.

## RESUM

El sistema de planificació de requeriments de materials o MRP (*Material Requirement Planning*), desenvolupat per Orlicky en 1975, segueix sent en els nostres dies i, malgrat les seues deficiències identificades, el sistema de planificació de la producció més utilitzat per les empreses industrials. Les evolucions del MRP es van veure reflectides en el sistema MRPII (*Manufacturing Resource Planning*), que considera restriccions de capacitat productiva, MRPIII (*Money Resource Planning*), que introdueix la funció de finances; i l'evolució comercial del mateix en l'ERP (*Enterprise Resource Planning*), que incorpora modularment totes les funcions de l'empresa en un únic sistema de decisió, el nucli central del qual és el MRP. Els desenvolupaments posteriors dels sistemes ERP han incorporat les noves tecnologies de la informació i comunicacions. Així mateix, aquests s'han adaptat al context econòmic actual caracteritzat per la globalització dels negocis i la deslocalització dels proveïdors desenvolupant altres funcions com la gestió de la cadena de subministrament o del transport, entre d'altres. D'altra banda, existeixen molts treballs en la literatura acadèmica que han intentat resoldre algunes de les febleses del MRP tals com l'optimització dels resultats, la consideració de la incertesa en determinats paràmetres, l'unflat dels temps de lliurament, etc. No obstant açò, tant en l'àmbit comercial com en el científic, el MRP i les seues variants se centren en el requeriment dels materials i en la planificació de les capacitats de producció, la qual cosa és el seu desavantatge principal en aquelles cadenes de subministrament on existeix una gran deslocalització dels proveïdors de matèries primeres i components. En aquests entorns, la planificació del transport adquireix un protagonisme fonamental, ja que els elevats costos i les restriccions logístiques solen fer subòptim i fins i tot infactibles els plans de producció proposats, sent la re-planificació manual una pràctica habitual en les empreses. Aquesta tesi doctoral proposa un model denominat MRPIV, que considera de forma integrada les decisions de la planificació de materials, capacitats de recursos de producció i el transport, amb les restriccions pròpies d'aquest últim, com diferents maneres de recollida (*milk-run*, camió complet, rutes) en la cadena de subministrament amb l'objectiu d'evitar la suboptimització d'aquests plans que en l'actualitat es generen usualment de forma seqüencial i independent. El model proposat s'ha validat en una cadena de subministrament del sector de l'automòbil confirmant la reducció de costos totals i una planificació més eficient del transport dels camions necessaris per a efectuar l'aprovisionament.

## ABSTRACT

The Material Requirement Planning system or MRP developed by Orlicky in 1975 keeps on being in our days and, in spite of its identified deficiencies, the most used production planning system by industrial companies. The evolutions of the MRP were reflected in the MRPII system (Manufacturing Resource Planning), which considers productive capacity constraints, MRPIII (Money Resource Planning), which introduces the financial function; and the MRP commercial evolution into the ERP (Enterprise Resource Planning) which incorporates all the company functions into a unique decision system through modules whose central nucleus is the MRP. Later developments of the ERP systems have incorporated the new information and communications technologies. Moreover, these have been adapted to the current economic context characterized by business globalization and the offshoring of suppliers by developing other functions such as supply chain management or transport, among others. On the other hand, many works exist in the academic literature that have attempted to overcome some of the deficiencies of traditional MRP such as results optimization, considering uncertainty in certain parameters, inflated lead times, etc. However in both the commercial and academic environments, the MRP and its variants focus on material requirements and on production capacity planning, which are the main disadvantages in supply chains where there is considerable offshoring of raw materials and parts suppliers. In these contexts, transport planning plays a leading role since high costs and logistical constraints usually make the proposed production plans suboptimal, and even infeasible, and manual replanning is a common practice in companies. This doctoral dissertation proposes a model called MRPIV, which considers the material, production resource capacities and transport planning decisions, with the typical constraints of the latter, such as different modes of collection (milk-run, full, routes) in the supply chain to avoid the suboptimization of these plans which, nowadays, are usually generated sequentially and independently. The proposed model has been validated in a supply chain in the automotive sector confirming the total cost reduction and more efficient transport of needed trucks to carry out the procurement planning.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Manuel y María Pilar,  
por su paciencia, por su inagotable confianza  
y por su firme convicción de ofrecernos siempre a mi hermana y a mí  
un apoyo ilimitado e incondicional para nuestra formación académica.

A mi hermana Paloma,  
por su disposición constante a ayudarme  
y cuidarme, desde hace muchos años,  
en los momentos más duros.

A los directores de esta tesis doctoral,  
la Dra. Dña. Josefa Mula y el Dr. D. David Peidro,  
por la oportunidad que me brindaron de aprender junto a ellos,  
por su ejemplo y su orientación en mi carrera académica,  
por su inestimable ayuda para la realización de este trabajo.

A Francisco J. Ferriols, por su desinteresada y valiosa ayuda  
en la obtención de datos para la validación de esta tesis doctoral.

A todos los maestros y profesores  
con los que he coincidido a lo largo de mi formación académica.  
Todos ellos han contribuido, en mayor o menor medida,  
a la elaboración de este trabajo y  
especialmente Román Navarro quien me enseñó a pensar  
y despertó en mí la pasión por las ciencias y las matemáticas.

A todos los que siempre han esperado este momento  
con la esperanza de no haberles defraudado  
y la ilusión de demostrar por qué no se equivocaban.

## CONTENIDO

### CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

#### **Parte 1. Estado del arte**

CAPÍTULO II. A REVIEW OF DISCRETE-TIME OPTIMIZATION MODELS FOR TACTICAL PRODUCTION PLANNING

CAPÍTULO III. A REVIEW OF OPTIMIZATION MODELS FOR INTEGRATED PRODUCTION AND ROUTING PLANNING DECISIONS

#### **Parte 2. Planteamiento del modelo analítico MRP IV**

CAPÍTULO IV. PLANTEAMIENTO DEL MODELO ANALÍTICO MRP IV

#### **Parte 3. Aplicación del modelo MRP IV en una cadena de suministro del sector del automóvil**

CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL MODELO MRP IV EN UNA CADENA DE SUMINISTRO DEL SECTOR DEL AUTOMÓVIL

#### **Parte 4. Conclusiones y líneas futuras de investigación**

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN



## CONTENIDO DETALLADO

### CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1. Presentación
2. Objetivo de la tesis
3. Esquema general de la tesis
4. Referencias

### **Parte 1. Estado del arte**

### CAPÍTULO II. A REVIEW OF DISCRETE-TIME OPTIMIZATION MODELS FOR TACTICAL PRODUCTION PLANNING

1. Introduction
2. References collection methodology
3. Classification criteria
  - 3.1. Problem type
  - 3.2. Number of products and number of levels
  - 3.3. Time period
  - 3.4. Nature of demand
  - 3.5. Capacities or resource constraints
  - 3.6. Extensions on:
    - 3.6.1. Demand
    - 3.6.2. Setups
    - 3.6.3. Production times
    - 3.6.4. Multiple and parallel machines
    - 3.6.5. Multi-site
    - 3.6.6. Remanufacturing activities and/or quality issues
  - 3.7. Modeling approach
  - 3.8. Solution approach

- 3.9. Development tool
- 3.10. Application
- 3.11. Limitations
- 3.12. Benefits
- 3.13. Discussion
- 3.14. Conclusions
- 3.15. References

### **CAPÍTULO III. A REVIEW OF OPTIMIZATION MODELS FOR INTEGRATED PRODUCTION AND ROUTING PLANNING DECISIONS**

- 1. Introduction
- 2. References collection methodology
- 3. Production and routing problem description and formulation
- 4. Classification criteria
  - 4.1. Production aspects
  - 4.2. Inventory aspects
  - 4.3. Routing aspects
  - 4.4. Modelling aspects of the objective function structure
  - 4.5. Solution approach
    - 4.5.1. Mathematical programming-based approaches
    - 4.5.2. Lagrangian heuristics
    - 4.5.3. Decomposition heuristics
    - 4.5.4. Metaheuristics
- 5. Discussion and further research directions
  - 5.1. More realistic models
  - 5.2. Consideration of uncertainty
  - 5.3. Focus on inbound vehicle routing
  - 5.4. Globalization and different transport modes

- 5.5. Environmental and social responsible constraints
- 5.6. Better benchmarks
- 6. Conclusions
- 7. References

## **Parte 2. Planteamiento del modelo analítico MRP IV**

### CAPÍTULO IV. PLANTEAMIENTO DEL MODELO ANALÍTICO MRP IV

- 1. Introducción
- 2. Modelos de referencia
  - 2.1. Modelos MRP: el modelo de Mula et al. (2006)
  - 2.2. Modelos de transporte de camión completo: Peidro et al. (2010), Díaz-Madroñero et al. (2012), Díaz-Madroñero et al. (2010) y Díaz-Madroñero et al. (2014)
  - 2.3. Modelos de production routing problem: el modelo de Adulyasak et al. (2014)
  - 2.4. Modelos de inventory routing problem: el modelo de Agra et al. (2013)
  - 2.5. Modelos de rutas milk-run: el modelo de Chuah y Yingling (2005)
  - 2.6. Comparación de los modelos
- 3. Planteamiento del modelo analítico MRP IV
  - 3.1. Descripción del problema
  - 3.2. Formulación del modelo analítico MRP IV
- 4. Conclusiones
- 5. Referencias

## **Parte 3. Aplicación del modelo MRP IV en una cadena de suministro del sector del automóvil**

### CAPÍTULO V. APLICACIÓN DEL MODELO MRP IV EN UNA CADENA DE SUMINISTRO DEL SECTOR DEL AUTOMÓVIL

1. Introducción
2. La cadena de suministro
  - 2.1. La planificación y programación de la producción en fabricantes de automóviles
  - 2.2. Características de los proveedores de la planta de montaje de asientos
  - 2.3. Características de la planta de montaje de asientos
    - 2.3.1. Proceso de planificación de la producción en la planta de montaje de asientos
  - 2.4. Proceso de planificación del transporte de aprovisionamiento en la planta de montaje de asientos
3. Método de evaluación
  - 3.1. Eficiencia computacional
  - 3.2. Costes de planificación
  - 3.3. Indicadores relativos a la planificación del transporte
    - 3.3.1. Total de distancia recorrida
    - 3.3.2. Distancia recorrida por camión
    - 3.3.3. Número de camiones utilizados
    - 3.3.4. Ocupación media de los camiones utilizados por modo de envío
    - 3.3.5. Costes de transporte por unidad de producto final fabricado
4. Experimento computacional piloto
  - 4.1. Datos de partida
  - 4.2. Suposiciones
  - 4.3. Mecanismo de cálculo
  - 4.4. Modelos para la comparación del enfoque de planificación integrado y secuencial en la planta de montaje de asientos
    - 4.4.1. Enfoque de planificación integrado: modelo MRP IV
    - 4.4.2. Enfoque de planificación secuencial: modelo de planificación de producción adaptado de Mula et al. (2006)

- 4.4.3. Enfoque de planificación secuencial: modelo de planificación de transporte mediante camión completo adaptado de Díaz-Madroñero et al. (2012) y Peidro et al. (2010)
- 4.4.4. Enfoque de planificación secuencial: modelo de planificación de transporte mediante rutas
- 4.5. Estructura de los datos de entrada y salida
- 4.6. Evaluación de los resultados
  - 4.6.1. Eficiencia computacional
  - 4.6.2. Costes de planificación
  - 4.6.3. Indicadores relativos a la planificación del transporte
- 5. Conclusiones
- 6. Referencias

#### **Parte 4. Conclusiones y líneas futuras de investigación**

### CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

- 1. Introducción
- 2. Líneas futuras de investigación
- 3. Referencias

#### **Anexos**

ANEXO I. EXTENDED TABLES FROM REVIEW OF DISCRETE-TIME OPTIMIZATION MODELS FOR TACTICAL PRODUCTION PLANNING

ANEXO II. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS EN MPL

ANEXO III. FICHEROS SOLUCIÓN

ANEXO IV. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA RELACIONADA

CAPÍTULO I  
**INTRODUCCIÓN**

---



---

CAPÍTULO I  
INTRODUCCIÓN

---

1. Presentación .....	I-2
2. Objetivo de la tesis .....	I-4
3. Esquema general de la tesis .....	I-5
4. Referencias.....	I-8



## 1. Presentación

En la actualidad, las cadenas de suministro se caracterizan, principalmente, por una gran deslocalización de sus miembros. Esto hace que la planificación de la producción en las empresas industriales ya no pueda considerarse como un proceso independiente y separado de la planificación del transporte y la cadena de suministro. Los sistemas actuales de planificación y control de la producción, tales como MRPII, JIT, OPT y sus variantes, generan planes al margen de las decisiones de la planificación del transporte y la cadena de suministro, lo que ocasiona que de forma secuencial cada etapa vaya adaptándose (si es posible) al plan anterior generado de forma muchas veces sub-óptima para el conjunto global de la cadena de suministro. Todas estas operaciones deben considerarse ahora como un sistema integrado de las decisiones implicadas.

La planificación de requerimientos de materiales o *Material Requirement Planning* (MRP) se basa en la explosión de la lista de materiales mediante la cual, se traduce el plan de producción de un producto final a cantidades e instantes de tiempo necesarios, mediante la consideración de las cantidades disponibles en inventario y los tiempos de suministro de los diferentes componentes o materiales (Orlicky 1975; Vollmann et al. 2005; Hopp y Spearman 2011). El sistema MRP no considera ninguna restricción de capacidad. Este hecho fue considerado como una desventaja y condujo a la evolución hasta el MRP de Bucle Cerrado y a los sistemas MRP II (*Manufacturing Resource Planning*) (Wight 1984). Un sistema MRP II está compuesto de una variedad de funciones entrelazadas: planificación de negocio, ventas y operaciones (planificación de la producción), plan maestro de producción, MRP, planificación de requerimientos de capacidad o CRP (*Capacity Requirement Planning*) y sistemas de apoyo a la ejecución para materiales y capacidad. En la década de los 90, el sistema MRP II evoluciona hacia el sistema MRP III (*Money Resource Planning*) (Schollaert 1994) y los sistemas ERP (Wylie 1990), cuyo objetivo principal fue incorporar todas las funciones de la empresa (finanzas, ventas, producción, etc.) en un único sistema de decisión. Sin embargo, a pesar de las diferentes funcionalidades incorporadas, el elemento principal de los sistemas ERP y MRP II reside todavía en la lógica de los sistemas MRP originales. Posteriormente, los sistemas ERP han evolucionado incorporando las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones. Además, para adaptarse al entorno competitivo actual basado en la gestión de la cadena de suministro los ERP han ido añadiendo otras funciones como la de la gestión de la cadena de suministro y la gestión del transporte, entre otros (Stadtler y Kilger 2008).

En un contexto competitivo como el actual, las organizaciones necesitan que los sistemas MRP optimicen las decisiones de producción. Así pues, según Yenisey (2006), aunque las primeras formulaciones del MRP no estaban asociadas con ningún tipo de optimización, se fueron incorporando gradualmente aspectos tales como

la maximización del beneficio junto a restricciones asociadas al aprovisionamiento, la demanda o las capacidades de los recursos disponibles con la finalidad de optimizar las soluciones asociadas a problemas MRP. Cabe destacar el trabajo de Billington et al. (1983) como una de las contribuciones iniciales en este campo, los cuales proponen un modelo de programación lineal entera mixta considerando restricciones de capacidad asociadas a un sistema MRP multietapa. Otros autores como Escudero y Kamesam (1993); Rota et al. (1997); Clark (2003); Giglio y Minciardi (2003); Yenisey (2006) o Noori et al. (2008) han abordado la problemática asociada a la optimización de sistemas MRP mediante diferentes enfoques de programación matemática en contextos deterministas. Además, en el contexto actual de las cadenas de suministro caracterizado por la deslocalización de sus miembros, la planificación del transporte cobra cada vez más un protagonismo fundamental debido a los importantes costes de transporte y a las restricciones logísticas, pero sobre todo por su impacto en las decisiones de planificación de la producción. Es decir, los módulos de planificación de la producción, basados en sistemas MRP-MRP-II, generan unas decisiones de aprovisionamiento y producción que, generalmente, deben replanificarse (de forma manual) al no tener en cuenta la planificación del transporte para evitar roturas de stock. Hasta el momento, este aspecto ha sido abordado a través de la planificación de los stocks de seguridad (New y Mapes 1984); planificación de los tiempos de suministro o lead times (Yano 1987; Billington et al. 1983; Louly et al. 2008; Louly y Dolgui 2011); y listas de materiales flexibles (Ram et al. 2006).

Coyle et al. (2003) definen el transporte como el enlace físico que conecta los puntos fijos de una cadena de suministro logística. Así pues, los procesos de transporte son partes esenciales de la cadena de suministro que posibilitan el flujo de materiales que conecta a una empresa con sus clientes y proveedores. Por lo tanto, el transporte puede considerarse como un proceso integral clave para contribuir al objetivo global de éxito de la gestión de la cadena de suministro; la planificación y el control del flujo de materiales (Ellram 1991) y el aporte de valor añadido al cliente (Christopher y Towill 2001). La optimización de los procesos de transporte puede llevarse a cabo basada en la teoría de grafos o en la programación matemática. Según Fleischmann (2005), pueden distinguirse dos tipos de procesos de transporte en una cadena de suministro. Por un lado, el aprovisionamiento de materiales desde proveedores externos a centros de fabricación (Higgins 2006; Ertogral 2008; Sarkar y Mohapatra 2008) y, por otro, la distribución de productos desde las fábricas a los clientes (Croxtton et al. 2003; Zheng y Liu 2006; Zhao et al. 2008). En este contexto, la planificación del transporte es responsabilidad del proveedor. Sin embargo, en el transporte de aprovisionamiento, el ensamblador controla en muchas ocasiones el transporte de sus proveedores, correspondiendo el proceso de planificación a la etapa de aprovisionamiento. No obstante, es habitual la falta de integración entre las decisiones relativas a producción y las decisiones relativas al transporte de aprovisionamiento de forma que la planificación táctica y operativa de la producción se

realiza de forma separada y secuencial de la planificación táctica y operativa del transporte de materias primas y componentes desde los proveedores a los centros de fabricación (Mula, Peidro, Díaz-Madroñero & Vicens 2010; Mula, Peidro, Díaz-Madroñero & Hernández 2010).

## 2. Objetivo de la tesis

A partir de la realidad descrita en el punto anterior, la presente tesis tiene como objetivo fundamental la propuesta de un nuevo modelo, denominado MRP IV, que integre en un mismo sistema de decisión la planificación de la producción y el transporte, con las restricciones propias de ésta última, tales como tipos de transporte, modos de recogida (*milk-run*, camión completo, rutas) con la finalidad de evitar la replanificación continua de las decisiones de producción y la consiguiente mejora en costes y en los niveles de servicio al cliente.

Para la validación del modelo propuesto se ha utilizado un caso real. En concreto, una cadena de suministro representativa del sector del automóvil encargada del suministro de asientos para automóviles. El objetivo fundamental es validar el modelo realizado al contrastarlo con la realidad empresarial, aunque siempre bajo la perspectiva de que no se trata de resolver una situación puntual, sino de desarrollar un marco de trabajo general.

Esta tesis se desarrolla dentro del Grupo de Investigación CIGIP (Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción) de la Universitat Politècnica de València, en el marco de los proyectos denominados *Modelos de optimización fuzzy y computación evolutiva y de simulación de los procesos de planificación de la producción y del transporte en una cadena de suministro. Propuesta de planificación colaborativa soportada por sistemas multi-agente. Integración en un sistema de decisión. Aplicaciones* (EVOLUTION) (Ref. DPI2007-65501); *Tecnología de Producción basada en la Realimentación de Decisiones de Planificación de Producción, Transporte y Descargas y el Rediseño de Almacenes en Cadena de Suministro* (REVOLUTION) (Ref. DPI2010-19977) y *Diseño y gestión de operaciones en cadenas globales de suministro* (GLOBOP) (Ref. DPI2012-38061-C02-01), financiados por el Gobierno de España, y los proyectos *Requerimientos de Materiales Cuarta Generación (MRP IV)* (Ref. PAID-05-12) y *Modelos Cuantitativos para el Diseño de Cadenas de Suministro Socialmente Responsables bajo condiciones de Incertidumbre. Aplicación de Estrategias de Solucion basadas en Metaheurísticas Híbridas* (Ref. PAID-06-12), financiados por la Universitat Politècnica de València.

La presente tesis trata de:

- Identificar en el ámbito científico, mediante revisión bibliográfica, los avances y las deficiencias actuales de los modelos de planificación de la

producción y transporte. Para ello se analiza el estado del arte de los modelos de tiempo discreto para la planificación táctica de la producción y los modelos que integran decisiones de planificación de producción junto a decisiones de planificación de rutas de transporte. El estado del arte permite conocer la situación desde la que conceptualmente se ha ido enfocando el problema, y las experiencias existentes en modelado y algorítmica.

- Proponer un modelo conceptual de una nueva tecnología de producción, MRPIV, basada en la integración de las decisiones tácticas y operativas de planificación de la producción y el transporte en la cadena de suministro que incorpore los nuevos requerimientos detectados para mejorar las deficiencias identificadas.
- Definir un modelo analítico de programación matemática necesario para desarrollar la propuesta conceptual de MRPIV y que integre los objetivos y restricciones definidos anteriormente.
- Definir una arquitectura para la implementación y resolución de los modelos propuestos.
- Aplicar y validar el modelo MRP IV en una empresa industrial del sector del automóvil
- Evaluar, a partir de la definición de un método de evaluación, el comportamiento del modelo propuesto MRP IV respecto a otras metodologías para la planificación de la producción y el transporte.
- Plantear nuevas líneas de trabajo e investigación.

### **3. Esquema general de la tesis**

Esta tesis se ha dividido en cuatro partes:

#### **Parte 1. Estado del arte.**

El capítulo II establece una revisión bibliográfica sobre modelos de optimización para la planificación táctica de la producción. Para ello, se propone una taxonomía basada en criterios de clasificación anteriormente propuestos por Quadt y Kuhn (2008) y Mula, Peidro, Díaz-Madroñero y Vicens (2010).

El capítulo III presenta el estado del arte sobre modelos de programación matemática que integran decisiones de planificación de producción conjuntamente con decisiones de planificación de rutas de transporte. El objetivo de este capítulo es identificar tendencias actuales y líneas futuras de investigación en este campo y proponer

diferentes criterios de clasificación basados en aspectos de producción, inventario, rutas, modelado de la función objetivo y enfoque de solución.

## **Parte 2. Planteamiento del modelo analítico MRP IV.**

En el capítulo IV, se analizan detalladamente una serie de modelos de programación matemática para resolver problemas de planificación de la producción en entornos MRP, planificación de transporte mediante camión completo, planificación integrada de producción y rutas de distribución, planificación de rutas de transporte repetitivas o *milk-run*. Estos modelos sirven como referencia para la posterior propuesta de los modelos conceptual y analítico MRP IV que integran decisiones de planificación de producción y transporte de aprovisionamiento.

## **Parte 3. Aplicación del modelo MRP IV en una cadena de suministro del sector del automóvil.**

En el capítulo V, se realiza una aproximación a la realidad industrial de la cadena de suministro en la que se aplica el modelo MRP IV. En primer lugar, se describe, de forma general, las características de los proveedores y el proceso de planificación de producción y transporte en la planta de montaje de asientos en la que aplicará MRP IV. A continuación, se muestra la experiencia computacional realizada que ha permitido evaluar el funcionamiento de MRP IV. Se muestran los resultados obtenidos de la experiencia computacional según los siguientes criterios: eficiencia computacional, costes de planificación e indicadores relativos a la planificación del transporte como, por ejemplo, distancia total recorrida, distancia media recorrida por camión, número de camiones utilizados, ocupación media de los camiones utilizados por cada modo de envío y costes de transporte por unidad de producto final fabricado.

## **Parte 4. Conclusiones y futuras líneas de investigación.**

En el capítulo VI se recogen las conclusiones principales y líneas futuras de investigación, que han surgido a partir de este trabajo.

Se cierra la tesis con el conjunto de la bibliografía utilizada y con los anexos relativos a las tablas detalladas de la primera revisión bibliográfica, los modelos desarrollados y a los experimentos realizados para comprobar la bondad de los modelos propuestos a lo largo de la misma.

En la Figura I-1 se recoge de forma resumida el esquema general de la tesis.

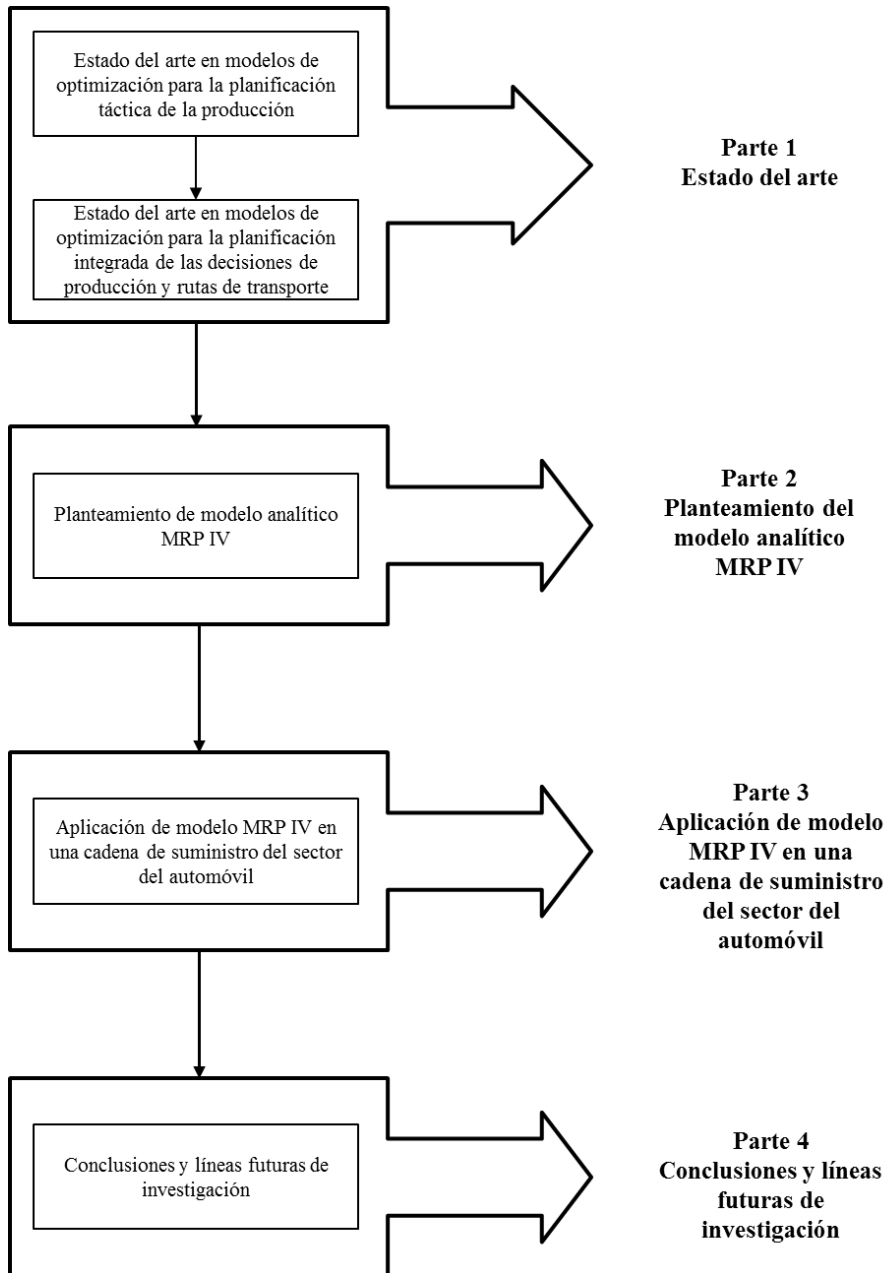


Figura I-1. Esquema general de la tesis

## 4. Referencias

- Billington, P.J., McClain, J.O. & Thomas, L.J., 1983. Mathematical Programming Approaches to Capacity-Constrained MRP Systems: Review, Formulation and Problem Reduction. *Management Science*, 29(10), pp.1126–1141.
- Christopher, M. & Towill, D., 2001. An integrated model for the design of agile supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 31, pp.235–246.
- Clark, A.R., 2003. Optimization approximations for capacity constrained material requirements planning. *International Journal of Production Economics*, 84(2), pp.115–131.
- Coyle, J.J., Bardi, E.J. & Langley, C.J., 2003. *The Management of Business Logistics: A Supply Chain Perspective*, South-Western/Thomson Learning.
- Croxtan, K.L., Gendron, B. & Magnanti, T.L., 2003. Models and Methods for Merge-in-Transit Operations. *Transportation Science*, 37, pp.1–22.
- Ellram, L.M., 1991. Supply-Chain Management: The Industrial Organisation Perspective. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 21, pp.13–22.
- Ertogral, K., 2008. Multi-item single source ordering problem with transportation cost: A Lagrangian decomposition approach. *European Journal of Operational Research*, 191(1), pp.156–165.
- Escudero, L.F. & Kamesam, P. V., 1993. MRP modelling via scenarios. *Optimization in Industry*, pp.101–111.
- Fleischmann, B., 2005. Distribution and Transport Planning. In H. Stadler & C. Kilger, eds. *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 229–244.
- Giglio, D. & Minciardi, R., 2003. Modelling and optimization of multi-site production systems in supply chain networks. In *SMC '03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 5-8 Oct. 2003*. pp. 2678–2683.

- Higgins, A., 2006. Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: A case study at an Australian sugar mill. *European Journal of Operational Research*, 170, pp.987–1000.
- Hopp, W.J. & Spearman, M.L., 2011. *Factory physics*, Waveland Press.
- Louly, M.-A. & Dolgui, A., 2011. Optimal time phasing and periodicity for MRP with {POQ} policy. *International Journal of Production Economics*, 131(1), pp.76–86.
- Louly, M.A., Dolgui, A. & Hnaien, F., 2008. Optimal supply planning in MRP environments for assembly systems with random component procurement times. *International Journal of Production Research*, 46(19), pp.5441–5467.
- Mula, J., Peidro, D., Díaz-Madroñero, M. & Vicens, E., 2010. Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204(3), pp.377–390.
- Mula, J., Peidro, D., Díaz-Madroñero, M. & Hernández, J.E., 2010. Modelos para la planificación centralizada de la producción y el transporte en la cadena de suministro: una revisión. *Innovar. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, 20(37), pp.179–194.
- New, C. & Mapes, J., 1984. MRP with high uncertain yield losses. *Journal of Operations Management*, 4(4), pp.315–330.
- Noori, S. et al., 2008. Optimization of material requirement planning by fuzzy multi-objective linear programming. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(7), pp.887–900.
- Orlicky, J., 1975. *Material Requirements Planning*, New York: McGraw-Hill.
- Quadt, D. & Kuhn, H., 2008. Capacitated lot-sizing with extensions: a review. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, 6(1), pp.61–83.
- Ram, B., Naghshineh-Pour, M.R. & Yu, X., 2006. Material requirements planning with flexible bills-of-material. *International journal of production research*, 44(2), pp.399–415.
- Rota, K., Thierry, C. & Bel, G., 1997. Capacity-constrained MRP system: A mathematical programming model integrating firm orders, forecasts and suppliers. *Université Toulouse {II} Le Mirail. Département {d'Automatique}*.



- Sarkar, A. & Mohapatra, P.K.J., 2008. Maximum utilization of vehicle capacity: A case of MRO items. *Computers and Industrial Engineering*, 54, pp.185–201.
- Schollaert, F., 1994. *Money resource planning, MRP-III: the ultimate marriage between business logistics and financial management information systems*, Library Albert.
- Stadtler, H. & Kilger, C., 2008. *Supply chain management and advanced planning: concepts, models, software and case studies*, Springer, Berlin.
- Vollmann, T.E. et al., 2005. *Manufacturing planning and control for supply chain management*, McGraw-Hill/Irwin New York.
- Wight, O., 1984. *Manufacturing resource planning: MRP II: unlocking America's productivity potential*, John Wiley & Sons.
- Wylie, L., 1990. ERP: A vision of the next-generation MRP {II}. *Computer Integrated Manufacturing*, 300(339.2), pp.1–5.
- Yano, C.A., 1987. Setting Planned Leadtimes in Serial Production Systems with Tardiness Costs. *Management Science*, 33, pp.95–106.
- Yenisey, M.M., 2006. A flow-network approach for equilibrium of material requirements planning. *International journal of production economics*, 102(2), pp.317–332.
- Zhao, Q.-H., Chen, S. & Zang, C.-X., 2008. Model and algorithm for inventory/routing decision in a three-echelon logistics system. *European Journal of Operational Research*, 191(3), pp.623–635.
- Zheng, Y. & Liu, B., 2006. Fuzzy vehicle routing model with credibility measure and its hybrid intelligent algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 176, pp.673–683.

CAPÍTULO II

**A REVIEW OF DISCRETE-TIME OPTIMIZATION MODELS  
FOR TACTICAL PRODUCTION PLANNING**

---



Este capítulo ha sido publicado en la revista *International Journal of Production Research*, con el título “A review of discrete-time optimization models for tactical production planning”, en el volumen 52(17), páginas 5171–5205, siendo sus autores Manuel Díaz-Madroñero, Josefa Mula y David Peidro.



---

## CAPÍTULO II

### A REVIEW OF DISCRETE-TIME OPTIMIZATION MODELS FOR TACTICAL PRODUCTION PLANNING

---

1	Introduction.....	II-2
2	References collection methodology .....	II-3
3	Classification criteria .....	II-4
3.1	Problem type.....	II-6
3.2	Number of products and number of levels .....	II-7
3.3	Time period .....	II-8
3.4	Nature of demand .....	II-8
3.5	Capacities or resource constraints .....	II-9
3.6	Extensions on: .....	II-10
3.6.1	Demand .....	II-10
3.6.2	Setups .....	II-12
3.6.3	Production times.....	II-13
3.6.4	Multiple and parallel machines .....	II-14
3.6.5	Multi-site .....	II-15
3.6.6	Remanufacturing activities and/or quality issues .....	II-16
3.7	Modeling approach.....	II-18
3.8	Solution approach.....	II-21
3.9	Development tool .....	II-26
3.10	Application .....	II-29
3.11	Limitations.....	II-32
3.12	Benefits.....	II-36
4	Discussion.....	II-37
5	Conclusions.....	II-40
6	References.....	II-41

## **1 Introduction**

Production planning is related to managing the productive resources required to perform transformation from raw materials to final products to satisfy customers in the most efficient way (Pochet, 2001). The production planning problem can be decomposed according to the time horizons considered. Several authors, such as Anthony (1965), Salomon et al. (1991), McDonald and Karimi (1997), Min and Zhou (2002) and Gupta and Maranas (1999, 2003), among others, classify production planning problems into strategic, tactical and operational problems. Strategic planning models affect design and configuration over a time between 5 and 10 years. Tactical planning models attempt to adopt the most optimum use of the available resources by determining materials flow, inventory levels, capacity utilization, the amounts to produce and maintenance activities, with a planning horizon from one or several months to 2 years. Tactical planning assumes that the system design and configuration is given. Operational planning models are related to the detailed scheduling definition, sequencing, lot sizes, assigning loads and vehicle routes, etc. Operational models use time periods which last between one and two weeks.

Although the scientific literature based on the tactical production planning concept is vast, the main motivation of this paper is to collect, classify and overview scientific articles from the last years. Other similar reviews do not address this time window, but other previous reviews on lot-sizing models (Brahimi et al., 2006b; Buschkühl et al., 2010; Comelli et al., 2008; Karimi et al., 2003; Quadt and Kuhn, 2008), production planning models under uncertainty (Aloulou et al. 2013; Dolgui & Prodhon 2007; Dolgui et al. 2013; Grosfeld-Nir and Gerchak 2004; Koh et al. 2002; Mula et al. 2006, Yang et al. 2007), supply chain planning models under uncertainty (Ko et al. 2010; Peidro et al., 2009) and mathematical programming models for supply chain production and transport planning (Mula et al., 2010a) do.

Papers were selected based to be included in this survey on the following main criteria: (i) mathematical programming models or quantitative approaches; (ii) tactical problems; (iii) discrete-time models. We briefly describe each paper, but we do not describe or formulate the models considered in detail. This work intends to provide the reader with a starting point to investigate the literature on optimization models for tactical production planning problems. The main contributions of this paper are to (i) review the literature; (ii) classify the literature based on the problem type, aim, number of products, time period, nature of demand, capacities constraints, extensions, modeling approach, solution approach, development tool, application, limitations and benefits; (iii) identify current trends and future research directions.

The remainder of the paper consists of four other sections. The next section introduces the review methodology. Section 3 describes the classification criteria of the reviewed papers. Section 4 presents the limitations and discussion of the present study. Finally, the last section provides the conclusions and directions for future research.

## 2 References collection methodology

The search for published production planning articles was performed using the *Web of Knowledge* platform from January 2006. The following search criteria were applied to the topic field of this web search engine: *lot sizing, production planning, tactical planning, master planning, operations planning, supply chain planning, material requirement planning, manufacturing resource planning, aggregate planning, hierarchical production planning, procurement planning, replenishment planning*. From the references obtained, and after performing a reviewing process of the abstracts, approximately 600 references were selected. An additional filter, based on the journal in which each reference is published, was applied to this group. Barman et al.'s (2001) ranking was considered, which is a collection of internationally recognized production and operations research and management journals, and it was previously applied in the works of Chaudhry and Luo (2005) and Wong and Lai (2011). Barman et al.'s (2001) ranking was also completed with those journals rated at the 3rd and 4th levels from the ABS Academic Journal Quality Guide in the *Operations, Technology and Management*, and *Operations Research and Management Science* subjects. It is important to highlight that we are focused on tactical planning optimization models, thus a new group of 342 references was formed, from which those articles which focus only on strategic planning approaches (e.g., supply chain design, plant location, among others), operational decision level applications (e.g., production scheduling), non quantitative approaches, continuous-time or non discrete models and non optimization models were excluded. Having completed this process, 250 references were reviewed (Table II-II-1).

As shown in Table II-1, one group of three journals represented 56.40% of the references included in this work, these being: *International Journal of Production Research* (50 references), *European Journal of Operational Research* (47 references) and *International Journal of Production Economics* (44 references). They were followed by *Computers & Operations Research* (24 references) and *Computers & Industrial Engineering* (15 references), which together account for the 15.60% of the reviewed papers. The remaining 15 journals published 28.00% of the total considered references.



**Table II-1.** Distribution of references according to journals

ABS ranking	Bartman et al's (2001) ranking	Journal	References	% of total
X	X	International Journal of Production Re-	50	20.00%
X	X	European Journal of Operational Research	47	18.80%
X	X	International Journal of Production Eco-	44	17.60%
	X	Computers & Operations Research	24	9.60%
	X	Computers & Industrial Engineering	15	6.00%
X	X	Journal of the Operational Research Society	11	4.40%
X		Production Planning & Control	11	4.40%
X	X	Operations Research	10	4.00%
X		Mathematical Programming	7	2.80%
	X	IIE Transactions	6	2.40%
X		OR Spectrum	6	2.40%
X	X	Naval Research Logistics	5	2.00%
X		Journal of Scheduling	4	1.60%
		Journal of Intelligent Manufacturing	2	0.80%
X	X	Production and Operations Management	2	0.80%
	X	Interfaces	2	0.80%
X	X	Management Science	1	0.40%
		Supply Chain Management - An Interna-	1	0.40%
X		IEEE Transactions on Engineering Man-	1	0.40%
X		Mathematics of Operations Research	1	0.40%
		TOTAL	250	100.00

### 3 Classification criteria

Karimi et al. (2003) present a review of models and algorithms for capacitated lot sizing problems. According to these authors, modeling and complexity of lot sizing decisions depend on the following characteristics: planning horizon and time period, number of levels in the product structure, number of products, nature of demand, capacity or resource constraints, setup structure and inventory shortages. Quadt and Kuhn (2008) survey capacitated lot sizing problems by taking into account different extensions, such as backorders, setup carry-overs, sequence-dependent setups and parallel machines. These authors also contemplate the inclusion of setup times, multi-level product structures and overtime. Accordingly, we propose a new classification scheme with two broader categories which we call setup and demand extensions and additional extensions. In relation to setup extensions, we consider setup times and complex setup issues such as setup carry-overs, sequence-dependent setups and family setups. On the other hand, demand extensions include backlogged demand, lost sales, price-dependent demand, product substitution and time windows. Additional extensions relating to production times

(overtime, undertime, subcontracting time), parallel machines and multisite, remanufacturing and quality are also contemplated. Moreover, in order to provide a better understanding of the reviewed papers, we extend these classification criteria by adding the following categories: problem type, modeling approach, solution method, development tool, application, benefits and limitations.

All the classification criteria are described as follows:

1. *Problem type*. This is the production planning area addressed by each article.
2. *Number of products* and *number of levels*. It refers to the number of manufactured products considered in each model and their product structures; e.g., single-item or multi-item and single-level or multi-level, respectively.
3. *Time period*. The planning horizon is the time interval in which the production planning problem extends into the future. The planning horizon is divided into periods in discrete-time models.
4. *Nature of demand*. This consists in analyzing demand depending on its evolution over the planning horizon (e.g., static or dynamic) and if it is known (deterministic) or uncertain (modeled as stochastic, fuzzy, robust, etc.).
5. *Capacities or resource constraints*. It refers to the capacities of the available resources in the production system.
6. *Extensions on:*
  1. *Demand*. If backlogging, shortages or lost sales, price-dependent demand, product substitutions or time windows are addressed.
  2. *Setups*. The consideration of setup times and other characteristics relating to complex setup structures, such as sequence-dependent setups, setup carry-overs and family setup are identified.
  3. *Production times*. This consists in non regular times related to productive resources (e.g., overtime, undertime, subcontracting times).
  4. *Multiple and parallel machines*. If several machines exist in the production environment.
  5. *Multisite*. It refers to the structure of the supply chain or production system, and its members.
  6. *Remanufacturing activities and/or quality issues* related to the considered manufactured products
7. *Modeling approach*. It consists in the type of representation, in this case, relationship mathematics, and the aspects to be considered in the production system
8. *Solution approach*. These are mathematical methods and solution algorithms developed to solve the proposed models, such as exact algorithms, relaxation heuristics, metaheuristics and problem-specific heuristics.
9. *Development tool*. This refers to the commercial or non commercial software tools needed to implement and solve the proposed models.

10. *Application*. This presents the application that each model considers in terms of supporting numerical experiments or practical studies in real production contexts.
11. *Benefits*. They establish the main characteristics of each model that outperform the rest of the scientific literature.
12. *Limitations*. They identify those characteristics which limit the model from being applied to certain environments.

### 3.1 Problem type

This work, based on Mula et al. (2006), contemplates five production planning areas: Master Production Schedule (MPS) (O'Grady, 1982; Sridharan et al., 1987); Material Requirement Planning and Manufacturing Resources Planning (MRP) (Adams and Cox, 1985; Karni, 1981; Roberts and Barrar, 1992; Shorrock and Orlicky, 1978); Supply Chain Planning (SCP) (Cowdrick, 1995; Gupta et al., 2000); Aggregate Production Planning (APP) (Hax, 1975; Masud and Hwang, 1980); Hierarchical Production Planning (HPP) (Bitran et al., 1981; Hax and Meal, 1973). The MPS establishes an optimal production plan which meets customers' orders, and provides release dates and amounts of final products to manufacture by minimizing production, holding and set up costs.

Typically, components production planning is dealt with by the MRP using bill of materials (BOM) and the results obtained by MPS calculations. The MPS and MRP are considered mono-site problems. However, given the increase of integration and coordination among suppliers, manufacturers and distributors, multi-site production planning or SCP has become a very important issue in recent decades. Besides, the distinction of different planning levels based on the time period and the amount of detail in the plans is known as HPP, which decomposes the global production planning problem into a number of subproblems that correspond to different levels of a hierarchy of plans. These subproblems can be solved in sequence so that at each level a solution imposes restrictions on the lower level problem. Lastly, the APP approach determines production, inventory and work force levels to meet fluctuating demand requirements over a planning horizon based on the existence of an aggregate item in terms of weight, volume, manufacturing time or economic value.

Of the reviewed works, 142 of them address MPS problems, followed by a group of 47 references which deal with SCP and 39 references which consider MRP problems. APP and HPP are tackled by only 15 and 7 references, respectively (Table II-2).

**Table II-2.** Problem type of the reviewed works

Problem type	References
MPS	142
SCP	47
MRP	39
APP	15
HPP	7

### 3.2 Number of products and number of levels

The complexity of not only the production planning problem, but also its modeling, may be influenced by the number of items manufactured in the production system. In terms of number of products, we consider single-item models, in which production is planned for only a single final product, and also multi-item models which provide the production planning of several items, which may be end products, parts or components. Among the papers analyzed, 71 references address production planning for a single product, while the remaining 172 correspond to multi-item models.

Another important characteristic that can affect the complexity of production planning problems is products structure and its number of levels. In this work, we contemplate the mono-level and multi-level product structures. The former corresponds to production systems where only final products are manufactured according to the demand obtained directly from customer orders or market forecasts. In multi-level production planning models, BOM establishes a parent-component relationship among the items and define the number of levels in the product structure. Of the 177 references addressing production planning for multiple items, 106 references correspond to final products and 71 references consider multi-level product structures. This latter group of papers corresponds not only to MRP models, but also to SCP (27 references), APP (Jayaraman, 2006; Leung and Ng, 2007a, 2007b; Leung et al., 2007a) and HPP (Aghezzaf et al., 2011; Timm and Blecken, 2011). Table II-3 summarizes the works reviewed in terms of number of products and number of levels.

**Table II-3.** Number of products and number of levels in the product structure

Number of products	References	Number of levels	References	Problem type	References
Single-item	73				
		Mono-level	106		
Multi-item	177			MRP	38
		Multi-level	71	SCP	27
				APP	4
				HPP	2

### 3.3 Time period

In terms of the time period terminology, multi-item production planning problems fall into the big or small bucket problems categories (Karimi et al., 2003). In small bucket models, only one type of item can be manufactured, or at most one item can be set up per period, while the time period is long enough to produce multiple items in big bucket models. Table II-4 presents the time period and the product structure details of the references addressing multi-product planning problems. Among the 177 references considered which address multi-item production planning, 169 references correspond to big bucket models, 6 papers present small bucket models (Bjork and Carlsson, 2007; Gicquel et al., 2009; Kaczmarczyk, 2011; Kucukyavuz and Pochet, 2009; Lukac et al., 2008; Stadler, 2011) and 2 references propose both small bucket and big bucket models (Transchel et al., 2011; Van Vyve and Wolsey, 2006). Moreover, among the 169 papers presenting big bucket models, 99 address mono-level production planning problems, while the 70 remaining ones consider multi-level production systems. With regard to small bucket models, only Stadler (2011) deals with multi-level planning problems, while those references which present both small bucket and big bucket models (Transchel et al., 2011; Van Vyve and Wolsey, 2006) only consider mono-level product structures.

**Table II-4.** Time period and number of levels in the product structure

Time period	Number of levels	References
Big-bucket	Mono-level	99
	Multi-level	70
Small-bucket	Mono-level	5
	Multi-level	1
Small-bucket and big-bucket	Mono-level	2

### 3.4 Nature of demand

Demand acts as a typical parameter of production planning models and its nature can affect their complexity. If demand levels are known exactly, demand is called deterministic. Yet if demand is not known, it can be termed uncertain. In production planning models, uncertainty is modeled by using probability distributions, fuzzy sets, stochastic approaches based on stochastic values, or several scenarios and robust approaches.

Of the references considering dynamic demand, a group of 10 papers model demand levels in accordance with selling prices (Deng and Yano, 2006; Geunes et al., 2006; Gonzalez-Ramirez et al., 2011; Guan and Philpott, 2011; Haugen et al., 2007; Huh et al., 2010; Merzifonluoglu et al., 2007; Onal and Romeijn, 2010; Smith and

Martinez-Flores, 2007; van den Heuvel and Wagelmans, 2006). On the other hand, 207 references consider deterministic demand and 37 uncertain demand levels. Moreover, 6 articles propose models for both deterministic and uncertain demand patterns (Aghezzaf et al., 2011, 2010; Feng et al., 2011; Ferguson et al., 2009; Grubbstrom and Huynh, 2006b, Naeem et al., 2013). Demand uncertainty is modeled mainly by stochastic approaches (31 references), and less commonly by fuzzy approaches (Chen and Huang, 2010; Lan et al., 2011; Liang, 2007; Mula et al., 2010b, 2008; Peidro et al., 2010; Petrovic and Akoz, 2008; Torabi and Hassini, 2009; Zhang et al., 2011), robust approaches with intervals (Wei et al., 2011), probability distributions (Shi et al., 2011) and by adding noise to forecasted demand values (Genin et al., 2008). Table II-5 classifies the references reviewed according to the nature of demand and the uncertainty approaches considered.

**Table II-5.** Nature of demand and the uncertainty approaches considered

Nature of demand	References	Uncertainty approaches	References
Deterministic	207		
Uncertain	37	Stochastic	31
		Fuzzy	9
		Robust with intervals	1
Deterministic + uncertain	6	Probability distributions	1
		Noise added	1

### 3.5 Capacities or resource constraints

A production system can be characterized by restrictions imposed by the available resources. Capacity constraints may increase the complexity of the production planning models and their resolution, but enable more realistic models. However, a group of 43 references presents uncapacitated models with no capacity constraint. In this work, we identify the constraints related to inventory limitations (48 references), supply of parts and raw materials from suppliers (24 references), productive resources such as machines and workforce (194 references) and transportation resources (21 references). Such constraints may be included in the models in isolation or in combination with others. In this sense, some of these constraints can be included in more than one capacity constraints class. For example, a model may have only production capacity constraints, while another might also include limitations related to inventory capacity constraints and/or supply from suppliers.

Table II-6 shows the different combinations associated with each capacity constraint class. Most of the analyzed papers (143 references) present only capacity constraints related to productive resources. Furthermore, the combination of production capacity constraints with inventory constraints, and production capacity

constraints with inventory constraints and supply constraints, are the other most common combinations, with 19 and 10 references, respectively. A group of 7 references (Gutierrez et al., 2008; Li et al., 2009a; Liu and Tu, 2008a; Liu et al., 2007; Mocquillon et al., 2011; Naeem et al., 2013; Pal et al., 2011) presents inventory constraints in isolation, while another group of 6 references (Akbalik and Penz, 2011; Baptiste et al., 2008; Rizk et al., 2008, 2006a; Wu et al., 2010; Zhang et al., 2011) addresses the production planning problem by taking into account the production and transport resources constraints. Boudia et al. (2008), Jung et al. (2008), Almeder et al. (2009), Bard and Nananukul (2009) and Armentano et al. (2011) consider inventory, productive and transport resources constraints simultaneously, while a group of 5 references (Demirli and Yimer, 2008; Feng et al., 2010, 2008; Gunnarsson and Ronnqvist, 2008; Peidro et al., 2010) adds supply constraints to the latter combination. The remaining combinations of capacity and resource constraints appear in 4 references or less each.

**Table II-6.** Combinations of capacity constraints classes

Capacity constraints classes	Combinations	References
	Inventory (in isolation)	7
	Supply (in isolation)	2
Inventory (48 references)	Productive resources (in isolation)	143
	Transport resources (in isolation)	1
Supply (24 references)	Inventory + Productive resources	19
	Inventory + Transport resources	1
	Inventory + Supply + Productive resources	10
Productive resources (194 references)	Inventory + Supply + Transport resources	1
	Inventory + Productive resources + Transport resources	5
Transport resources (21 references)	Inventory + Supply + Productive resources + Transport resources	5
	Supply + Productive resources	4
	Supply + Productive resources + Transport resources	2
	Productive resources + Transport resources	6

### 3.6 Extensions on:

#### 3.6.1 Demand

In order to obtain production planning models that come closer to reality, in addition to considering price-dependent demand levels, several extensions related to demand are identified. For instance, the ability to meet demand through product substitution, the existence of time windows, the option of backlogs to meet demand in following periods, and modeling lost sales if demand cannot be met during the corresponding period or during the subsequent one. Table II-7 presents the different

extensions related to demand considered in this work. Among the reviewed references, 80 papers address the possibility of backlogging, while 30 present modeling lost sales.

There is a group of 12 papers that considers product substitutions with several approaches. A group of 4 references addresses component and subassembly substitutions by using flexible BOM (Ram et al., 2006), flexible production sequences (Begnaud et al., 2009) and alternative BOM (Lin et al., 2009; Wu et al., 2010). Substitutions for remanufactured products are considered in Li et al. (2006), Schulz (2011), Wei et al. (2011), Naeem et al. (2013) and Fazle Baki (2014), while Li et al. (2007) allow substitutions for both remanufactured products or new products with better characteristics. Conversely, Pineyro and Viera (2010) model the demand substitution of remanufactured products for new ones, and Taskin and Uenal (2009) deal with substitutions in float glass industry by using lower quality products, but with the same size and thickness as the substituted product. Lastly, Lang and Domschke (2010) and Lang and Shen (2011) use the demand classes concept to incorporate substitution options into their proposed models.

Pricing decisions, hence price-dependent demand levels, are addressed by a group of 10 references (Deng and Yano, 2006; Geunes et al., 2006; Gonzalez-Ramirez et al., 2011; Guan and Philpott, 2011; Haugen et al., 2007; Huh et al., 2010; Merzifonluoglu et al., 2007; Onal and Romeijn, 2010; Smith and Martinez-Flores, 2007; van den Heuvel and Wagelmans, 2006). Moreover, the time window notion is obtained if demands levels are considered between a release (availability) date and a due date. Of the reviewed works, 7 references propose time window models. According to Brahim et al. (2010), it is possible to distinguish between production time windows and demand time windows. A production time window is defined by subinterval  $[s, t]$  of time horizon  $[J, n]$ , whereas demand quantity  $d_{st}$  is to be produced in interval  $[s, t]$  and delivered to the client during period  $t$ . Conversely in a demand time window (Lee et al., 2001), delivery to the client can take place during any period in interval  $[s, t]$ . A group of 5 references (Absi et al., 2011; Bilgen and Guenther, 2010; Brahim et al., 2010, 2006; Hwang, 2007) considers production time windows, while Hwang and Jaruphongsa (2008) and Akbalik and Penz (2011) propose production planning models with demand time windows. Moreover, one of the reviewed papers (Wolsey, 2006) presents models with production and time windows separately.



**Table II-7.** Extensions on demand

Demand extensions	References
Backlogs	80
Lost sales	30
Substitution	14
Price-dependent levels	10
Time windows	7

### 3.6.2 Setups

Generally, setup activities are included in production planning models by considering the setup costs and/or setup times which model the production changeovers between different products. The inclusion of setup times involves reducing the production capacity available per period and increases the models' complexity because they are usually modeled by introducing zero-one variables. Moreover according to Karimi et al. (2003), three other setup types of complex setups can be contemplated: setup carry-overs; sequence-dependent setups; family setups. A setup carry-over implies that the last product per period may be produced without an additional setup during the subsequent period. The inclusion of setup carry-overs reduces the setup times needed as compared to standard production planning models, which use a setup for each product produced per period. If setup parameters depend on the production sequence, then another extension relating to scheduling decisions made on production resources can be considered. The third type of complex setup structure corresponds to family setups, caused by similarities in manufacturing process.

Table II-8 provides details of the number of references dealing with the considered setup extensions. Of the reviewed works, 70 include setup times, 26 consider sequence-dependent setups, and only 14 (Almada-Lobo and James, 2010; Almada-Lobo et al., 2008, 2007; Clark et al., 2010; Karimi et al., 2006; Lang and Shen, 2011; Ozturk and Ornek, 2010; Quadt and Kuhn, 2009; Sahling et al., 2009; Santos et al., 2010; Tempelmeier and Buschkuehl, 2009, 2008) and 9 references (Anily et al., 2009; Clark et al., 2010; Federgruen et al., 2007; Goren et al., 2012; Mohan et al., 2012; Mula et al., 2010b; Omar and Teo, 2007; Pastor et al., 2009; Tempelmeier and Buschkuehl, 2008; Toso et al., 2009; Xue et al., 2011) present setup carry-overs and family setups. Omar and Teo (2007), Pastor et al. (2009) and Bilgen and Guenther (2010) tackle different production planning problems with product family setup times. However, Suerie (2006) and Stadler (2011) represent long setup times in relation to the planning period length by modeling overlapping setup times, which are typical in process industries. Moreover, Menezes et al. (2011) incorporate sequence-dependent and period-overlapping setup times. Of the 26 references addressing scheduling decisions, 19 present sequence-dependent setup times related to products, while a group of 3 references (Clark et al., 2010; Toso et al., 2009; Xue et al., 2011) includes sequence-dependent setup times which focus on family products.

Bjork and Carlsson (2007), Karabuk (2008) and Gicquel et al. (2009) consider sequence-dependent setups by modeling the corresponding costs in the objective function.

**Table II-8.** Extensions on setups

Setup extensions	References
Setup times	70
Setup sequence-dependent	26
Setup carry-over	14
Family setup	9

### 3.6.3 Production times

In order to adjust the capacity usage level of productive resources, production planning models include overtime, subcontracting and undertime decisions. If during a period production capacity is less than customer demand, the decision maker may choose to produce in overtime or to outsource part of the production to meet demand without backlogs. If, however, production capacity is higher than demand, production resources may be idle for some time, which can be modeled with undertime variables. Of the reviewed works, 35 references consider overtime decisions, 19 include the possibility of subcontracting production, and only 4 references (Fandel and Stammen-Hegene, 2006; Lusa et al., 2009; Mula et al., 2008; Peidro et al., 2010) contemplate modeling idle time. Moreover, we identify that overtime and subcontracting decisions can be modeled for either the extra time or the amounts of products needed to meet customer demand. With regard to overtime decisions, 21 references opt to represent the time needed to complete the production of customers' orders in non-regular time, while 14 references model the amounts of products to manufacture in extra time. Besides, all the references that consider outsourcing decisions model them in terms of the amounts of products to manufacture by subcontractors.

Table II-9 shows the different combinations associated with extensions on production times. Most of these works present only overtime (23 references) or subcontracting (10 references) decisions in isolation. Moreover, the combination of overtime and subcontracting production is addressed by 10 references (Erromdhani et al., 2012; Galasso et al., 2009; Jamalnia and Soukhakian, 2009; Leung et al., 2006; Liang, 2007; Merzifonluoglu et al., 2007; Mirzapour Al-e-hashem et al., 2011; Pastor et al., 2009; Timm and Blecken, 2011; Xue et al., 2011). Mula et al. (2008), Lusa et al. (2009) and Peidro et al. (2010) propose the simultaneous modeling of overtime and undertime decisions, while only Fandel and Stammen-Hegene (2006) consider undertime decisions in isolation.

**Table II-9.** Combinations of extensions on production times

<b>Production time extensions</b>	<b>Combinations</b>	<b>References</b>
Overtime (36 references)	Overtime (in isolation)	23
Undertime (4 references)	Undertime (in isolation)	1
Subcontracting (20 references)	Subcontracting (in isolation)	10
	Overtime + undertime	3
	Overtime + subcontracting	10

### 3.6.4 *Multiple and parallel machines*

According to Quadt and Kuhn (2008), standard production planning models can represent the existence of parallel machines by augmenting the production variables and the capacity parameters by an additional index indicating the individual machines. However, there is an alternative way of modeling parallel machines without including the additional index in the production variables. Of all the reviewed works, 34 references consider the production planning problem with multiple parallel machines. Seventeen references model parallel production systems following the approach by Quadt and Kuhn (2007), whereas 12 papers opt for the alternative formulation. Moreover, 3 references (Kaczmarczyk, 2011; Omar and Teo, 2007; Quadt and Kuhn, 2009) consider production environments with parallel identical machines (where the task's processing time is independent of the machine where it is processed). Finally, 2 references (Jozefowska and Zimniak, 2008; Mateus et al., 2010) deal with production planning problems with parallel unrelated machines (with no particular relationship between the processing times in the different machines).

We also review other approaches related to production systems with multiple machines, such as modeling multistage systems (Aghezzaf et al., 2010; Asmundsson et al., 2009; Li et al., 2006a; Rong et al., 2006; Selcuk et al., 2006; Stadtler and Sahling, 2012; Van den broecke et al., 2008), production lines (Baptiste et al., 2008; Christou and Ponis, 2009; Christou et al., 2007; Ferreira et al., 2009; Mehrotra et al., 2011; Taskin and Uenal, 2009) and groups of identical machines (Albey and Bilge, 2011). Table II-10 summarizes the different approaches related to multiple and parallel machines extensions.

**Table II-10.** Multiple and parallel machines extensions

Multiple and parallel machines extensions		References
	Including the machine index in the production variables	17
Parallel machines (34 references)	Not including the machine index in the production variables	12
	Identical	3
	Unrelated	2
Multistage systems		7
Production lines		6
Groups of identical machines		1

### 3.6.5 Multi-site

Mono-site production planning models can be extended to multi-site ones by considering several manufacturing plants and/or by incorporating the suppliers, warehouses, distribution centers and customers constituting a supply chain. As in our previous work (Mula et al., 2010a), we propose the classification by Beamon and Chen (2001) to define the way that the organizations within the supply chain are arranged and how they relate to each other. The supply chain structure is classified into four main types: convergent, divergent, conjoined and network. Moreover, we incorporate serial supply chains formed by one actor in each echelon.

Table II-11 provides details of the different configurations considered by those reviewed works addressing multi-site production planning. Most (36 references) present a network structure generally formed by manufacturing and distribution centers and demand points or customers. Twelve references propose a divergent supply chain with different structures. For example, a group of 9 references (Armentano et al., 2011; Bard and Nananukul, 2009; Boudia and Prins, 2009; Boudia et al., 2008, 2007; Chand et al., 2007; Dudek and Stadtler, 2007; Taskin and Uenal, 2009; van den Heuvel et al., 2007) considers a supply chain consisting of one production plant and several customers. Moreover, Rizk et al. (2006, 2008) present a divergent supply chain with one manufacturer and several distribution centers, while Tian et al. (2011) model a divergent structure with one supplier and several manufacturing centers. Those references dealing with a serial supply chain consider two members (Akbalik and Penz, 2011; Sargut and Romeijn, 2007; Selcuk et al., 2008), except Sodhi and Tang (2009), who model a supply chain formed by one supplier, a manufacturer and one customer. Convergent supply chains, with different members and only one final demand center, are addressed by Galasso et al. (2009) and Lan et al. (2011). Finally, 2 references present conjoined supply chains formed by several suppliers, one manufacturer and several customers

(Zolghadri et al., 2008), and by several plants, a distribution center and several customers (Romero and Vermeulen, 2009).

In this section, we have also included those multi-site models related to APP (Leung et al., 2006; Leung et al., 2007 and Leung and Chan, 2009) and MPS (Chand et al., 2007; van den Heuvel et al., 2007; Boudia et al., 2008; Nascimento et al., 2010; Akbalik and Penz, 2010; Drechsel and Kimms, 2011 and Lan et al., 2011).

**Table II-11.** Multi-site configurations

Multi-site configuration	References
Network	37
Divergent	12
Serial	4
Convergent	2
Conjoined	2

### 3.6.6 *Remanufacturing activities and/or quality issues*

In recent years, manufacturers have started to integrate remanufacturing activities into the traditional production environment. For example, remanufacturing returned products is a common practice in production plants of high valued products like computers, copiers or medical equipment. Thus, customers' demand can be met with new products or returned remanufactured products. Remanufacturing returned products, however, creates many new operations management problems. These include the collection of used products, dismantlement or disassembly of returned products, incorporation of remanufacturing activities into the overall production planning (Guide and Van Wassenhove, 2002), and the recycling or disposal of unused items.

Of the reviewed works, only 11 references deal with remanufacturing issues integrated into a production system, which also manufactures new products. Of these, 8 (Fazle Baki et al., 2014; Li et al., 2006; Naeem et al., 2013; Teunter et al., 2006; Li et al., 2007; Schulz, 2011; Shi et al., 2011; Zhang et al., 2012) globally consider remanufacturing tasks without modeling them individually, while Pan et al. (2009), Pineyro and Viera (2010) and Wei et al. (2011) consider only remanufacturing and disposal activities separately. Furthermore, 9 references separately deal with remanufacturing tasks from a standard production environment. Of these, 4 (Depuy et al., 2007; Jayaraman, 2006; Li et al., 2009a, 2009b) model disassembly and remanufacturing planning activities simultaneously. Nevertheless, disassembly scheduling is contemplated by Kim et al. (2006) and by Barba-Gutierrez et al. (2008) and Kim and Xirouchakis (2010), who deal with disassembly

scheduling in a reverse MRP system. Moreover, Ferguson et al. (2009) and Denizel et al. (2010) propose tactical production planning models for remanufactured products by considering remanufacturing tasks generally. Table II-12 details the number of references dealing with the considered remanufacturing extensions.

**Table II-12.** Extensions on remanufacturing activities

<b>Planning</b>	<b>Remanufacturing activities</b>	<b>References</b>
Manufacturing and remanufacturing (11 references)	Remanufacturing (globally)	8
	Remanufacturing + disposal	3
Remanufacturing (9 references)	Remanufacturing (globally)	2
	Disassembly + remanufacturing	4
	Dissassembly scheduling	3

The quality of the returned products to be remanufactured is an important aspect to consider when organizing and planning remanufacturing activities. A common way of considering the quality of returned products is by assigning different degrees of quality and, depending on which, the necessary remanufacturing operations to which they must be submitted to meet customers demand may vary. In this sense, Jayaraman (2006), Ferguson et al. (2009) and Denizel et al. (2010) consider different quality levels for the products returned to remanufacturing facilities. Quality levels are another consideration in traditional production systems without remanufacturing, where customer requirements can be fulfilled by using products of a higher quality than demanded, as in TFT-LCD (Wu et al., 2010) or in float glass (Taskin and Uenal, 2009) industries. Defersha and Chen (2008) study the impact of run length on product quality, while Leung and Chan (2009) contemplate defective items production rates and the necessary machine repairing costs to increase the quality of manufactured products. Defective items from suppliers can affect production system yields and the quality of manufactured end products. Accordingly, Liang (2008) and Torabi and Hassini (2009) examine the defective rates of the items received from suppliers for the purpose of minimizing the total number of items rejected. Moreover, there are times when it is not possible to know the quality levels of the items received from suppliers in advance, and this aspect has to be modeled as an uncertain parameter (Zanjani et al., 2011, 2010a, 2010b). Table II-13 presents the number of references addressing each quality extension.

**Table II-13.** Extensions on quality

Quality extension	References
Quality levels	5
Uncertain quality of items from suppliers	3
Defective item rates from suppliers	2
Defective item rates from production machines	1
Impact of run length on the quality of products	1

### 3.7 Modeling approach

Since the 1950s, mathematical programming formulations have been proposed for a wide range of production-related problems to address problems of aggregate production planning, lot sizing and detailed short-term production scheduling, among others (Missbauer and Uzsoy, 2011). These formulations are optimization methods based on operations research, which determines the best possible production plan by generally minimizing total costs or by maximizing total profit. The typical mathematical programming approaches considered in production planning problems are linear programming, integer linear programming and mixed integer linear programming (MILP), and quadratic programming if there is a quadratic objective function of several variables subject to linear constraints in these variables. However, the need to optimize more than one objective simultaneously and to express the nonlinear relationships among the different variables of a production system involves the use of multi-objective programming (MOP) and nonlinear programming (NLP), respectively. Moreover, multi-stage decision processes can be modeled by dynamic programming (DP) approaches. Additionally, when the mathematical modeling of production systems dynamics proves a complex task, simulation models can prove a good alternative. Simulation can help firms become more aware of the dynamics and efficiency of their processes in a production planning context (Biswas and Narahari, 2004). However, simulation does not guarantee optimal solutions, so hybrid models which contemplate the use of simulation tools to complement mathematical programming models have appeared. According to Mula et al. (2006), there are many research works and applications which aim to formalize uncertainty in manufacturing systems. Stochastic programming (SP), fuzzy programming (FP), robust optimization (RO) and stochastic dynamic programming (SDP) are some of the most used approaches to model uncertainty in production planning problems (Sahinidis, 2004). Readers are referred to Aloulou et al. (2013), Dolgui and Prodhon (2007), Dolgui et al. (2013), Grosfeld-Nir and Gerchak (2004), Koh et al. (2002), Mula et al. (2006), Yang et al. (2007) and Ko et al. (2010) and Peidro et al. (2009) for reviews of modeling uncertainty in production planning and supply chain planning problems, respectively.

Table II-14 shows the number of references relating to each modeling approach. The vast majority of the reviewed papers (165 references) opt for linear, mixed integer or integer linear programming-based modeling approaches, while only 3 references consider quadratic programs (Gonzalez-Ramirez et al., 2011; Haugen et al., 2007; Ibarra-Rojas et al., 2011). Moreover, Onal and Romeijn (2010) propose an integer and quadratic programming model to address different production planning problems with setup times and pricing decisions. Modeling two or more conflicting objectives is addressed by only 11 references, and only 2 references (Omar and Bennell, 2009; Omar and Teo, 2007) present both MILP and MOP models separately. In general terms, in order to solve multi-objective problems using a standard MILP solver, multi-objective programs are converted into an equivalent MILP model with goal programming or fuzzy programming approaches and their variants. In this sense, Li et al. (2006), Kanyalkar and Adil (2007), Leung and Ng (2007), Leung and Chan (2009), Omar and Teo (2007) and Omar and Bennell (2009) present goal programming (GP) approaches to solve their multi-objective problems, while Zolghadri et al. (2008) use a lexicographic linear goal programming method. Liang (2007, 2008) consider an FP approach, while Jamalnia and Soukhakian (2009), Petrovic and Akoez (2008) and Torabi and Hassini (2009) propose different fuzzy goal programming approaches.

Although the inclusion of nonlinearities in models may be more realistic than linear relationships, the difficulty of solving NLP problems given their complexity and time-consuming properties mean that they do not appear as frequently as linear models. Of the 11 references addressing nonlinearities, 5 (Ahkioon et al., 2009; Asmundsson et al., 2009; Defersha and Chen, 2008; Lin et al., 2009; Safaei and Tavakkoli-Moghaddam, 2009) propose linearization methods to accomplish solutions more easily, while Li and Meissner (2011) and Shi et al. (2011) respectively consider a discretization method and a Lagrangean relaxation procedure. Other solution approaches for nonlinear programs considered in the reviewed papers are genetic (Palaniappan and Jawahar, 2011) and column generation and gradient search algorithms (Sun et al., 2010). However, Qu and Williams (2008) use a commercial NLP solver with default settings to solve their proposed nonlinear model, whereas Fandel and Stammen-Hegene (2006) present neither a solution procedure nor results. Lastly, Tian et al. (2011) propose an iterative method to solve a tactical production planning problem based on one linear and one nonlinear programming models.

One way of simplifying the solution process of a complex production planning problem is to divide it into several simpler subproblems in a recursive manner by using dynamic programming, as these authors do: Berk et al. (2008); Cheaitou et al. (2009); Hsu et al. (2009); Huh et al. (2010); Feng et al. (2011); Fleischhacker and Zhao (2011); Wu et al. (2011). Moreover, the simulation tools are used either in isolation (Alwan et al., 2008; Li et al., 2009b; Mohebbi et al., 2007) or combined



with mathematical programming in hybrid models (Albey and Bilge, 2011; Almeder et al., 2009), which are complementary approaches that can be applied to model complex production planning problems. Other modeling approaches, such as Laplace transform (Bogataj and Bogataj, 2007; Grubbstrom and Huynh, 2006a, 2006b), heuristics (Ho et al., 2007, 2006) and MRP logic (Barba-Gutierrez et al., 2008; Ram et al., 2006), are also considered in the reviewed papers.

Uncertainty in the production environment is addressed by 39 references which employ different modeling approaches. Stochastic programming models are considered with distinct approaches, such as two-stage stochastic programming (Leung et al., 2006; Leung and Ng, 2007a; Nagar and Jain, 2008; Schütz and Tomasgard, 2011; Wu, 2011; Zanjani et al., 2011) or multi-stage stochastic programming (Brandimarte, 2006; Denizel et al., 2010; Guan and Miller, 2008; Guan et al., 2009; Guan and Philpott, 2011; Koerpeoglu et al., 2011; Nagar and Jain, 2008; Zanjani et al., 2010b). Other stochastic programming proposals are presented by Karabuk (2008), Kim and Xirouchakis (2010), Sodhi and Tang (2009), Tempelmeier and Herpers (2011) and Tempelmeier (2007). Most of these papers consider only demand uncertainty, but others also add uncertain costs (Leung and Ng, 2007a), import quotas (Wu, 2011), quality of raw materials (Zanjani et al., 2010b) or other problem parameters (Guan and Miller, 2008; Tempelmeier, 2007). Moreover, Zanjani et al. (2011) also contemplate uncertain quality of raw materials, as do Denizel et al. (2010) and Guan and Philpott (2011), who examine uncertainty in the quality of returned items in a remanufacturing production system and for supplies in a dairy supply chain, respectively. Seven references introduce uncertain parameters into production planning problems by fuzzy programming (Chen and Huang, 2010; Demirli and Yimer, 2008; Lan et al., 2011; Mula et al., 2010b, 2008; Peidro et al., 2010; Zhang et al., 2011). Moreover, 3 other references (Liang, 2007; Petrovic and Akoz, 2008; Torabi and Hassini, 2009), which propose multi-objective models solved by developing an equivalent single-objective model with fuzzy approaches, also address production problems in an uncertain environment. Among them, Demirli and Yimer (2008) contemplate uncertain operational costs, while Mula et al. (2010b) opt for uncertainty in market demand. The remaining references present different combinations of uncertain parameters added to uncertain demand, such as production costs (Lan et al., 2011), available capacities (Chen and Huang, 2010; Torabi and Hassini, 2009), capacities data and costs (Liang, 2007; Mula et al., 2008) raw material prices (Zhang et al., 2011), supply and process parameters (Peidro et al., 2010) or average sales and target inventory levels (Petrovic and Akoz, 2008).

Of the remaining reviewed papers dealing with production planning problems with uncertainty, a group of 7 references (Aghezzaf et al., 2010; Leung et al., 2007a, 2007b; Mirzapour Al-e-hashem et al., 2011; Wei et al., 2011; Wu et al., 2010; Zanjani et al., 2010a) proposes robust optimization approaches. Among them, Zanjani

et al. (2010a) consider random yields due to uncertain quality levels of raw materials, while Aghezzaf et al. (2010) contemplate uncertainty in demand levels. Besides, Leung et al. (2007a, 2007b) present production planning models with uncertain demand and costs, Wu et al. (2010) do so, but with uncertain demand and sales prices, and Mirzapour Al-e-hashem et al. (2011) simultaneously do so with uncertain demand, costs and sales prices. Lastly, Wei et al. (2011) tackles a production planning problem with remanufacturing to face uncertain demand and returns quantities. In this sense, Ferguson et al. (2009), Li et al. (2009) and Naeem et al. (2013) study a production planning problem in a remanufacturing environment with the same uncertain parameters by proposing stochastic dynamic programming models. Azaron et al. (2009) and Cristobal et al. (2009) also opt for this modeling approach and they respectively model uncertain production costs and uncertain demands and production costs and available capacities.

**Table II-14.** Modeling approaches

<b>Modeling approach</b>	<b>References</b>
Linear/Integer/Mixed integer linear programming	165
Stochastic programming	18
Nonlinear programming	11
Multi-objective programming	11
Fuzzy programming	7
Robust Optimization	7
Dynamic programming	7
Other analytical approaches	4
Stochastic Dynamic Programming	5
Simulation	3
Quadratic programming	3
Laplace transform	3
Hybrid models	2
Mixed integer/integer linear programming + Multi-objective programming	2
Linear/Integer/Mixed integer Linear programming + Quadratic programming	1
Linear/Integer/Mixed integer Linear programming + Nonlinear programming	1

### 3.8 Solution approach

According to Buschkühl et al. (2010), the approaches to solve different types of production planning or capacitated lot-sizing models can be classified into five groups: mathematical programming-based (MP-based) approaches, Lagrangian heuristics; decomposition and aggregation heuristics; metaheuristics; problem-specific and greedy heuristics.

Among the MP-based approaches, it is possible to distinguish between exact methods, which stop after an optimal solution has been found regardless of efforts made in terms of required computation time and memory, and MP-based heuristics, which only explores parts of the solution space and attempts to find a good feasible solution in a reasonable time. This work considers exact methods as those embedded in default solvers, such as the typical branch-and-bound algorithm for solving mixed-integer programs to optimality. Fix-and-relax heuristics divide the problem to be solved into several subproblems with a view to reducing the number of binary variables to be treated simultaneously, which are distinguished as three different sets. The first is solved to optimality, the second is relaxed and the setup states that the third set is fixed to the values of a previous iteration (Buschkuhl et al., 2010). In addition, column generation can be considered an efficient algorithm for solving larger linear programs. Based on the idea that most variables are nonbasic and assume a value of zero in the optimal solution, in theory it is necessary to consider only one subset of variables when solving the problem. In this sense, this solution method takes into account only those variables which have the potential to improve the objective function. Column generation can be hybridized with the branch-and-bound algorithm to generate a solution method called branch-and-price. Rounding heuristics solution approaches are based on solving the mathematical programming problem by rounding up and rounding down fractional binary variables in relation to only a given threshold. Finally, primal-dual heuristics are based on the equivalence properties between primal and dual problems.

Other solution approaches to solve a difficult optimization problem by approximating it by a simpler one are Lagrangian heuristics, and decomposition and aggregation heuristics. Lagrangian heuristics includes iterative solution approaches based on Lagrangian relaxation. This method incurs an additional cost for the violations of relaxed inequality constraints by using Lagrangian multipliers. The solution to the relaxed problem comes very close to the optimal solution of the original problem. A special form of Lagrangian relaxation is the Lagrangian decomposition method, in which all the original constraints remain unaltered. The original problem is decomposed into subproblems by duplicating variables, where each subproblem only contains some constraints. For the solutions to the subproblems to become a valid solution to the original problem, duplicates must equal the corresponding original variables. These coupling constraints are finally relaxed (Buschkuhl et al., 2010). On the other hand, aggregation heuristics is based on obtaining a reduced problem by omitting certain details and the subsequent division of the obtained solution. On the contrary, decomposition heuristics divides the original problem into subproblems and then coordinates the solutions obtained. Item-based, time-based and resource-based are the most popular decomposition and aggregation approaches to solve production planning problems.

Moreover, the impossibility of discovering the exact solutions corresponding to optimization problems and the need to respond to the practical situations considered in many real-world cases have led to an increased use of heuristic-type algorithms, which have proven to be valuable tools that provide solutions where exact algorithms do not (Verdegay et al., 2008). Metaheuristics have emerged as a result of the extensive application of these heuristic-type algorithms to many optimization problems. According to Voss et al. (1999), a metaheuristic can be defined as an iterative master process that guides and modifies the operations of subordinate heuristics to efficiently produce high quality solutions. Metaheuristic procedures start from an initially provided solution. By exploring the search space and by exploiting accumulated search experience, they are able to obtain non optimal solutions, which can largely satisfy the decision maker. Examples of metaheuristics algorithms include genetic algorithms (Holland, 1975), memetic algorithms (Moscato, 1989), variable neighborhood searches (Mladenović and Hansen, 1997), simulated annealing (Černý, 1985; Kirkpatrick et al., 1983), tabu searches (Glover and McMillan, 1986; Glover, 1989, 1990), ant colony optimization (Dorigo et al., 1996), bee colony optimization (Pham et al., 2005), particle swarm optimization (Kennedy and Eberhart, 1995; Shi and Eberhart, 1998), greedy randomized adaptive search procedure (GRASP) (Feo and Resende, 1989), scatter searches and path relinking (Glover, 1998; Glover et al., 2000), etc. This classification also contemplates other specific solution methods based on the problem structure and its properties: constructive heuristic algorithms; greedy algorithms; dynamic programming-based algorithms.

Table II-15 presents the solution approaches proposed in the reviewed papers. Most analyzed works opt for MP-based approaches, especially exact methods, which are embedded by default in typical solvers (82 references). Moreover, these exact methods are also presented in combination with other solution approaches, such as Lagrangian relaxation (Brahimi et al., 2010), ant colony optimization (Almeder, 2010; Pitakaso et al., 2007), GRASP (Mateus et al., 2010) and dynamic programming algorithms (Akbalik and Penz, 2011). Furthermore, several solution methods based on fix-and-relax heuristics are proposed by Brandimarte (2006), Akartunali and Miller (2009), Ferreira et al. (2009, 2010) and Toso et al. (2009). Column generation solution procedures are presented as being hybridized in branch-and-price algorithms (Degraeve and Jans, 2007; Onal and Romeijn, 2010), and are combined with gradient search procedures (Sun et al., 2010). Primal-dual heuristics and rounding heuristics are used only by Eksioğlu et al. (2006) and Denizel and Sural (2006), respectively. Another class of MP-based heuristics called fix-and-optimize heuristics is proposed by Sahling et al. (2009) and Helber and Sahling (2010). Finally, other combinations of MP-based heuristics can be found in Stadtler and Sahling (2013) which propose a solution approach based on fix-and-relax and fix-and-optimize procedures; Lang and Shen (2011), which combine relax-and-fix, fix-and-optimize and time-decomposition approaches; De Araujo et al. (2008) and James and Almada-Lobo (2011), who present relax-and-fix heuristics and different

metaheuristic solution procedures simultaneously; Goren et al (2012) who propose a hybrid solution method based on fix-and-optimize and genetic algorithms; Aghezaf (2007), who combines primal-dual heuristics with a Lagrangian relaxation approach; Merzifonluoglu and Geunes (2006), who propose a dual-based heuristic algorithm and a dynamic programming-based one.

Fourteen references propose Lagrangian heuristics as a solution approach. Of these, 13 opt for Lagrangian relaxation with different combinations and 2 for Lagrangian decomposition methods. Regarding the papers that propose Lagrangian relaxation approaches, a group of 6 references (Brahimi et al., 2006a; Haugen et al., 2007; Kim and Xirouchakis, 2010; Shi et al., 2011; Tonaki and Toledo, 2010; Zhang et al., 2012) presents this solution method in isolation, while 4 references (Gramani et al., 2009; Rizk et al., 2006b; Sural et al., 2009; Toledo and Armentano, 2006) propose its combination with a subgradient optimization paradigm. Another combination of Lagrangian relaxation heuristics with a dynamic programming algorithm can be found in Tempelmeier and Buschkuehl (2009). Lagrangian relaxation is considered by Eksioglu et al. (2007) and Gunnarsson and Ronnqvist (2008), who complement this solution approach with a subgradient algorithm. Decomposition heuristics is used as a solution approach in 3 references, where Denton et al. (2006) exploit the supply chain structure of the MILP model by employing a product-based decomposition heuristics as a presolving stage to obtain a near-optimal solution before obtaining a final one. Ouhimmou et al. (2008) use a time-decomposition approach to obtain good solutions in a reasonable time limit for large-sized problems. Other decomposition heuristics combinations with MP-based heuristics can be found in Lang and Shen (2011).

Thirty references include different metaheuristics to efficiently solve production planning problems. Among them, genetic algorithms are the most used metaheuristics, which are proposed by 11 references (Bjork and Carlsson, 2007; Defersha and Chen, 2008; Jamalnia and Soukhakian, 2009; Jozefowska and Zimniak, 2008; Li et al., 2009b, 2007; Liu et al., 2008; Palaniappan and Jawahar, 2011; Santos et al., 2010; Toledo et al., 2009; Yimer and Demirli, 2010). GRASP metaheuristics is considered in 4 references and is combined with other solution approaches, such as exact methods (Mateus et al., 2010), memetic algorithms (Boudia and Prins, 2009), path relinking (Nascimento et al., 2010) and path relinking and a reactive mechanism (Boudia et al., 2007). Tabu search algorithms are also associated with path relinking procedures (Armentano et al., 2011) and have been developed simultaneously with variable neighborhood metaheuristics (Almada-Lobo and James, 2010). Other applications of tabu search approaches can be found in Bard and Nananukul (2009), Karimi et al. (2006), Lukac et al. (2008) and Pineyro and Viera (2010). Besides other search solution procedures, such as neighborhood search strategies or variable neighborhood search-based metaheuristic, are applied by Aksen (2007), Almada-Lobo et al. (2008), James and Almada-Lobo (2011) and Xiao et al. (2011a,

2011b). Several references consider solution procedures based on metaheuristics inspired in nature phenomena or animal behavior, such as ant colony optimization (Almeder, 2010; Pitakaso et al., 2007, 2006), monkey algorithms (Lan et al., 2011), particle swarm optimization and bee colony optimization (Pal et al., 2011), simulated annealing (De Araujo et al., 2008) or scatter evolutionary algorithms (Zhang et al., 2011).

Finally, specific solution methods, such as constructive heuristics or tailored algorithms, hierarchical solution methods or simulation frameworks, are proposed in 56 references, while greedy heuristics is considered in 4 of the reviewed works (Bolla-pragada et al., 2011; Boudia et al., 2008; Ferguson et al., 2009; Mocquillon et al., 2011). Other solution methods, such as dynamic programming-based algorithms, are presented in 34 of the analyzed papers.

**Table II-15.** Solution approaches

<b>Solution approaches</b>	<b>References</b>	
Mathematical programming-based	Exact methods	82
	Fix-and-relax heuristics	5
	Column generation and/or branch and price	3
	Fix-and-optimize heuristics	2
	Primal-dual heuristics	1
	Rounding heuristics	1
	Other combinations of exact methods	5
Lagrangian heuristics	Other mathematical programming-based heuristics	7
	Lagrangian relaxation	6
	Lagrangian relaxation and subgradient algorithm	4
	Lagrangian decomposition	1
	Lagrangian decomposition and subgradient algorithm	1
Decomposition and aggregation heuristics	Other Lagrangian relaxation combinations	3
	Item-based decomposition heuristics	1
	Time-decomposition heuristics	1
Metaheuristics	Other decomposition heuristics combinations	1
	Genetic algorithm	11
	Tabu search combinations	6
	Neighborhood search and Variable neighborhood	5
	GRASP combinations	4
	Ant Colony	3
Problem-specific, greedy heuristics and dynamic programming approaches	Other metaheuristics	4
	Specific solution method	56
	Greedy algorithms	4
	Dynamic programming algorithms	34

### **3.9 Development tool**

Sixty-three references do not provide any implementation or development details. However, 180 references report the names of the tools used to develop and solve the proposed production planning models. These software tools can be solvers (CPLEX, LINGO, Xpress-MP, Gurobi, LP-Solve, GLPK, etc.), programming languages (C, C++, Visual C, Java, Basic, Fortran, etc.), optimization modeling languages (GAMS, AMPL, OPL, AIMMS, MPL, Matlab, Xpress-MOSEL, etc.) and simulation systems (Anylogic, Arena, FMS.net, AutoSchedAP, etc.).

Tables 16a, 16b, 16c and 16d show the various main combinations associated with each development tool, classified as solvers, programming languages, modeling languages, simulation systems and other software tools. CPLEX solver is the most widely used tool and is reported in 102 references. In 27 of them, CPLEX appears as the only development tool, while it is used jointly with the C programming language in 24 articles. Besides, CPLEX is combined with other programming languages such as Java (Akbalik and Penz, 2011, 2009; Bard and Nananukul, 2009; Lang and Domschke, 2010; Lang and Shen, 2011) or Delphi (Helber and Sahling, 2010; Rizk et al., 2006b; Sahling et al., 2009). Moreover, CPLEX is frequently associated with optimization modeling tools such as OPL (Aghezzaf et al., 2011, 2010; Bilgen and Guenther, 2010; Feng et al., 2010, 2008; Kaczmarczyk, 2011; Quadt and Kuhn, 2009; Zanjani et al., 2010a, 2010b; Zhang et al., 2012), AMPL (Clark et al., 2010; Drechsel and Kimms, 2011; Ferreira et al., 2010, 2009; Gunnarsson and Ronnqvist, 2008; Tempelmeier and Buschkuehl, 2008; Toso et al., 2009), GAMS (Al-Ameri et al., 2008; Ibarra-Rojas et al., 2011; Pineyro and Viera, 2010; Stadtler and Sahling, 2013; Wu et al., 2011b) or MPL (Mula et al., 2010b, 2008; Peidro et al., 2010). Nine references report XPress-MP solver as the development tool (Anily et al., 2009; Asmundsson et al., 2009; Najid et al., 2011; Pochet and Wolsey, 2010; Schütz and Tomasgard, 2011; Stadtler, 2011; Suerie, 2006; Van Vyve and Wolsey, 2006; Van Vyve, 2006) and it is combined with the C programming language in Brahimi et al. (2006a, 2010). Other commercial solvers, like Gurobi, Minos and OSL, can be found in Lu and Qi (2011), Qu and Williams (2008) and Torabi and Hassini (2009), respectively. Besides, other non commercial solvers are considered an optimization tool by Bjork and Carlsson (2007) and Gonzalez-Ramirez et al. (2011), who use LP-Solve, Christou and Ponis (2009), and who opt for QSOpt running in the NEOS Server (Czyzyk et al., 1998; Gropp and Moré, 1997), and by Haugen et al. (2007) who develop an optimization algorithm with Java and LOQO solver.

The second most frequently used tool considered in the reviewed papers is the C programming language and its variants, such as C++ or Visual C, which appears in 49 references. Apart from its combination with CPLEX solver, the C programming language is used in isolation (in 13 references), or is combined with other modeling

systems such as Lingo (Karimi et al., 2006; Palaniappan and Jawahar, 2011; Petrovic and Akoez, 2008; Yimer and Demirli, 2010), or with optimization solvers such as Xpress-MP (Brahimi et al., 2010, 2006a). Moreover, other combinations with GAMS, AMPL, OPL, CPLEX and LP-Solve, among others, have been found in this review work. Among the other programming languages, Java is the second most used with 11 references, Delphi appears in 6 articles, while Fortran and Basic are reported in 3 articles each. Apart from their combinations with CPLEX, these programming languages are used in isolation to develop solution algorithms; e.g., Feng et al. (2011) and Okhrin and Richter (2011a, 2011b), who use Java, Boudia and Prins (2009) and Boudia et al. (2008, 2007), who opt for Delphi, and Ho et al. (2007, 2006) who use Fortran. On the other hand, Basic is used jointly with other software tools such as MS Excel (Baptiste et al., 2008; Depuy et al., 2007) or Lingo (Wu et al., 2010).

Lingo is the modeling language most frequently used in the reviewed papers as it appears in 26 references, of which 16 employ it as the only development tool. In the rest of the articles, it is utilized in combination with the C programming language, Matlab (Li et al., 2007, 2006b) or other software tools. The second most frequently used modeling system is OPL, considered in 15 references. Apart from its combination with CPLEX, OPL is used in isolation in 2 references (Jung et al., 2008a; Kefeli et al., 2011) or is combined with other development tools, such as Java, CPLEX or Minitab. Besides, AMPL and GAMS are used mainly with CPLEX solver, and are presented in 11 and 9 references, respectively, while Xpress-MOSEL is presented as the main development tool in Akartunali and Miller (2009), Akbalik and Pochet (2009) and Transchel et al. (2011). Although Matlab is not an optimization modeling language, it is employed for its good performance and given its possibility of being linked with standard solvers or programming tools. Of all the reviewed papers, Matlab is used in isolation in 3 references (Azaron et al., 2009; Naeem et al., 2013; Shi et al., 2011), and is linked with Lingo in 2 references, and with other combinations in 3 references (Brandimarte, 2006; Li et al., 2011; Pal et al., 2011). Finally, WINQSB is used as development tool in Erromdhani et al. (2012). On the other hand, the reviewed papers contemplate several simulation systems in isolation, such as Arena (Li et al., 2009b) or AutoSchedAP (Chen et al., 2010), or in combination with solvers, such as Anylogic (Almeder et al., 2009) and FMS.net (Albey and Bilge, 2011).

Despite the large number of tools detailed in the reviewed papers, it is worth highlighting that their integration with commercial information systems is reported only by Mehrotra et al. (2011) who combine CPLEX with SAP ERP, and by Jozefowska and Zimniak (2008) who develop a decision support system which interacts with Microsoft Dynamics Axapta.



**Table II-16a.** Solvers used and main combinations

Solvers	Main combinations	References
CPLEX (102 references)	CPLEX	27
	C+CPLEX	24
	OPL+CPLEX	10
	AMPL+CPLEX	7
	Java+CPLEX	5
	GAMS+CPLEX	5
	DELPHI+CPLEX	3
	MPL+CPLEX	3
Xpress-MP (13 references)	Xpress-MP	9
	C+Xpress-MP	2
LP-Solve (2 references)	LP-Solve	1
	AMPL+CPLEX+C+LP-Solve	1
Other solvers (6 references)		6

**Table II-16b.** Programming languages used and main combinations

Programming languages	Main combinations	References
C/C++/Visual C (49 references)	C+CPLEX	24
	C	13
	C+LINGO	4
	C+Xpress-MP	2
Java (11 references)	Java+CPLEX	5
	Java	3
Delphi (6 references)	DELPHI	3
	DELPHI+CPLEX	3
Fortran (3 references)	Fortran	2
	Fortran+LINGO	1
Basic (3 references)	Basic+Excel	2
	Basic+LINGO	1

**Table II-16c.** Modeling languages used and main combinations

Modeling languages	Main combinations	References
Lindo/Lingo (26 references)	LINGO	16
	C+LINGO	4
	MATLAB+LINGO	2
OPL (15 references)	OPL+CPLEX	10
	OPL	2
AMPL (11 references)	AMPL+CPLEX	7
GAMS (9 references)	GAMS+CPLEX	5
MATLAB (8 references)	MATLAB	3
	MATLAB+LINGO	2
MPL	MPL+CPLEX	3
Xpress-Mosel	Xpress-Mosel	3
AIMMS	AIMMS+CPLEX	1
WINQSB	WINQSB	1

**Table II-16d.** Simulation systems used and main combinations

Simulation systems	Main combinations	References
AnyLogic	AnyLogic+Xpress-MP	1
Arena	Arena	1
AutoSchedAP	AutoSchedAP	1
FMS.net	FMS.net+CPLEX	1

### 3.10 Application

The proposed models can be validated by using data from real-world production systems or by carrying out numerical experiments based on artificially generated instances. Of the 243 papers analyzed, 71 were validated by practical applications in real-world environments and 154 by numerical experiments, 18 of which were inspired in real practices from several industrial sectors. Moreover, 14 references do not present any application result. Tables 17 and 18 present the industrial areas in which each reference was validated with a practical application or with a numerical experiment inspired in real environments, respectively. These tables show the variety of industries in which the reviewed models were validated; sawmills, wood and furniture, automobile and semiconductor and electronic devices industries in the case of practical applications, and processed food, beverages and dairy and pulp and paper industries with regard to numerical experiments, are highlighted.

**Table II-17.** Practical applications

<b>Practical applications</b>	<b>Number of references</b>	<b>References</b>
Sawmills, wood and furniture industry	9	Feng et al. (2008); Liu et al. (2008); Liu and Tu (2008b); Ouhimmou et al. (2008); Pastor et al. (2009); Feng et al. (2010); Zanjani et al. (2010a); Zanjani et al. (2010b); Zanjani et al. (2011)
Automobile industry	7	Mula et al. (2008); Qu and Williams (2008); Tempelmeier and Buschkuehl (2008); Zolghadri et al. (2008); Torabi and Hassini (2009); Peidro et al. (2010); Zhang et al. (2011)
Semiconductor and electronic devices industry	7	Denton et al. (2006); Jayaraman (2006); Depuy et al. (2007); Lin et al. (2009); Chen et al. (2010); Wu et al. (2010); Tian et al. (2011)
Textile industry	5	Leung et al. (2006); Bjork and Carlsson (2007); Leung et al. (2007b); Karabuk (2008); Wu (2011)
Foundry, steel and machinery industry	4	Liang (2007); De Araujo et al. (2008); Genin et al. (2008); Tonaki and Toledo (2010)
Fruit juice and soft drink industry	4	Liang (2008); Toledo et al. (2009); Bilgen and Guenther (2010); Ferreira et al. (2010)
Processed food, beverages and dairy industry	5	Christou and Ponis (2009); Guan and Philpott (2011); Mehrotra et al. (2011); Schütz and Tomasgard (2011); Erromdhani et al. (2012)
Pulp and paper industry	4	Bouchriha et al. (2007); Gunnarsson and Ronnqvist (2008); Rizk et al. (2008); Mirzapour Al-e-hashem et al. (2011)
Toy industry	3	Leung and Ng (2007a); Leung and Ng (2007b); Leung et al. (2007a);
Animal nutrition industry	2	Toso et al. (2009); Clark et al. (2010)
Consumer goods manufacturers	2	Van Vyve and Wolsey (2006); Kanyalkar and Adil (2007)
Glass manufacturers	2	Almada-Lobo et al. (2008); Taskin and Uenal (2009)
Hygiene products industry	2	Mocquillon et al. (2011); Shaikh et al. (2011)
Mail management systems manufacturers	2	Ferguson et al. (2009); Denizel et al. (2010)
Refinery industry	2	Liu et al. (2007); Liu and Tu (2008)

<b>Practical applications</b>	<b>Number of references</b>	<b>References</b>
Pharmaceutical company	1	Stadtler (2011)
Photographic film-producing company	1	Van den broecke et al. (2008)
Plastic industry	1	Jozefowska and Zimniak (2008)
Refrigerators manufacturer	1	Jamalnia and Soukhakian (2009)
Remanufacturer of computers and laptops	1	Li et al. (2009b)
Remanufacturer of tools	1	Li et al. (2009a)
Resin manufacturer	1	Omar and Teo (2007)
Surface and material science company	1	Leung and Chan (2009)
Surfactant manufacturer	1	Transchel et al. (2011)
Valve manufacturing company	1	Timm and Blecken (2011)
Not provided	1	Baptiste et al. (2008)
<b>TOTAL</b>	<b>70</b>	

**Table II-18.** Numerical experiments inspired in real environments

<b>Numerical examples inspired in:</b>	<b>Number of references</b>	<b>References</b>
Processed food, beverages and dairy industry	2	Ram et al. (2006), Christou et al. (2007)
Pulp and paper industry	2	Rizk et al. (2006), Almeder et al. (2009)
Sawmills, wood and furniture industry	1	Demirli and Yimer (2008)
Pharmaceutical company	1	Lukac et al. (2008)
Pottery company	1	Petrovic and Akoez (2008)
Fruit juice and soft drink industry	1	Ferreira et al. (2009)

Numerical examples inspired in:	Number of references	References
Iron factory	1	Pan et al. (2009)
Semiconductor and electronic devices industry	1	Quadt and Kuhn (2009)
Magazine publishing firm	1	Huh et al. (2010)
Refractory bricks manufacturer	1	Mateus et al. (2010)
X-ray film producer	1	Aghezzaf et al. (2011)
Clinical trial	1	Fleischhacker and Zhao (2011)
Automobile industry	1	Koerpeoglu et al. (2011)
Plastic industry	1	Lang and Shen (2011)
Poultry industry	1	Lu and Qi (2011)
Remanufacturing of printers and copy cartridges	1	Wei et al. (2011)
TOTAL	18	

### 3.11 Limitations

Some of the limitations pointed out by the authors of the proposals are related to the solution method used, the considered production systems, demand issues, capacities, the non consideration of uncertain parameters, product properties, applications in non real-world environments, supply chain issues and costs. These limitations are possibly improvements of the proposed models and they identify future lines of work for academic researchers and practitioners.

Table II-19 provides details of the different limitations associated with all the previous groups according to the authors. A hundred and two references present limitations related to solution methods. Among them, the vast majority (90 references) obtain improvable solutions in terms of the optimality or CPU time needed with the considered solution procedure. One group of 4 references (Fandel and Stammen-Hegene, 2006; Grubbstrom and Huynh, 2006a; Tempelmeier and Buschkuehl,

2009; Zolghadri et al., 2008) proposes models with a high grade of complexity due to the number of variables considered or to the mathematical expressions included, and are considered time-consuming solution procedures. The changes made in the information on production or market environments in Cheaitou et al. (2009), Wei et al. (2011) and Wu (2011) are not considered with a proper updating information method embedded in the solution process. Moreover, Galasso et al. (2009) and Leung et al. (2006) point out that the variations in specific parameters made by a sensitivity analysis are a weak point.

Production system limitations are indicated in 49 references. These weaknesses are due mainly to single-machine production environments and other parameters such as setups, lead times or safety stocks. Hence, a group of 14 references model production systems report only one production resource (Aghezzaf et al., 2007; Almada-Lobo and James, 2010; Almada-Lobo et al., 2007; Bouchriha et al., 2007; Gicquel et al., 2009; Koerpeoglu et al., 2011; Lang and Shen, 2011; Menezes et al., 2011; Ozturk and Ornek, 2010; Petrovic and Akoez, 2008; Sahling et al., 2009; Schulz, 2011; Stadtler, 2011; Stadtler and Sahling, 2013). Furthermore, setup limitations are caused by not considering setup times (Asmundsson et al., 2009; Brahimmi et al., 2010; Deng and Yano, 2006; Gicquel et al., 2009; Grubbstrom and Huynh, 2006a), setup carry-overs (Helber and Sahling, 2010; Kaczmarczyk, 2011; Nascimento et al., 2010), setup sequence-dependents (Goren et al., 2012; Mohan et al., 2012; Ozturk and Ornek, 2010) or setup groups (Absi and Kedad-Sidhoum, 2008). Moreover, Bjork and Carlsson (2007) and Merzifonluoglu et al. (2007) do not reflect lead time flexibility, while Aghezzaf et al. (2007), Kanyalkar and Adil (2007) and Rong et al. (2006) assume that lead times are zero. Alwan et al. (2008), Brandimarte (2006), Kanyalkar and Adil (2007) and Selcuk et al. (2006) do not include safety stocks as a model parameter in their proposals. Other production system limitations are related to the inclusion of disposal activities in remanufacturing systems (Defersha and Chen, 2008; Li et al., 2006b) and the small bucket modeling approach (Lang and Domschke, 2010; Sahling et al., 2009).

Demand limitations are described in 37 references. These weaknesses are due to not allowing backorders (Aksen, 2007; Almada-Lobo et al., 2007; Begnaud et al., 2009; Bilgen and Guenther, 2010; Bollapragada et al., 2011; Degraeve and Jans, 2007; Gaglioppa et al., 2008; Goren et al., 2012; Gutierrez et al., 2008; Kanyalkar and Adil, 2007; Lan et al., 2011; Liu and Tu, 2008a; Lusa et al., 2009; Menezes et al., 2011; Wolsey, 2006), lost sales (Bollapragada et al., 2011; Liu and Tu, 2008b), or are owing to not including pricing decisions (Bjork and Carlsson, 2007; Feng et al., 2010; Geunes et al., 2006; Huh et al., 2010; Jayaraman, 2006; Leung et al., 2006; Lu and Qi, 2011; Onal and Romeijn, 2010; Sargut and Romeijn, 2007; Shi et al., 2011; Xue et al., 2011) or discounts (Aksen, 2007; Ho et al., 2007). The other demand limitations reported by authors consider constant selling prices (Feng et al., 2008; van den Heuvel and Wagelmans, 2006), assume monopolistic demand

(Haugen et al., 2007), or ignore demand patterns and seasonal demand (Alwan et al., 2008; Zanjani et al., 2010b), segregation of customers (Leung and Ng, 2007a) or time windows (Absi et al., 2011).

The capacity limitations pointed out by the authors are due to not considering production capacities (Aksen, 2007; Depuy et al., 2007; Ho et al., 2006; Kim et al., 2006; Li et al., 2006b; Liu et al., 2007; Merzifonluoglu and Geunes, 2006; Okhrin and Richter, 2011a; Palaniappan and Jawahar, 2011; Pitakaso et al., 2007; Rizk et al., 2006a; Tempelmeier, 2007; van den Heuvel and Wagelmans, 2006; van den Heuvel et al., 2007), storage capacities (Almada-Lobo and James, 2010; Bollapragada et al., 2011; Gonzalez-Ramirez et al., 2011; Gunnarsson and Ronnqvist, 2008; Stadler and Sahling, 2013), outsourcing capacities (Erromdhani et al., 2012; Fleischhacker and Zhao, 2011; Gonzalez-Ramirez et al., 2011; Liu and Tu, 2008b; Ozturk and Ornek, 2010), overtime production capacities (Bilgen and Guenther, 2010; Gonzalez-Ramirez et al., 2011; Palaniappan and Jawahar, 2011) or transport capacities (Hwang, 2010; Sargut and Romeijn, 2007).

Product-related limitations appear in those papers addressing the production of only a single product (18 references) or in those that consider only mono-level product structures (Alwan et al., 2008; Degraeve and Jans, 2007; Gaglioppa et al., 2008; Ho et al., 2007, 2006; Kim and Xirouchakis, 2010; Mohan et al., 2012; Nascimento et al., 2010). Moreover, the product structures of Barba-Gutierrez et al. (2008), Kim and Xirouchakis (2010) and Ram et al. (2006) do not bear in mind possible product commonalities. Supply chain limitations are related to the specific nodes not included in the supply chain structure, such as suppliers (Jung et al., 2008a; Yang and Qi, 2010), more production plants (Guan and Philpott, 2011), warehouses (Guan and Philpott, 2011; Shaikh et al., 2011), distribution centers (Erromdhani et al., 2012; Torabi and Hassini, 2009), vendors (Jung et al., 2008b) or supplying very simple chain networks (Dudek and Stadler, 2007; Fleischhacker and Zhao, 2011; Huh et al., 2010; Rizk et al., 2006a; Selcuk et al., 2008). Moreover, transport issues and supplier selection are reported as drawbacks in Bilgen and Guenther (2010), Chen and Huang (2010), Gunnarsson and Ronnqvist (2008), Qu and Williams (2008), and Lin et al. (2009) and Pal et al. (2011). Finally, the main limitation in relation to costs is the omission of setup costs, as pointed out by Bouchriha et al. (2007), Gramani and Franca (2006), Li et al. (2007), Ornek and Cengiz (2006) and Romero and Vermeulen (2009). The rest of cost drawbacks are due to contemplating constant costs over time (Azaron et al., 2009; Smith and Martinez-Flores, 2007), and to not considering transport costs (Chand et al., 2007), holding costs (Hwang, 2007), plant-specific manufacturing costs (Kanyalkar and Adil, 2007) or salvage costs (Hsu et al., 2009).

**Table II-19.** Main limitations of the reviewed works

<b>Type</b>	<b>Limitation</b>	<b>References</b>
Solution method (102 references)	Solution quality/procedure	90
	Model complexity	4
	Information update in solution process	3
	Sensitivity analysis on parameters	2
	Other solution method limitations	3
Production system (49 references)	Single-machine	14
	Setup limitations	12
	Lead time limitations	5
	Safety stocks not considered	4
	Disposal activities not considered	2
	Small-bucket modeling approach	2
	Other product system limitations	7
Demand (37 references)	Backorders not allowed	15
	Pricing decisions not included	11
	Constant price	2
	Discounts not considered	2
	Lost sales not considered	2
	Other demand limitations	5
Capacities (35 references)	Production capacity not considered	14
	Stationary production capacities	6
	Storage capacity not considered	5
	Outsourcing capacity not considered	5
	Overtime capacity not considered	3
	Transport capacity not considered	2
Uncertainty (34 references)	Uncertainty not considered in parameters	34
Product (32 references)	Single-product	18
	Multi-level product structures not considered	8
	Products commonality not considered	3
	Other product limitations	3
Application (30 references)	Application in non real environments	30
Supply chain (18 references)	Supply chain structure	12
	Transport issues not considered	4
	Supplier selection process not included	2
Costs (13 references)	Setup costs not considered	5
	Other costs limitations	8



### **3.12 Benefits**

Table II-20 summarizes the main benefits pointed out by the reviewed references reported by their authors. In this work, benefits are classified into six groups: solution method, improvements, application, uncertainty, extensions and demand. Two hundred references present benefits relating to the solution method used. The vast majority (187 references) obtain good solutions in terms of either the CPU time needed or optimality, or they present solution procedures that outperform previous methods in the literature. Moreover, 11 references (Aghezzaf et al., 2011; Brahimi et al., 2006a; Genin et al., 2008; Leung and Chan, 2009; Leung and Ng, 2007b; Ornek and Cengiz, 2006; Rizk et al., 2006b; Van den broecke et al., 2008; Wei et al., 2011; Wu et al., 2010; Zanjani et al., 2010a) stand out for their robustness from the rest; namely, they are not affected when the problem parameters are varied. In this sense, flexibility in lead times (Bjork and Carlsson, 2007), routing and processes (Ahkioon et al., 2009), transport capacity (Hwang et al., 2010), related to uncertainty or different scenarios (Erromdhani et al., 2012; Leung and Chan, 2009; Schütz and Tomasgard, 2011) and to modeling new constraints (Helber and Sahling, 2010) are an important advantage in dynamic production environments.

In all, there are 31 references which achieve significant improvements of different outputs of the proposed tactical production planning models. Most provide improvements in inventory levels or total inventory costs (Chen et al., 2010; Denton et al., 2006; Fandel and Stammen-Hegene, 2006; Fleischhacker and Zhao, 2011; Ho et al., 2006; Mehrotra et al., 2011; Mula et al., 2008; Shaikh et al., 2011; Taskin and Uenal, 2009; Wu et al., 2010), and in the total production costs (Boudia et al., 2008; Fleischhacker and Zhao, 2011; Liu et al., 2007; Mohan et al., 2012; Mula et al., 2008; Pastor et al., 2009; Peidro et al., 2010; Stadtler and Sahling, 2013; van den Heuvel et al., 2007). Other benefits corresponding to other performance measurements, such as customer service levels (Denton et al., 2006; Mula et al., 2008; Nourelfath, 2011; Peidro et al., 2010; Shaikh et al., 2011), total setup costs (Fleischhacker and Zhao, 2011; Ho et al., 2006; Mehrotra et al., 2011), production throughput (Chen et al., 2010; Fandel and Stammen-Hegene, 2006) and total transport costs (Taskin and Uenal, 2009; Wu et al., 2010), are also identified in the reviewed works. Several references report the different extensions added to the standard production planning or lot sizing models, such as cellular manufacturing design (Ahkioon et al., 2009; Safaei and Tavakkoli-Moghaddam, 2009), different quality levels in products (Denizel et al., 2010; Ferguson et al., 2009) or the inclusion of subcontracting activities (Merzifonluoglu et al., 2007; Safaei and Tavakkoli-Moghaddam, 2009). Moreover, the capability of extending their proposed models is emphasized by Li and Meissner (2011) and Stadtler (2011). According to several authors, other extensions relate to the consideration of non zero lead times (Grubbstrom and Huynh, 2006a; Safaei and Tavakkoli-Moghaddam, 2009), maintenance activities (Aghezzaf et al., 2007), and capacity decisions and overtime pro-

duction (Merzifonluoglu et al., 2007). Finally, demand benefits are identified in relation to considering customer preferences by either using flexible or alternative BOM (Lin et al., 2009; Ram et al., 2006) or including marketing and pricing decisions (Barba-Gutierrez et al., 2008; Merzifonluoglu et al., 2007) or demand priorities (Denton et al., 2006).

The other benefits identified in the reviewed papers relate to their application in real-world firms (25 references) and to incorporating uncertainty into the input parameters inherent to real production environments (22 references).

**Table II-20.** Main benefits of the reviewed works

Type	Benefits	References
Solution method (205 references)	Solution quality/procedure	187
	Robustness	11
	Flexibility	7
Improvements (31 references)	Inventory levels/costs	10
	Total production costs	9
	Customer service levels	5
	Setup costs	3
	Throughput	2
	Transport costs	2
Application (25 references)	Application in real environments	25
Uncertainty (21 references)	Uncertain parameters considered	22
Extensions (12 references)	Cellular design	2
	Quality levels in products	2
	Subcontracting activities	2
	Non-zero lead times	2
	Capability to extend	2
	Other extensions	2
Demand (5 references)	Customer preferences	2
	Other demand benefits	3

## 4 Discussion

After reviewing the selected papers on tactical production planning, this section provides some relevant streams and limitations in the literature on tactical production planning. In line with this, we confirm that, despite its importance and impact on existing production systems (Mabert, 2007) and the existence of numerous previous scientific papers, such as Benton and Whybark (1982), Billington et al. (1983), Bobko and Whybark (1985), Grubbström and Molinder (1994, 1996),

Grubbström and Ovrin (1992), Grubbström (1999) and Whybark and Williams (1976), among others, very few works have been conducted within the MRP theory framework during the study period. Most of the reviewed papers that deal with parts and raw materials planning correspond to multi-level lot-sizing modeling approaches. Generally, these papers focus mainly on developing efficient algorithms for typical lot-sizing extensions, such as inclusion of backlogs, setup times, sequence-dependent setups, etc. In this sense, the main contribution of the reviewed articles is to propose efficient solution methods which outperform previous procedures in the literature in terms of CPU time or optimality or production, inventory, setups or transport costs. The trade-off between efficient solution procedures and the modeling of realistic production systems is reflected in limitations related to production system (e.g., single-machine, setups, lead times), demand issues (e.g., backorders, lost sales, selling prices or discounts), capacities of the available resources and structure and number of products (e.g., multi-product models, multi-level BOM) that are neglected in order to reduce the computation times and improve the solution process. Despite that, multi-item big-bucket models are majority with respect to single-item models, but mono-level BOM is more common. Moreover, most of the reviewed articles consider capacity constraints related to productive resources and inventory space. On the other hand, the consideration of uncertain parameters related to unpredicted and variable production environments is an additional improvement in the proposed models. However, these parameters have been mainly modeled, especially uncertain demand, with stochastic models. In this case, when statistical data are unreliable or even unavailable, stochastic models may not be the best approach and fuzzy mathematical programming stands as an alternative modeling approach, but only has been considered in 7 of the reviewed papers. In our opinion, and independently of the production area, the reviewed articles address, but do not model, the situations related to current complex industrial environments and their impact on tactical decisions, such as the markets characterized by low demand and high competition, environmental aspects, offshoring of suppliers and importance of transport, etc. Instead, different extensions can be identified in the analyzed papers in addition to those cited above, for example, the consideration of production times (overtime, undertime and subcontracting), multiple and parallel machines and remanufacturing activities and quality issues. Among them, extensions related to demand and setup properties are those more included in the reviewed models. Nevertheless, we find such modeling efforts to reproduce real-world production problems relating to specific production sectors (examples can be found in the references of Table II-17).

Although a considerable number of articles has been validated using data from real-world manufacturing firms, most of the reviewed articles perform numerical experiments with random created instances. With respect to the application industry, the automobile industry and the consumer goods industry have the main number of references. Moreover, although some proposals have been validated in real envi-

ronments, very few of the proposed models are reported to be implemented and incorporated into the planning systems of the companies considered. We believe that this confirms a gap between academic research and industry. In general, industrial practitioners look for tools whose general purpose is to solve production problems easily without having to learn new modeling or programming languages. However, the reviewed articles focus on addressing production planning with problem-dependent solution methods based mainly on operations research principles and programming languages. Mathematical programming-based solution procedures and specific solution methods such as heuristic algorithms are proposed in most of the analyzed papers, and in a lesser extent metaheuristics. These solution approaches can be implemented by using modeling languages (e.g., Lingo, OPL, AMPL, GAMS, MATLAB), programming languages (e.g., C, Java, Delphi) or commercial solvers such as CPLEX or Xpress-MP, or combinations between them. The need to obtain optimal or near to optimal results makes the option of using a powerful tool such as CPLEX (in isolation or combined with other tools) becomes most frequent. This can prove a great difficulty for SMEs which cannot afford to buy these expensive, specific tools or to hire specialists in these fields. From our point of view, production planning models that reflect the current problems in complex industrial production environments are needed. These models should be solved with highly customizable and easy-to-use tools that integrate into firm's current information systems (ERP, APS, etc.) in order to bridge this gap.

This research presents some limitations. First, the obtained results and findings are based on articles collected from 36 relevant operations research and management journals from Barman et al.'s (2001) ranking, and the 3rd and 4th levels from the ABS Academic Journal Quality Guide in the *Operations, Technology and Management*, and *Operations Research and Management Science* subjects. Other journals, which could cover production planning problems from a simulation or mathematical applied perspective, for example, are not considered. Moreover, based on the works of Chaudhry and Luo (2005) and of Wong and Lai (2011), we review only journal articles, hence conference proceedings and doctoral dissertations are not considered by assuming their subsequent publication in high-quality research journals. On the other hand, it is important to highlight new trends appeared recently in the literature, as sustainability, green production planning, or production planning with carbon emissions (Ashby et al., 2012; Brandenburg et al., 2014; Chaabane et al., 2012; Deif, 2011; Elhedhli and Merrick, 2012; Kenneth et al., 2012; Seuring, 2013; Sundarakani et al., 2010) have not been considered along this paper. Furthermore, given the aggregated presentation of the information, references may appear in more than one product within each classification criterion in many cases. Finally, only minority references are cited in each category as it is impossible to provide details of each one due to limited space. For this reason, the extended tables with each reference are available in Annex I.

## **5 Conclusions**

This work surveys 250 articles related to tactical planning in relevant operations research and management journals. To study the analyzed works, a classification based on the analysis of the following aspects is proposed: problem type, aim, number of products, time period, nature of demand, capacities constraints, extensions, modeling approach, solution approach, development tool, application, limitations and benefits. The main findings are summarized as follows: (1) most of the reviewed tactical production planning articles address master production scheduling problems; (2) multi-product big bucket production planning models are more prevalent, especially with mono-level product structures; (3) most of the limited resources considered in the reviewed papers correspond to productive resources and, to a lesser extent, to inventory capacities; (4) the inclusion of backlogs or backorders, setup times, parallel machines, overtime capacities, and the consideration of network-type multi-site configuration, stand out in terms of extensions; (5) the most widely used modeling approach is linear/integer/mixed integer linear programming; (6) exact algorithms, such as branch-and-bound in commercial MIP solvers, are the most widely used, followed by specific solution methods, such as tailored algorithms or hierarchical and simulation frameworks; (7) CPLEX, C and its variants and Lindo/Lingo are the most popular development tools among solvers, programming languages and modeling languages, respectively; (8) a small number of works has been validated in real production environments, of which the most outstanding are the sawmills, wood and furniture, automobile and semiconductors and electronic devices industries; (9) the most relevant criterion pointed by authors to evaluate the benefits and limitations of their works is the quality of the solution obtained in terms of optimality, the time needed, or the improvements made to previous solution procedures.

After conducting this review, we indicate some gaps in the literature with some proposed future research lines: (1) it is important to underline that we found no work that examines multi-level tactical production problems by considering not only the existence of near and offshore suppliers of parts and components, but also the impact that procurement transport may involve on accomplishing production plans. In this sense, like Mula et al. (2010a), we can confirm the need for optimization models and tools for the production and procurement transport planning processes which contemplate different forms of long- and short-distance transport (railway, air, full truck load, grouping, milk round, routes, etc.) and different characteristics (legal or environmental restrictions). In this sense, we refer readers to Díaz-Madroño et al. (2012) and Mula et al. (2012) for some conceptual models. Analytical models based on these conceptual models are a forthcoming work; (2) growing customer requests and increasing competition make demand management an important part of the success and applicability of tactical production planning models. Thus, consideration of demand-driven tools and mass customization prac-

tices can be an important extension to bear in mind; (3) applying tactical planning models in real-world production environments in which uncertain conditions can also be considered; (4) real-world industrial problems often have several conflicting objectives. Thus, modeling realistic tactical production planning problem implies the use of multi-objective programming, which can deal with the trade-off among the conflicting goals; (5) studying solution approaches, such as mathematical programming optimization, metaheuristics and/or matheuristics, which deal with the complexities associated with the extensions identified in this work and previous gaps; (6) integration of these models with companies' information systems.

## 6 References

- Absi, N., Kedad-Sidhoum, S., 2008. The multi-item capacitated lot-sizing problem with setup times and shortage costs. *European Journal of Operational Research* 185, 1351–1374.
- Absi, N., Kedad-Sidhoum, S., Dauzere-Peres, S., 2011. Uncapacitated lot-sizing problem with production time windows, early productions, backlogs and lost sales. *International Journal of Production Research* 49, 2551–2566.
- Adams, F.P., Cox, J.F., 1985. Manufacturing resource planning: An information systems model. *Long Range Planning* 18, 86–92.
- Aghezzaf, E.-H., 2007. Production planning and warehouse management in supply networks with inter-facility mold transfers. *European Journal of Operational Research* 182, 1122–1139.
- Aghezzaf, E.H., Jamali, M.A., Ait-Kadi, D., 2007. An integrated production and preventive maintenance planning model. *European Journal of Operational Research* 181, 679–685.
- Aghezzaf, E.-H., Sitompul, C., Najid, N.M., 2010. Models for robust tactical planning in multi-stage production systems with uncertain demands. *Computers & Operations Research* 37, 880–889.
- Aghezzaf, E.-H., Sitompul, C., Van den Broecke, F., 2011. A robust hierarchical production planning for a capacitated two-stage production system. *Computers & Industrial Engineering* 60, 361–372.
- Ahkioon, S., Bulgak, A.A., Bektas, T., 2009. Cellular manufacturing systems design with routing flexibility, machine procurement, production planning and dynamic system reconfiguration. *International Journal of Production Research* 47, 1573–1600.

- Akartunali, K., Miller, A.J., 2009. A heuristic approach for big bucket multi-level production planning problems. *European Journal of Operational Research* 193, 396–411.
- Akbalik, A., Penz, B., 2009. Exact methods for single-item capacitated lot sizing problem with alternative machines and piece-wise linear production costs. *International Journal of Production Economics* 119, 367–379.
- Akbalik, A., Penz, B., 2011. Comparison of just-in-time and time window delivery policies for a single-item capacitated lot sizing problem. *International Journal of Production Research* 49, 2567–2585.
- Akbalik, A., Pochet, Y., 2009. Valid inequalities for the single-item capacitated lot sizing problem with step-wise costs. *European Journal of Operational Research* 198, 412–434.
- Aksen, D., 2007. Loss of customer goodwill in the uncapacitated lot-sizing problem. *Computers & Operations Research* 34, 2805–2823.
- Al-Ameri, T.A., Shah, N., Papageorgiou, L.G., 2008. Optimization of vendor-managed inventory systems in a rolling horizon framework. *Computers & Industrial Engineering* 54, 1019–1047.
- Albey, E., Bilge, U., 2011. A hierarchical approach to FMS planning and control with simulation-based capacity anticipation. *International Journal of Production Research* 49, 3319–3342.
- Almada-Lobo, B., James, R.J.W., 2010. Neighbourhood search meta-heuristics for capacitated lot-sizing with sequence-dependent setups. *International Journal of Production Research* 48, 861–878.
- Almada-Lobo, B., Klabjan, D., Carravilla, M.A., Oliveira, J.F., 2007. Single machine multi-product capacitated lot sizing with sequence-dependent setups. *International Journal of Production Research* 45, 4873–4894.
- Almada-Lobo, B., Oliveira, J.F., Carravilla, M.A., 2008. Production planning and scheduling in the glass container industry: A VNS approach. *International Journal of Production Economics* 114, 363–375.
- Almeder, C., 2010. A hybrid optimization approach for multi-level capacitated lot-sizing problems. *European Journal of Operational Research* 200, 599–606.
- Almeder, C., Preusser, M., Hartl, R.F., 2009. Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches? *OR Spectrum* 31, 95–119.
- Aloulou, M. A., A. Dolgui, M. Y. Kovalyov. 2014. A Bibliography of Non-deterministic Lot-sizing Models. *International Journal of Production Research* 52 (8), 2293-2310

- Alwan, L.C., Liu, J.J., Yao, D.-Q., 2008. Forecast facilitated lot-for-lot ordering in the presence of autocorrelated demand. *Computers & Industrial Engineering* 54, 840–850.
- Anily, S., Tzur, M., Wolsey, L.A., 2009. Multi-item lot-sizing with joint set-up costs. *Mathematical Programming* 119, 79–94.
- Anthony, R.N., 1965. Planning and control systems: a framework for analysis. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard University.
- Armentano, V.A., Shiguemoto, A.L., Lokketangen, A., 2011. Tabu search with path relinking for an integrated production-distribution problem. *Computers & Operations Research* 38, 1199–1209.
- Ashby, A., Leat, M., Hudson-Smith, M., 2012. Making connections: a review of supply chain management and sustainability literature. *Supply Chain Management: An International Journal* 17, 497–516.
- Asmundsson, J., Rardin, R.L., Turkseven, C.H., Uzsoy, R., 2009. Production Planning with Resources Subject to Congestion. *Naval Research Logistics* 56, 142–157.
- Azaron, A., Tang, O., Tavakkoli-Moghaddam, R., 2009. Dynamic lot sizing problem with continuous-time Markovian production cost. *International Journal of Production Economics* 120, 607–612.
- Baptiste, P., Alsene, E., Gaudimier, R., 2008. Integration of production and shipping planning: a co-operative approach. *Production Planning & Control* 19, 645–654.
- Barba-Gutierrez, Y., Adenso-Diaz, B., Gupta, S.M., 2008. Lot sizing in reverse MRP for scheduling disassembly. *International Journal of Production Economics* 111, 741–751.
- Bard, J.F., Nananukul, N., 2009. The integrated production-inventory-distribution-routing problem. *Journal of Scheduling* 12, 257–280.
- Barman, S., Hanna, M.D., LaForge, R.L., 2001. Perceived relevance and quality of POM journals: a decade later. *Journal of Operations Management* 19, 367–385.
- Beamon, B.M., Chen, V.C.P., 2001. Performance analysis of conjoined supply chains. *International Journal of Production Research* 39, 3195–3218.
- Begnaud, J., Benjaafar, S., Miller, L.A., 2009. The multi-level lot sizing problem with flexible production sequences. *IIE TRANSACTIONS* 41, 702–715.
- Benton, W.C., Whybark, D.C., 1982. Material requirements planning (MRP) and purchase discounts. *Journal of Operations Management* 2, 137–143.



- Berk, E., Toy, A.O., Hazir, O., 2008. Single item lot-sizing problem for a warm/cold process with immediate lost sales. *European Journal of Operational Research* 187, 1251–1267.
- Bilgen, B., Guenther, H.-O., 2010. Integrated production and distribution planning in the fast moving consumer goods industry: a block planning application. *OR Spectrum* 32, 927–955.
- Billington, P.J., McClain, J.O., Thomas, L.J., 1983. Mathematical programming approaches to capacity-constrained MRP systems: Review, formulation and problem reduction. *Management Science* 29, 1126–1141.
- Biswas, S., Narahari, Y., 2004. Object oriented modeling and decision support for supply chains. *European Journal of Operational Research* 153, 704–726.
- Bitran, G.R., Haas, E.A., Hax, A.C., 1981. Hierarchical Production Planning: A Single Stage System. *Operations Research* 29, 717–743.
- Bjork, K.-M., Carlsson, C., 2007. The effect of flexible lead times on a paper producer. *International Journal of Production Economics* 107, 139–150.
- Bobko, P.B., Whybark, D.C., 1985. The Coefficient of Variation as a Factor in Mrp Research. *Decision Sciences* 16, 420–427.
- Bogataj, L., Bogataj, M., 2007. The study of optimal additional investments in capacities for reduction of delays in value chain. *International Journal of Production Economics* 108, 281–290.
- Bollapragada, R., Della Croce, F., Ghirardi, M., 2011. Discrete-time, economic lot scheduling problem on multiple, non-identical production lines. *European Journal of Operational Research* 215, 89–96.
- Bouchriha, H., Ouhimmou, M., D'Amours, S., 2007. Lot sizing problem on a paper machine under a cyclic production approach. *International Journal of Production Economics* 105, 318–328.
- Boudia, M., Louly, M.A.O., Prins, C., 2007. A reactive GRASP and path relinking for a combined production-distribution problem. *Computers & Operations Research* 34, 3402–3419.
- Boudia, M., Louly, M.A.O., Prins, C., 2008. Fast heuristics for a combined production planning and vehicle routing problem. *Production Planning & Control* 19, 85–96.
- Boudia, M., Prins, C., 2009. A memetic algorithm with dynamic population management for an integrated production-distribution problem. *European Journal of Operational Research* 195, 703–715.

- Brahimi, N., Dauzere-Peres, S., Najid, N.M., 2006. Capacitated multi-item lot-sizing problems with time windows. *Operations Research* 54, 951–967.
- Brahimi, N., Dauzere-Peres, S., Najid, N.M., Nordli, A., 2006b. Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, 168(1), pp.1-16.
- Brahimi, N., Dauzere-Peres, S., Wolsey, L.A., 2010. Polyhedral and Lagrangian approaches for lot sizing with production time windows and setup times. *Computers & Operations Research* 37, 182–188.
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., Seuring, S., 2014. Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research* 233, 299–312.
- Brandimarte, P., 2006. Multi-item capacitated lot-sizing with demand uncertainty. *International Journal of Production Research* 44, 2997–3022.
- Buschkuehl, L., Sahling, F., Helber, S., Tempelmeier, H., 2010. Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches. *OR Spectrum* 32, 231–261.
- Buschkühl, L., Sahling, F., Helber, S., Tempelmeier, H., 2010. Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches. *OR Spectrum* 32, 231–261.
- Černý, V., 1985. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications* 45, 41–51.
- Chaabane, A., Ramudhin, A., Paquet, M., 2012. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme *International Journal of Production Economics* 135, 37–49.
- Chand, S., Hsu, V.N., Sethi, S., Deshpande, V., 2007. A dynamic lot sizing problem with multiple customers: customer-specific shipping and backlogging costs. *IIE Transactions* 39, 1059–1069.
- Chaudhry, S.S., Luo, W., 2005. Application of genetic algorithms in production and operations management: a review. *International Journal of Production Research* 43, 4083–4101.
- Cheaitou, A., Van Delft, C., Dallery, Y., Jemai, Z., 2009. Two-period production planning and inventory control. *International Journal of Production Economics* 118, 118–130.
- Chen, M., Sarin, S.C., Peake, A., 2010. Integrated lot sizing and dispatching in wafer fabrication. *Production Planning & Control* 21, 485–495.

- Chen, S.-P., Huang, W.-L., 2010. A membership function approach for aggregate production planning problems in fuzzy environments. *International Journal of Production Research* 48, 7003–7023.
- Christou, I.T., Lagodimos, A.G., Lycopoulou, D., 2007. Hierarchical production planning for multi-product lines in the beverage industry. *Production Planning & Control* 18, 367–376.
- Christou, I.T., Ponis, S., 2009. A hierarchical system for effective coordination of available-to-promise logic mechanisms. *International Journal of Production Research* 47, 3063–3078.
- Chung-Yee Lee, Çetinkaya, S., Wagelmans, A.P.M., 2001. A Dynamic Lot-Sizing Model with Demand Time Windows. *Management Science* 47, 1384–1395.
- Clark, A.R., Morabito, R., Toso, E.A.V., 2010. Production setup-sequencing and lot-sizing at an animal nutrition plant through atsp subtour elimination and patching. *Journal of Scheduling* 13, 111–121.
- Comelli, M., Gourgand, M., Lemoine, D., 2008. A review of tactical planning models. *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 17, 204–229.
- Cowdrick, R.M., 1995. Supply chain planning (SCP) — Concepts and case studies. *Computers & Industrial Engineering* 29, 245–248.
- Cristobal, M.P., Escudero, L.F., Monge, J.F., 2009. On stochastic dynamic programming for solving large-scale planning problems under uncertainty. *Computers & Operations Research* 36, 2418–2428.
- Czyzyk, J., Mesnier, M.P., Moré, J.J., 1998. The NEOS server. *Computational Science & Engineering, IEEE* 5, 68–75.
- De Araujo, S.A., Arenales, M.N., Clark, A.R., 2008. Lot sizing and furnace scheduling in small foundries. *Computers & Operations Research* 35, 916–932.
- Defersha, F.M., Chen, M., 2008. A linear programming embedded genetic algorithm for an integrated cell formation and lot sizing considering product quality. *European Journal of Operational Research* 187, 46–69.
- Degraeve, Z., Jans, R., 2007. A new dantzig-wolfe reformulation and branch-and-price algorithm for the capacitated lot-sizing problem with setup times. *Operations Research* 55, 909–920.
- Deif, A.M., 2011. A system model for green manufacturing. *Journal of Cleaner Production* 19, 1553–1559.
- Demirli, K., Yimer, A.D., 2008. Fuzzy scheduling of a build-to-order supply chain. *International Journal of Production Research* 46, 3931–3958.

- Deng, S., Yano, C., 2006. Joint production and pricing decisions with setup costs and capacity constraints. *Management Science* 52, 741–756.
- Denizel, M., Ferguson, M., Souza, G. “Gil” C., 2010. Multiperiod Remanufacturing Planning With Uncertain Quality of Inputs. *IEEE Transactions on Engineering Management* 57, 394–404.
- Denizel, M., Sural, H., 2006. On alternative mixed integer programming formulations and LP-based heuristics for lot-sizing with setup times. *Journal of the Operational Research Society* 57, 389–399.
- Denton, B.T., Forrest, J., Milne, R.J., 2006. IBM solves a mixed-integer program to optimize its semiconductor supply chain. *Interfaces* 36, 386–399.
- Depuy, G.W., Usher, J.S., Walker, R.L., Taylor, G.D., 2007. Production planning for remanufactured products. *Production Planning & Control* 18, 573–583.
- Díaz-Madroñero, M., Mula, J., Peidro, D., 2012. A Conceptual Model for MRP IV. En J. E. Hernández et al., eds. Decision Support Systems – Collaborative Models and Approaches in Real Environments. *Lecture Notes in Business Information Processing*. Springer Berlin Heidelberg, 14–25
- Dolgui, A., Ammar, O. B., Hnaien, F., Louly, M. A., 2013. A state of the art on supply planning and inventory control under lead time uncertainty. *Studies in Informatics and Control* 22(3), 255–268.
- Dolgui, A. & Prodhon, C., 2007. Supply planning under uncertainties in MRP environments: A state of the art. *Annual Reviews in Control* 31(2), 269–279.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., Coloni, A., 1996. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B* 26, 29–41.
- Drechsel, J., Kimms, A., 2011. Cooperative lot sizing with transshipments and scarce capacities: solutions and fair cost allocations. *International Journal of Production Research* 49, 2643–2668.
- Dudek, G., Stadtler, H., 2007. Negotiation-based collaborative planning in divergent two-tier supply chains. *International Journal of Production Research* 45, 465–484.
- Eksioglu, S., Romeijn, H., Pardalos, P., 2006. Cross-facility management of production and transportation planning problem. *Computers & Operations Research* 33, 3231–3251.
- Eksioglu, S.D., Eksioglu, B., Romeijn, H.E., 2007. A Lagrangean heuristic for integrated production and transportation planning problems in a dynamic, multi-item, two-layer supply chain. *IIE Transactions* 39, 191–201.

- Elhedhli, S., Merrick, R., 2012. Green supply chain network design to reduce carbon emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17, 370–379.
- Erromdhani, R., Eddaly, M. & Rebai, A., 2012. Hierarchical production planning with flexibility in agroalimentary environment: a case study. *Journal of Intelligent Manufacturing* 23(3), 811-819.
- Fandel, G., Stammen-Hegene, C., 2006. Simultaneous lot sizing and scheduling for multi-product multi-level production. *International Journal of Production Economics* 104, 308–316.
- Fazle Baki, M., B. A. Chaouch, and W. Abdul-Kader. 2014. “A Heuristic Solution Procedure for the Dynamic Lot Sizing Problem with Remanufacturing and Product Recovery.” *Computers & Operations Research* 43, 225–236
- Federgruen, A., Meissner, J., Tzur, M., 2007. Progressive interval heuristics for multi-item capacitated lot-sizing problems. *Operations Research* 55, 490–502.
- Feng, Y., Chen, S., Kumar, A., Lin, B., 2011. Solving single-product economic lot-sizing problem with non-increasing setup cost, constant capacity and convex inventory cost in  $O(N \log N)$  time. *Computers & Operations Research* 38, 717–722.
- Feng, Y., D’Amours, S., Beauregard, R., 2008. The value of sales and operations planning in oriented strand board industry with make-to-order manufacturing system: Cross functional integration under deterministic demand and spot market recourse. *International Journal of Production Economics* 115, 189–209.
- Feng, Y., D’Amours, S., Beauregard, R., 2010. Simulation and performance evaluation of partially and fully integrated sales and operations planning. *International Journal of Production Research* 48, 5859–5883.
- Feo, T.A., Resende, M.G.C., 1989. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations research letters* 8, 67–71.
- Ferguson, M., Guide, Jr., V.D., Koca, E., Souza, G.C., 2009. The Value of Quality Grading in Remanufacturing. *Production and Operations Management* 18, 300–314.
- Ferreira, D., Morabito, R., Rangel, S., 2009. Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 196, 697–706.
- Ferreira, D., Morabito, R., Rangel, S., 2010. Relax and fix heuristics to solve one-stage one-machine lot-scheduling models for small-scale soft drink plants. *Computers & Operations Research* 37, 684–691.

- Fleischhacker, A.J., Zhao, Y., 2011. Planning for demand failure: A dynamic lot size model for clinical trial supply chains. *European Journal of Operational Research* 211, 496–506.
- Gaglioppa, F., Miller, L.A., Benjaafar, S., 2008. Multitask and multistage production planning and scheduling for process industries. *Operations Research* 56, 1010–1025.
- Galasso, F., Merce, C., Grabot, B., 2009. Decision support framework for supply chain planning with flexible demand. *International Journal of Production Research* 47, 455–478.
- Genin, P., Lamouri, S., Thomas, A., 2008. Multi-facilities tactical planning robustness with experimental design. *Production Planning & Control* 19, 171–182.
- Geunes, J., Romeijn, H., Taaffe, K., 2006. Requirements planning with pricing and order selection flexibility. *Operations Research* 54, 394–401.
- Gicquel, C., Miegeville, N., Minoux, M., Dallery, Y., 2009. Discrete lot sizing and scheduling using product decomposition into attributes. *Computers & Operations Research* 36, 2690–2698.
- Glover, F., 1989. Tabu search—part I. *ORSA Journal on computing* 1, 190–206.
- Glover, F., 1990. Tabu search—part II. *ORSA Journal on computing* 2, 4–32.
- Glover, F., 1998. A template for scatter search and path relinking, in: *Artificial Evolution*. Springer, pp. 1–51.
- Glover, F., Laguna, M., Martí, R., 2000. Fundamentals of scatter search and path relinking. *Control and cybernetics* 39, 653–684.
- Glover, F., McMillan, C., 1986. The general employee scheduling problem. An integration of MS and AI. *Computers & Operations Research* 13, 563–573.
- Gonzalez-Ramirez, R.G., Smith, N.R., Askin, R.G., 2011. A heuristic approach for a multi-product capacitated lot-sizing problem with pricing. *International Journal of Production Research* 49, 1173–1196.
- Goren, H. G., S. Tunali, and R. Jans. 2012. A Hybrid Approach for the Capacitated Lot Sizing Problem with Setup Carryover. *International Journal of Production Research* 50 (6): 1582–1597
- Gramani, M.C.N., Franca, P.M., 2006. The combined cutting stock and lot-sizing problem in industrial processes. *European Journal of Operational Research* 174, 509–521.

- Gramani, M.C.N., Franca, P.M., Arenales, M.N., 2009. A Lagrangian relaxation approach to a coupled lot-sizing and cutting stock problem. *International Journal of Production Economics* 119, 219–227.
- Gropp, W., Moré, J., 1997. Approximation Theory and Optimization, M. D. Buhmann and A. Iserles, eds., pages 167-182, Cambridge University Press, 1997
- Grosfeld-Nir, A., and Y. Gerchak. 2004. “Multiple Lotsizing in Production to Order with Random Yields: Review of Recent Advances.” *Annals of Operations Research* 126 (1–4), 43–69
- Grubbstrom, R., Huynh, T., 2006a. Multi-level, multi-stage capacity-constrained production-inventory systems in discrete time with non-zero lead times using MRP theory. *International Journal of Production Economics* 101, 53–62.
- Grubbström, R.W., 1999. A net present value approach to safety stocks in a multi-level MRP system. *International Journal of Production Economics* 59, 361–375.
- Grubbstrom, R.W., Huynh, T.T.T., 2006b. Analysis of standard ordering policies within the framework of MRP theory. *International Journal of Production Research* 44, 3759–3773.
- Grubbström, R.W., Molinder, A., 1994. Further theoretical considerations on the relationship between MRP, input-output analysis and multi-echelon inventory systems. *International Journal of Production Economics* 35, 299–311.
- Grubbström, R.W., Molinder, A., 1996. Safety production plans in MRP-systems using transform methodology. *International Journal of Production Economics* 46–47, 297–309.
- Grubbström, R.W., Ovrin, P., 1992. Intertemporal generalization of the relationship between material requirements planning and input-output analysis. *International Journal of Production Economics* 26, 311–318.
- Guan, Y., Ahmed, S., Nemhauser, G.L., 2009. Cutting Planes for Multistage Stochastic Integer Programs. *Operations Research* 57, 287–298.
- Guan, Y., Miller, A.J., 2008. Polynomial-Time Algorithms for Stochastic Uncapacitated Lot-Sizing Problems. *Operations Research* 56, 1172–1183.
- Guan, Z., Philpott, A.B., 2011. A multistage stochastic programming model for the New Zealand dairy industry. *International Journal of Production Economics* 134, 289–299.
- Guide Jr, V.D.R., Van Wassenhove, L.N., 2002. The reverse supply chain. *Harvard Business Review* 80, 25–26.

- Gunnarsson, H., Ronnqvist, M., 2008. Solving a multi-period supply chain problem for a pulp company using heuristics-An application to Sodra Cell AB. *International Journal of Production Economics* 116, 75–94.
- Gupta, A., Maranas, C.D., McDonald, C.M., 2000. Mid-term supply chain planning under demand uncertainty: customer demand satisfaction and inventory management. *Computers & Chemical Engineering* 24, 2613–2621.
- Gutierrez, J., Sedeno-Noda, A., Colebrook, M., Sicilia, J., 2008. An efficient approach for solving the lot-sizing problem with time-varying storage capacities. *European Journal of Operational Research* 189, 682–693.
- Haugen, K.K., Olstad, A., Pettersen, B.I., 2007. The profit maximizing capacitated lot-size (PCLSP) problem. *European Journal of Operational Research* 176, 165–176.
- HAX, A., 1975. Aggregate Production Planning. *Operations Research* 23, B368–B368.
- Hax, A.C., Meal, H.C., 1973. Hierarchical integration of production planning and scheduling. DTIC Document.
- Helber, S., Sahling, F., 2010. A fix-and-optimize approach for the multi-level capacitated lot sizing problem. *International Journal of Production Economics* 123, 247–256.
- Ho, J.C., Chang, Y.-L., Solis, A.O., 2006. Two modifications of the least cost per period heuristic for dynamic lot-sizing. *Journal of the Operational Research Society* 57, 1005–1013.
- Ho, J.C., Solis, A.O., Chang, Y.-L., 2007. An evaluation of lot-sizing heuristics for deteriorating inventory in material requirements planning systems. *Computers & Operations Research* 34, 2562–2575.
- Holland, J.H., 1975. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. University of Michigan Press.
- Hsu, H.-M., Su, T.-S., Wu, M.-C., Huang, L.-C., 2009. Multiple lot-sizing decisions with an interrupted geometric yield and variable production time. *Computers & Industrial Engineering* 57, 699–706.
- Huh, W.T., Kachani, S., Sadighian, A., 2010. Optimal Pricing and Production Planning for Subscription-Based Products. *Production and Operations Management* 19, 19–39.
- Hwang, H.-C., 2007. Dynamic lot-sizing model with production time windows. *Naval Research Logistics* 54, 692–701.



- Hwang, H.-C., 2010. Economic Lot-Sizing for Integrated Production and Transportation. *Operations Research* 58, 428–444.
- Hwang, H.-C., Jaruphongsa, W., 2008. Dynamic lot-sizing model for major and minor demands. *European Journal of Operational Research* 184, 711–724.
- Hwang, H.-C., Jaruphongsa, W., Cetinkaya, S., Lee, C.-Y., 2010. Capacitated dynamic lot-sizing problem with delivery/production time windows. *Operations Research Letters* 38, 408–413.
- Ibarra-Rojas, O.J., Ríos-Mercado, R.Z., Rios-Solis, Y.A., Saucedo-Espinosa, M.A., 2011. A decomposition approach for the piece–mold–machine manufacturing problem. *International Journal of Production Economics* 134, 255–261.
- Jamalnia, A., Soukhakian, M.A., 2009. A hybrid fuzzy goal programming approach with different goal priorities to aggregate production planning. *Computers & Industrial Engineering* 56, 1474–1486.
- James, R.J.W., Almada-Lobo, B., 2011. Single and parallel machine capacitated lotsizing and scheduling: New iterative MIP-based neighborhood search heuristics. *Computers & Operations Research* 38, 1816–1825.
- Jayaraman, V., 2006. Production planning for closed-loop supply chains with product recovery and reuse: an analytical approach. *International Journal of Production Research* 44, 981–998.
- Jozefowska, J., Zimniak, A., 2008. Optimization tool for short-term production planning and scheduling. *International Journal of Production Economics* 112, 109–120.
- Jung, H., Chen, F.F., Jeong, B., 2008a. Decentralized supply chain planning framework for third party logistics partnership. *Computers & Industrial Engineering* 55, 348–364.
- Jung, H., Jeong, B., Lee, C.-G., 2008b. An order quantity negotiation model for distributor-driven supply chains. *International Journal of Production Economics* 111, 147–158.
- Kaczmarczyk, W., 2011. Proportional lot-sizing and scheduling problem with identical parallel machines. *International Journal of Production Research* 49, 2605–2623.
- Kanyalkar, A.P., Adil, G.K., 2007. Aggregate and detailed production planning integrating procurement and distribution plans in a multi-site environment. *International Journal of Production Research* 45, 5329–5353.
- Karabuk, S., 2008. Production planning under uncertainty in textile manufacturing. *Journal of the Operational Research Society* 59, 510–520.

- Karimi, B., Fatemi Ghomi, S.M.T., Wilson, J.M., 2003. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega* 31, 365–378.
- Karimi, B., Ghomi, S., Wilson, J., 2006. A tabu search heuristic for solving the CLSP with backlogging and set-up carry-over. *Journal of the Operational Research Society* 57, 140–147.
- Karni, R., 1981. Integer linear programming formulation of the material requirements planning problem. *Journal of Optimization Theory and Applications* 35, 217–230.
- Kefeli, A., Uzsoy, R., Fathi, Y., Kay, M., 2011. Using a mathematical programming model to examine the marginal price of capacitated resources. *International Journal of Production Economics* 131, 383–391.
- Kennedy, J., Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995, pp. 1942–1948 vol.4.
- Kenneth, W. G., P. J. Zelbst, J. Meacham, and V. S. Bhadauria. 2012. “Green Supply Chain Management Practices: Impact on Performance.” *Supply Chain Management: An International Journal* 17, 290–305
- Kim, H., Lee, D., Xirouchakis, P., 2006. Two-phase heuristic for disassembly scheduling with multiple product types and parts commonality. *International Journal of Production Research* 44, 195–212.
- Kim, H.-J., Xirouchakis, P., 2010. Capacitated disassembly scheduling with random demand. *International Journal of Production Research* 48, 7177–7194.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P., 1983. Optimization by Simulated Annealing. *Science* 220, 671–680.
- Ko, M., A. Tiwari, J. Mehnen. 2010. A Review of Soft Computing Applications in Supply Chain Management. *Applied Soft Computing* 10, 661–674
- Koerpeoglu, E., Yaman, H., Akturk, M.S., 2011. A multi-stage stochastic programming approach in master production scheduling. *European Journal of Operational Research* 213, 166–179.
- Koh, S. C. L., S. M. Saad, M. H. Jones. 2002. Uncertainty under MRP-planned Manufacture: Review and Categorization. *International Journal of Production Research* 40, 2399–2421
- Kucukyavuz, S., Pochet, Y., 2009. Uncapacitated lot sizing with backlogging: the convex hull. *Mathematical Programming* 118, 151–175.
- Lan, Y., Zhao, R., Tang, W., 2011. Minimum risk criterion for uncertain production planning problems. *Computers & Industrial Engineering* 61, 591–599.

- Lang, J.C., Domschke, W., 2010. Efficient reformulations for dynamic lot-sizing problems with product substitution. *OR Spectrum* 32, 263–291.
- Lang, J.C., Shen, Z.-J.M., 2011. Fix-and-optimize heuristics for capacitated lot-sizing with sequence-dependent setups and substitutions. *European Journal of Operational Research* 214, 595–605.
- Leung, S., Wu, Y., Lai, K., 2006. A stochastic programming approach for multi-site aggregate production planning. *Journal of the Operational Research Society* 57, 123–132.
- Leung, S.C.H., Chan, S.S.W., 2009. A goal programming model for aggregate production planning with resource utilization constraint. *Computers & Industrial Engineering* 56, 1053–1064.
- Leung, S.C.H., Lai, K.K., Ng, W.-L., Wu, Y., 2007a. A robust optimization model for production planning of perishable products. *Journal of the Operational Research Society* 58, 413–422.
- Leung, S.C.H., Ng, W.L., 2007a. A stochastic programming model for production planning of perishable products with postponement. *Production Planning & Control* 18, 190–202.
- Leung, S.C.H., Ng, W.L., 2007b. A goal programming model for production planning of perishable products with postponement. *Computers & Industrial Engineering* 53, 531–541.
- Leung, S.C.H., Tsang, S.O.S., Ng, W.L., Wu, Y., 2007b. A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment. *European Journal of Operational Research* 181, 224–238.
- Li, C., Liu, F., Cao, H., Wang, Q., 2009a. A stochastic dynamic programming based model for uncertain production planning of re-manufacturing system. *International Journal of Production Research* 47, 3657–3668.
- Li, H., Meissner, J., 2011. Competition under capacitated dynamic lot-sizing with capacity acquisition. *International Journal of Production Economics* 131, 535–544.
- Li, H., You, T., Luo, X., 2011. Collaborative supply chain planning under dynamic lot sizing costs with capacity decision. *Journal of Systems Engineering and Electronics* 22, 247–256.
- Li, J., Gonzalez, M., Zhu, Y., 2009b. A hybrid simulation optimization method for production planning of dedicated remanufacturing. *International Journal of Production Economics* 117, 286–301.

- Li, L., Fonseca, D.J., Chen, D.-S., 2006a. Earliness-tardiness production planning for just-in-time manufacturing: A unifying approach by goal programming. *European Journal of Operational Research* 175, 508–515.
- Li, Y., Chen, J., Cai, X., 2006b. Uncapacitated production planning with multiple product types, returned product remanufacturing, and demand substitution. *OR Spectrum* 28, 101–125.
- Li, Y., Chen, J., Cai, X., 2007. Heuristic genetic algorithm for capacitated production planning problems with batch processing and remanufacturing. *International Journal of Production Economics* 105, 301–317.
- Liang, T.-F., 2007. Application of interactive possibilistic linear programming to aggregate production planning with multiple imprecise objectives. *Production Planning & Control* 18, 548–560.
- Liang, T.-F., 2008. Integrating production-transportation planning decision with fuzzy multiple goals in supply chains. *International Journal of Production Research* 46, 1477–1494.
- Lin, J.T., Chen, T.-L., Lin, Y.-T., 2009. Critical material planning for TFT-LCD production industry. *International Journal of Production Economics* 122, 639–655.
- Liu, X., Chu, F., Chu, C., Wang, C., 2007. Lot sizing with bounded inventory and lost sales. *International Journal of Production Research* 45, 5881–5894.
- Liu, X., Tu, Y., 2008a. Production planning with limited inventory capacity and allowed stockout. *International Journal of Production Economics* 111, 180–191.
- Liu, X., Tu, Y., 2008b. Capacitated production planning with outsourcing in an OKP company. *International Journal of Production Research* 46, 5781–5795.
- Liu, X., Tu, Y.L., Zhang, J., Watson, L.G., 2008. A genetic algorithm heuristic approach to general outsourcing capacitated production planning problems. *International Journal of Production Research* 46, 5059–5074.
- Lu, L., Qi, X., 2011. Dynamic lot sizing for multiple products with a new joint replenishment model. *European Journal of Operational Research* 212, 74–80.
- Lukac, Z., Soric, K., Rosenzweig, V.V., 2008. Production planning problem with sequence dependent setups as a bilevel programming problem. *European Journal of Operational Research* 187, 1504–1512.
- Lusa, A., Corominas, A., Olivella, J., Pastor, R., 2009. Production planning under a working time accounts scheme. *International Journal of Production Research* 47, 3435–3451.
- Mabert, V.A., 2007. The early road to material requirements planning. *Journal of Operations Management* 25, 346–356.

- Masud, A.S.M., Hwang, C.L., 1980. An aggregate production planning model and application of three multiple objective decision methods†. *International Journal of Production Research* 18, 741–752.
- Mateus, G.R., Ravetti, M.G., De Souza, M.C., Valeriano, T.M., 2010. Capacitated lot sizing and sequence dependent setup scheduling: an iterative approach for integration. *Journal of Scheduling* 13, 245–259.
- McDonald, C.M., Karimi, I.A., 1997. Planning and scheduling of parallel semicontinuous processes. 1. Production planning. *Industrial & engineering chemistry research* 36, 2691–2700.
- Mehrotra, M., Dawande, M., Gavirneni, S., Demirci, M., Tayur, S., 2011. Production Planning with Patterns: A Problem from Processed Food Manufacturing. *Operations Research* 59, 267–282.
- Menezes, A.A., Clark, A., Almada-Lobo, B., 2011. Capacitated lot-sizing and scheduling with sequence-dependent, period-overlapping and non-triangular setups. *Journal of Scheduling* 14, 209–219.
- Merzifonluoglu, Y., Geunes, J., 2006. Uncapacitated production and location planning models with demand fulfillment flexibility. *International Journal of Production Economics* 102, 199–216.
- Merzifonluoglu, Y., Geunes, J., Romeijn, H.E., 2007. Integrated capacity, demand, and production planning with subcontracting and overtime options. *Naval Research Logistics* 54, 433–447.
- Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J., Malekly, H., Aryanezhad, M.B., 2011. A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty. *International Journal of Production Economics* 134, 28–42.
- Missbauer, H. & Uzsoy, R., 2011. Optimization Models of Production Planning Problems. In K. G. Kempf, P. Keskinocak, & R. Uzsoy, eds. *Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise. International Series in Operations Research & Management Science*. Springer, pp. 437-507
- Mladenović, N., Hansen, P., 1997. Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research* 24, 1097–1100.
- Mocquillon, C., Lente, C., T'Kindt, V., 2011. An efficient heuristic for medium-term planning in shampoo production. *International Journal of Production Economics* 129, 178–185.
- Mohan, S., M. Gopalakrishnan, R. Marathe, A. Rajan. 2012. A Note on Modelling the Capacitated Lot-sizing Problem with Set-up Carryover and Set-up Splitting. *International Journal of Production Research* 50, 5538–5543

- Mohebbi, E., Choobineh, F., Pattanayak, A., 2007. Capacity-driven vs. demand-driven material procurement systems. *International Journal of Production Economics* 107, 451–466.
- Moscato, P., 1989. On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms. Caltech concurrent computation program, C3P Report 826, 1989.
- Mula, J., M. Díaz-Madroño, D. Peidro. 2012. A Conceptual Model for Integrating Transport Planning: MRP IV. In *Advances in Production Management Systems. Value Networks: Innovation, Technologies, and Management*. IFIP Advances in Information and Communication Technology, edited by J. Frick and B. T. Laugen, 54–65. Berlin: Springer.
- Mula, J., Peidro, D., Díaz-Madroño, M., Vicens, E., 2010a. Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research* 204, 377–390.
- Mula, J., Peidro, D., Poler, R., 2010b. The effectiveness of a fuzzy mathematical programming approach for supply chain production planning with fuzzy demand. *International Journal of Production Economics* 128, 136–143.
- Mula, J., Poler, R., Garcia-Sabater, J.P., 2008. Capacity and material requirement planning modelling by comparing deterministic and fuzzy models. *International Journal of Production Research* 46, 5589–5606.
- Mula, J., Poler, R., García-Sabater, J.P., Lario, F.C., 2006. Models for production planning under uncertainty: A review. *International Journal of Production Economics* 103, 271–285.
- Naeem, M. A., D. J. Dias, R. Tibrewal, P. C. Chang, M. K. Tiwari. 2013. Production Planning Optimization for Manufacturing and Remanufacturing System in Stochastic Environment. *Journal of Intelligent Manufacturing* 24, 717–728
- Nagar, L., Jain, K., 2008. Supply chain planning using multi-stage stochastic programming. *Supply Chain Management-An International Journal* 13, 251–256.
- Najid, N.M., Alaoui-Selsouli, M., Mohafid, A., 2011. An integrated production and maintenance planning model with time windows and shortage cost. *International Journal of Production Research* 49, 2265–2283.
- Nascimento, M.C.V., Resende, M.G.C., Toledo, F.M.B., 2010. GRASP heuristic with path-relinking for the multi-plant capacitated lot sizing problem. *European Journal of Operational Research* 200, 747–754.
- Nourelfath, M., 2011. Service level robustness in stochastic production planning under random machine breakdowns. *European Journal of Operational Research* 212, 81–88.

- OGrady, P., 1982. Determining the Master Production Schedule, *Journal of Operations Research Society* 33, 658–658.
- Okhrin, I., Richter, K., 2011a. An  $O(T(3))$  algorithm for the capacitated lot sizing problem with minimum order quantities. *European Journal of Operational Research* 211, 507–514.
- Okhrin, I., Richter, K., 2011b. The linear dynamic lot size problem with minimum order quantity. *International Journal of Production Economics* 133, 688–693.
- Omar, M.K., Bennell, J.A., 2009. Revising the master production schedule in a HPP framework context. *International Journal of Production Research* 47, 5857–5878.
- Omar, M.K., Teo, S.C., 2007. Hierarchical production planning and scheduling in a multi-product, batch process environment. *International Journal of Production Research* 45, 1029–1047.
- Onal, M., Romeijn, H.E., 2010. Multi-Item Capacitated Lot-Sizing Problems with Setup Times and Pricing Decisions. *Naval Research Logistics* 57, 172–187.
- Ornek, A.M., Cengiz, O., 2006. Capacitated lot sizing with alternative routings and overtime decisions. *International Journal of Production Research* 44, 5363–5389.
- Ouhimmou, M., D'Amours, S., Beaugard, R., Ait-Kadi, D., Chauhan, S.S., 2008. Furniture supply chain tactical planning optimization using a time decomposition approach. *European Journal of Operational Research* 189, 952–970.
- Ozturk, C., Ornek, A.M., 2010. Capacitated lot sizing with linked lots for general product structures in job shops. *Computers & Industrial Engineering* 58, 151–164.
- Pal, A., Chan, F.T.S., Mahanty, B., Tiwari, M.K., 2011. Aggregate procurement, production, and shipment planning decision problem for a three-echelon supply chain using swarm-based heuristics. *International Journal of Production Research* 49, 2873–2905.
- Palaniappan, P.L.K., Jawahar, N., 2011. A genetic algorithm for simultaneous optimisation of lot sizing and scheduling in a flow line assembly. *International Journal of Production Research* 49, 375–400.
- Pan, Z., Tang, J., Liu, O., 2009. Capacitated dynamic lot sizing problems in closed-loop supply chain. *European Journal of Operational Research* 198, 810–821.
- Pastor, R., Altimiras, J., Mateo, M., 2009. Planning production using mathematical programming: The case of a woodturning company. *Computers & Operations Research* 36, 2173–2178.
- Peidro, D., Mula, J., Jimenez, M., Del Mar Botella, M., 2010. A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment. *European Journal of Operational Research* 205, 65–80.

- Peidro, D., Mula, J., Poler, R., Lario, F.-C., 2009. Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 43, 400–420.
- Petrovic, D., Akoez, O., 2008. A fuzzy goal programming approach to integrated loading and scheduling of a batch processing machine. *Journal of the Operational Research Society* 59, 1211–1219.
- Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., Zaidi, M., 2005. The bees algorithm. Technical note. Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK.
- Pineyro, P., Viera, O., 2010. The economic lot-sizing problem with remanufacturing and one-way substitution. *International Journal of Production Economics* 124, 482–488.
- Pitakaso, R., Almeder, C., Doerner, K.F., Hartl, R.F., 2006. Combining population-based and exact methods for multi-level capacitated lot-sizing problems. *International Journal of Production Research* 44, 4755–4771.
- Pitakaso, R., Almeder, C., Doerner, K.F., Hartl, R.F., 2007. A MAX-MIN ant system for unconstrained multi-level lot-sizing problems. *Computers & Operations Research* 34, 2533–2552.
- Pochet, Y., 2001. Mathematical Programming Models and Formulations for Deterministic Production Planning Problems, in: Jünger, M., Naddef, D. (Eds.), Computational Combinatorial Optimization, *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 57–111.
- Pochet, Y., Wolsey, L.A., 2010. Single item lot-sizing with non-decreasing capacities. *Mathematical Programming* 121, 123–143.
- Qu, X., Williams, J.A.S., 2008. An analytical model for reverse automotive production planning and pricing. *European Journal of Operational Research* 190, 756–767.
- Quadt, D., Kuhn, H., 2008. Capacitated lot-sizing with extensions: a review. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research* 6, 61–83.
- Quadt, D., Kuhn, H., 2009. Capacitated Lot-Sizing and Scheduling with Parallel Machines, Back-Orders, and Setup Carry-Over. *Naval Research Logistics* 56, 366–384.
- Ram, B., Naghshineh-Pour, M., Yu, X., 2006. Material requirements planning with flexible bills-of-material. *International Journal of Production Research* 44, 399–415.



- Rizk, N., Martel, A., D'Amours, S., 2006a. Multi-item dynamic production-distribution planning in process industries with divergent finishing stages. *Computers & Operations Research* 33, 3600–3623.
- Rizk, N., Martel, A., D'Amours, S., 2008. Synchronized production-distribution planning in a single-plant multi-destination network. *Journal of the Operational Research Society* 59, 90–104.
- Rizk, N., Martel, A., Ramudhin, A., 2006b. A Lagrangean relaxation algorithm for multi-item lot-sizing problems with joint piecewise linear resource costs. *International Journal of Production Economics* 102, 344–357.
- Roberts, H.J., Barrar, P.R.N., 1992. MRPII implementation: key factors for success. *Computer Integrated Manufacturing Systems* 5, 31–38.
- Romero, D., Vermeulen, D., 2009. Existence of equilibria in a decentralized two-level supply chain. *European Journal of Operational Research* 197, 642–658.
- Rong, C., Takahashi, K., Morikawa, K., 2006. MRP rescheduling heuristics with capacity extension under deterministic demand. *Computers & Industrial Engineering* 51, 2–13.
- Safaei, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., 2009. Integrated multi-period cell formation and subcontracting production planning in dynamic cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Economics* 120, 301–314.
- Sahinidis, N.V., 2004. Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. *Computers & Chemical Engineering* 28, 971–983.
- Sahling, F., Buschkuehl, L., Tempelmeier, H., Helber, S., 2009. Solving a multi-level capacitated lot sizing problem with multi-period setup carry-over via a fix-and-optimize heuristic. *Computers & Operations Research* 36, 2546–2553.
- Salomon, M., Kroon, L.G., Kuik, R., Wassenhove, L.N.V., 1991. Some Extensions of the Discrete Lotsizing and Scheduling Problem. *Management Science* 37, 801–812.
- Santos, M.O., Massago, S., Almada-Lobo, B., 2010. Infeasibility handling in genetic algorithm using nested domains for production planning. *Computers & Operations Research* 37, 1113–1122.
- Sargut, F.Z., Romeijn, H.E., 2007. Capacitated production and subcontracting in a serial supply chain. *IIE Transactions* 39, 1031–1043.
- Schulz, T., 2011. A new Silver-Meal based heuristic for the single-item dynamic lot sizing problem with returns and remanufacturing. *International Journal of Production Research* 49, 2519–2533.

- Schütz, P., Tomasgard, A., 2011. The impact of flexibility on operational supply chain planning. *International Journal of Production Economics* 134, 300–311.
- Selcuk, B., Fransoo, J.C., De Kok, A.G., 2006. The effect of updating lead times on the performance of hierarchical planning systems. *International Journal of Production Economics* 104, 427–440.
- Selcuk, B., Fransoo, J.C., De Kok, A.G., 2008. Work-in-process clearing in supply chain operations planning. *IIE Transactions* 40, 206–220.
- Seuring, S. 2013. A Review of Modeling Approaches for Sustainable Supply Chain Management. *Decision Support Systems* 54, 1513–1520
- Shaikh, N., Prabhu, V., Abril, D., Sánchez, D., Arias, J., Rodríguez, E., Riaño, G., 2011. Kimberly-Clark Latin America Builds an Optimization-Based System for Machine Scheduling. *Interfaces* 41, 455–465.
- Shi, J., Zhang, G., Sha, J., 2011. Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return. *Computers & Operations Research* 38, 641–650.
- Shi, Y., Eberhart, R., 1998. A modified particle swarm optimizer, in Proceedings of IEEE World Congress on Computational Intelligence, pp. 69–73.
- Shorrock, B., Orlicky, J., 1978. Material Requirements Planning. *Journal of the Operational Research Society* 29, 91.
- Smith, N.R., Martinez-Flores, J.L., 2007. Discrepancies in solutions between traditional and net present value formulations of finite horizon, discrete-time economic lot size problems. *International Journal of Production Research* 45, 5731–5741.
- Sodhi, M.S., Tang, C.S., 2009. Modeling supply-chain planning under demand uncertainty using stochastic programming: A survey motivated by asset-liability management. *International Journal of Production Economics* 121, 728–738.
- Sridharan, V., Berry, W.L., Udayabhanu, V., 1987. Freezing the Master Production Schedule Under Rolling Planning Horizons. *Management Science* 33, 1137–1149.
- Stadtler, H., 2011. Multi-level single machine lot-sizing and scheduling with zero lead times. *European Journal of Operational Research* 209, 241–252.
- Stadtler, H. Sahling, F., 2013. A lot-sizing and scheduling model for multi-stage flow lines with zero lead times. *European Journal of Operational Research*, 225, 404-419.
- Suerie, C., 2006. Modeling of period overlapping setup times. *European Journal of Operational Research* 174, 874–886.

- Sun, G., Lee, L.H., Chew, E.P., Shao, J., 2010. A gradient search and column generation approach for the build-pack planning problem with approved vendor matrices and stochastic demand. *International Journal of Production Research* 48, 5783–5807.
- Sundarakani, B., de Souza, R., Goh, M., Wagner, S.M., Manikandan, S., 2010. Modeling carbon footprints across the supply chain. *International Journal of Production Economics* 128, 43–50.
- Sural, H., Denizel, M., Van Wassenhove, L.N., 2009. Lagrangean relaxation based heuristics for lot sizing with setup times. *European Journal of Operational Research* 194, 51–63.
- Taskin, Z.C., Uenal, A.T., 2009. Tactical level planning in float glass manufacturing with co-production, random yields and substitutable products. *European Journal of Operational Research* 199, 252–261.
- Tempelmeier, H., 2007. On the stochastic uncapacitated dynamic single-item lot sizing problem with service level constraints. *European Journal of Operational Research* 181, 184–194.
- Tempelmeier, H., Buschkuehl, L., 2008. Dynamic multi-machine lot sizing and sequencing with simultaneous scheduling of a common setup resource. *International Journal of Production Economics* 113, 401–412.
- Tempelmeier, H., Buschkuehl, L., 2009. A heuristic for the dynamic multi-level capacitated lot sizing problem with linked lot sizes for general product structures. *OR Spectrum* 31, 385–404.
- Tempelmeier, H., Herpers, S., 2011. Dynamic uncapacitated lot sizing with random demand under a fillrate constraint. *European Journal of Operational Research* 212, 497–507.
- Teunter, R.H., Bayindir, Z.P., Van Den Heuvel, W., 2006. Dynamic lot sizing with product returns and remanufacturing. *International Journal of Production Research* 44, 4377–4400.
- Tian, F., Willems, S.P., Kempf, K.G., 2011. An iterative approach to item-level tactical production and inventory planning. *International Journal of Production Economics* 133, 439–450.
- Timm, T., Blecken, A., 2011. A method for the hierarchical planning of the structure, dimension and material requirements of manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 49, 3431–3453.
- Toledo, C.F.M., Franca, P.M., Morabito, R., Kimms, A., 2009. Multi-population genetic algorithm to solve the synchronized and integrated two-level lot sizing and scheduling problem. *International Journal of Production Research* 47, 3097–3119.

- Toledo, F.M.B., Armentano, V.A., 2006. A Lagrangian-based heuristic for the capacitated lot-sizing problem in parallel machines. *European Journal of Operational Research* 175, 1070–1083.
- Tonaki, V.S., Toledo, F.M.B., 2010. An approach for solving the lot-sizing problem of a market-driven foundry. *Journal of the Operational Research Society* 61, 108–114.
- Torabi, S.A., Hassini, E., 2009. Multi-site production planning integrating procurement and distribution plans in multi-echelon supply chains: an interactive fuzzy goal programming approach. *International Journal of Production Research* 47, 5475–5499.
- Toso, E.A.V., Morabito, R., Clark, A.R., 2009. Lot sizing and sequencing optimisation at an animal-feed plant. *Computers & Industrial Engineering* 57, 813–821.
- Transchel, S., Minner, S., Kallrath, J., Loehndorf, N., Eberhard, U., 2011. A hybrid general lot-sizing and scheduling formulation for a production process with a two-stage product structure. *International Journal of Production Research* 49, 2463–2480.
- Van den broecke, F., Van Landeghem, H., Aghezzaf, E.-H., 2008. Implementing a near-optimal solution for the multi-stage, multi-product capacitated lot-sizing problem by rolling out a cyclical production plan. *International Journal of Production Economics* 112, 121–137.
- Van den Heuvel, W., Borm, P., Hamers, H., 2007. Economic lot-sizing games. *European Journal of Operational Research* 176, 1117–1130.
- Van den Heuvel, W., Wagelmans, A., 2006. A polynomial time algorithm for a deterministic joint pricing and inventory model. *European Journal of Operational Research* 170, 463–480.
- Van Vyve, M., 2006. Linear-programming extended formulations for the single-item lot-sizing problem with backlogging and constant capacity. *Mathematical Programming* 108, 53–77.
- Van Vyve, M., Wolsey, L., 2006. Approximate extended formulations. *Mathematical Programming* 105, 501–522.
- Verdegay, J.L., Yager, R.R., Bonissone, P.P., 2008. On heuristics as a fundamental constituent of soft computing. *Fuzzy Sets and Systems* 159, 846–855.
- Voss, S., Osman, I.H., Roucairol, C. (Eds.), 1999. *Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA.

- Wei, C., Li, Y., Cai, X., 2011. Robust optimal policies of production and inventory with uncertain returns and demand. *International Journal of Production Economics* 134, 357–367.
- Whybark, D.C., Williams, J.G., 1976. Material Requirements Planning Under Uncertainty. *Decision Sciences* 7, 595–606.
- Wolsey, L., 2006. Lot-sizing with production and delivery time windows. *Mathematical Programming* 107, 471–489.
- Wong, B.K., Lai, V.S., 2011. A survey of the application of fuzzy set theory in production and operations management: 1998–2009. *International Journal of Production Economics* 129, 157–168.
- Wu, C.-H., Lin, J.T., Wu, H.-H., 2010. Robust production and transportation planning in thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) industry under demand and price uncertainties. *International Journal of Production Research* 48, 6037–6060.
- Wu, M.-C., Huang, L.-C., Hsu, H.-M., Su, T.-S., 2011a. Multiple lot-sizing decisions in a two-stage production with an interrupted geometric yield and non-rigid demand. *Journal of the Operational Research Society* 62, 1075–1084.
- Wu, T., Shi, L., Geunes, J., Akartunali, K., 2011b. An optimization framework for solving capacitated multi-level lot-sizing problems with backlogging. *European Journal of Operational Research* 214, 428–441.
- Wu, Y., 2011. A stochastic model for production loading in a global apparel manufacturing company under uncertainty. *Production Planning & Control* 22, 269–281.
- Xiao, Y., Kaku, I., Zhao, Q., Zhang, R., 2011a. A variable neighborhood search based approach for uncapacitated multilevel lot-sizing problems. *Computers & Industrial Engineering* 60, 218–227.
- Xiao, Y., Kaku, I., Zhao, Q., Zhang, R., 2011b. A reduced variable neighborhood search algorithm for uncapacitated multilevel lot-sizing problems. *European Journal of Operational Research* 214, 223–231.
- Xue, G., Offodile, O.F., Zhou, H., Troutt, M.D., 2011. Integrated production planning with sequence-dependent family setup times. *International Journal of Production Economics* 131, 674–681.
- Yang, J., Qi, X., 2010. Managing partially controllable raw material acquisition and outsourcing in production planning. *IIE Transactions* 42, 188–202.
- Yang, S., Yang, J., Abdel-Malek, L., 2007. Sourcing with random yields and stochastic demand: A newsvendor approach. *Computers & Operations Research*, 34, 3682-3690.

- Yimer, A.D., Demirli, K., 2010. A genetic approach to two-phase optimization of dynamic supply chain scheduling. *Computers & Industrial Engineering* 58, 411–422.
- Zanjani, M.K., Ait-Kadi, D., Nourelfath, M., 2010a. Robust production planning in a manufacturing environment with random yield: A case in sawmill production planning. *European Journal of Operational Research* 201, 882–891.
- Zanjani, M.K., Nourelfath, M., Ait-Kadi, D., 2010b. A multi-stage stochastic programming approach for production planning with uncertainty in the quality of raw materials and demand. *International Journal of Production Research* 48, 4701–4723.
- Zanjani, M.K., Nourelfath, M., Ait-Kadi, D., 2011. Production planning with uncertainty in the quality of raw materials: a case in sawmills. *Journal of the Operational Research Society* 62, 1334–1343.
- Zhang, Z.-H., Jiang, H. & Pan, X., 2012. A Lagrangian relaxation based approach for the capacitated lot sizing problem in closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 140, 249-255.
- Zhang, G., Shang, J., Li, W., 2011. Collaborative production planning of supply chain under price and demand uncertainty. *European Journal of Operational Research* 215, 590–603.
- Zolghadri, M., Olivier, C., Bourrieres, J.-P., 2008. Close-optimal production and procurement policy for a X-network of added value using lexicographic linear goal programming. *Computers & Industrial Engineering* 54, 821–839.

CAPÍTULO III

**A REVIEW OF OPTIMIZATION MODELS FOR  
INTEGRATED PRODUCTION AND ROUTING  
PLANNING DECISIONS**

---





---

## CAPÍTULO III

### A REVIEW OF OPTIMIZATION MODELS FOR INTEGRATED PRODUCTION AND ROUTING PLANNING DECISIONS

---

1	Introduction.....	III-2
2	References collection methodology .....	III-3
3	Production and routing problem description and formulation .....	III-4
4	Classification criteria .....	III-7
4.1	Production aspects .....	III-9
4.2	Inventory aspects .....	III-10
4.3	Routing aspects.....	III-11
4.4	Modelling aspects of the objective function structure .....	III-17
4.5	Solution approach.....	III-18
4.5.1	Mathematical programming-based approaches .....	III-20
4.5.2	Lagrangian heuristics .....	III-22
4.5.3	Decomposition heuristics .....	III-22
4.5.4	Metaheuristics .....	III-26
5	Discussion and further research directions .....	III-32
5.1	<i>More realistic models</i> .....	III-34
5.2	<i>Consideration of uncertainty</i> .....	III-35
5.3	<i>Focus on inbound vehicle routing</i> .....	III-35
5.4	<i>Globalization and different transport modes</i> .....	III-36
5.5	<i>Environmental and social responsible constraints</i> .....	III-36
5.6	<i>Better benchmarks</i> .....	III-36
6	Conclusions.....	III-37
7	References.....	III-37

## **1 Introduction**

Traditionally, production and transportation planning decisions in supply chain environments have been made sequentially and independently. The most habitual procedure was to proceed first with production planning or lot-sizing calculations, used to determine the quantities of each finished good to be produced in a given planning horizon, and to later establish transportation decisions for distributing manufactured products to customers. However, the simultaneous consideration of production and transportation planning activities in an integrated manner may lead to increased efficiency and cost savings. The literature that addresses models for simultaneous production and transport planning is vast, and several state-of-the-art papers have been published on this topic (Bilgen & Ozkarahan, 2004; Bravo & Vidal, 2013; Erengüç, Simpson, & Vakharia, 1999; Fahimnia, Farahani, Marian, & Luong, 2013; Mula, Pedro, Díaz-Madroño, & Vicens, 2010; Vidal & Goebschalckx, 1997). Nevertheless, most of these models oversimplify transportation and only consider direct shipments or full-truck loads as a transport strategy because they disregard the less-than-load distribution mode.

In this context, production and routing models emerge in order to simultaneously plan production and distribution decisions by considering less-than-load shipments. Hence according to Bard & Nananukul (2010) in a production and routing problem, four critical decisions have to be made: (1) how many items to manufacture each day; (2) when to visit each customer; (3) how much to deliver to a customer during a visit; and (4) which delivery routes to use. Accordingly, a production and routing problem integrates a lot-sizing problem to determine production amounts and a vehicle routing problem (VRP) to determine delivery routes. To the best of our knowledge, despite previous surveys on production and transport planning models, and the increase in the number of published papers in this field in recent years, very few publications focus on reviewing production and routing models. Only Schmid, Doerner, & Laporte (2013) provide an aggregated overview of basic models for rich routing problems, including production lot-sizing decisions.

In this survey, we briefly describe each paper, but we do not describe or formulate the models considered in detail. We provide the reader with a starting point to investigate the literature on optimization models for production and routing problems and their modelling issues. The main contributions of this paper are to: (i) review the literature; (ii) classify the literature based on production, inventory and routing aspects, modelling aspects of the objective function structure and solution approach; and (iii) identify current trends and future research directions.

The remainder of the chapter consists of five other sections. The next section introduces the review methodology. Section 3 describes and presents the production and routing problem formulation. Section 4 describes the classification criteria of the

reviewed papers. Section 5 includes discussion and provides future research lines. Finally, the last section presents some conclusions.

## 2 References collection methodology

Given the vast amount of published articles on production and transportation planning, the following selection criteria were defined: (1) the production and transport planning problem is addressed in an integrated manner; (2) the production and transport integrated planning problem is modelled by mathematical programming approaches; (3) the production planning problem is based only on lot-sizing calculations and extensions; hence the models that focus on production scheduling are not considered; (4) transportation planning issues are based on vehicle routing decisions; (5) the collected references are published only in journals; conference proceedings and doctoral dissertations are not considered since we have assumed their subsequent publication in high-quality research journals.

The search for papers which consider integrated production and routing planning decisions was performed using the *Sciverse Scopus* database. The following search criteria were applied to the topic field of this web search engine: *production planning and routing; lot sizing and routing; production planning and VRP; lot sizing and VRP; supply chain planning and routing; supply chain planning and VRP; production and transport planning; production and distribution planning*, and different combinations of them. Furthermore, the bibliographic references of the articles studied have served as a continuous search reference.

After this process, 22 references were selected for reviewing. The reason for this small number of references is that the production and routing planning problem is a recent research area (the first paper in this topic was published in 1994) and it has been mainly developed in recent years. Among the selected papers, a group of six papers was selected from *Computers & Operations Research* and three came from the *European Journal of Operational Research* (Table III-1).

**Table III-1.** Distribution of references according to journals

Journal	Number of articles	% of total
Computers & Operations Research	6	27.27%
European Journal of Operational Research	3	13.64%
Transportation Science	2	9.09%
Computers & Industrial Engineering	1	4.55%
IIE Transactions	1	4.55%
INFORMS Journal on Computing	1	4.55%
Interfaces	1	4.55%

International Journal of Production Economics	1	4.55%
International Journal of Production Research	1	4.55%
International Transactions in Operational Research	1	4.55%
Journal of Heuristics	1	4.55%
Journal of Scheduling	1	4.55%
Journal of the Operational Research Society	1	4.55%
Production Planning & Control	1	4.55%
<b>TOTAL</b>	<b>22</b>	<b>100.00%</b>

### 3 Production and routing problem description and formulation

In general terms, the production and routing problem can be defined in a network  $G = (N, A)$ , where  $N$  represents the set of nodes comprising production plant and customers, and  $A$  represents the set of arcs connecting the nodes, where  $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$ . Nodes are indexed by  $i \in \{0, \dots, n\}$ , where node 0 corresponds to the production plant which acts as a central depot, while customers are represented by  $i \in \{1, \dots, n\}$  or the set  $Nc = N \setminus \{0\}$ . In a finite planning horizon, composed of a set of equal planning periods  $t = \{1, \dots, T\}$ , the production plant manufactures a set of items represented by  $p$ , which can be either stored at the manufacturing warehouse or sent to customers, which can also store them at their own warehouses or fulfill their corresponding demands during each period. Transportation of products is done by a set of identical vehicles  $K = \{1, \dots, k\}$  over the set of arcs  $A$ , which have an associated cost  $c_{ij}$  to travel from node  $i$  to node  $j$ . Hence, the production and routing problem combines a lot-sizing problem, on the production side, and a VRP related to the distribution of finished goods to customers, by taking into account the inventories in both the manufacturing plants and customer warehouses.

The production and routing problem can be stated as follows:

Given by:

- Production costs such as unitary manufacturing costs and setup costs
- Production capacity at the plant
- Inventory holding costs at the plant and customer warehouses
- Inventory capacity at the plant and customer warehouses
- Initial inventories at each node
- Transport costs such as travel costs between nodes
- Number of available vehicles and their capacity
- Customer demand over the planning horizon

To determine:

- The amount of each product to produce per period
- The inventory levels of each product at each node per period
- Transport routes, number of required vehicles and their occupation

The main goal to meet is:

- Minimization of total costs, including production, inventory and transport costs

Subject to:

- Production capacity constraints
- Inventory capacity constraints
- Typical VRP constraints (Toth & Vigo, 2002)

Moreover, the following assumptions are made:

- Transport routes start and end at the production plant
- Transport routes are completed during one period, and the travel times between nodes are not considered.
- Waiting, loading and unloading times are not considered.
- Customer demand must be fulfilled during each period, hence backorders are not allowed.

The multiproduct production and routing problems can be defined with the following notation:

Sets of indices

$T$	Set of time periods ( $t=1, \dots, T$ )
$P$	Set of products ( $p=1, \dots, P$ )
$N$	Set of nodes ( $i=0, \dots, N$ ) and ( $j=0, \dots, N$ )
$K$	Set of vehicles ( $k=1, \dots, K$ )

Parameters

$d_{pit}$	Demand of product $p$ at node $i$ during period $t$
$Inv_{pi0}$	Initial inventory of product $p$ at node $i$
$pc_p$	Unit manufacturing cost of product $p$

$sc_p$	Setup cost of product $p$
$ic_{pi}$	Holding cost of product $p$ at node $i$
$c_{ij}$	Travel cost between nodes $i$ and $j$
$PCap_t$	Production capacity at the manufacturing plant during period $t$
$ICap_{pi}$	Inventory capacity for product $p$ at node $i$
$VCap$	Vehicle capacity

Decision variables:

$P_{pt}$	Production amount of product $p$ during period $t$
$I_{pit}$	Inventory level of product $p$ at node $i$ at the end of period $t$
$Q_{pikt}$	Amount of product $p$ delivered to customer $i$ with vehicle $k$ during period $t$
$\gamma_{pt}$	Binary setup variable for product $p$ during period $t$ ( $\gamma_{pt} = 1$ , if a setup is performed for product $p$ during period $t$ , 0 otherwise)
$Y_{it}$	Binary variable equal to 1 if node $i$ is visited during period $t$ , 0 otherwise
$X_{ijkt}$	Binary variable equal to 1 if vehicle $k$ travels from node $i$ to node $j$ during period $t$ , 0 otherwise

The production and routing problem is formulated as follows:

$$\min \sum_{t \in T} \left( \sum_{p \in P} \left( pc_p \cdot P_{pt} + sc_p \cdot \gamma_{pt} + \sum_{i \in N} ic_{pi} \cdot I_{pit} \right) + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} c_{ij} \cdot X_{ijkt} \right) \quad (\text{III-1})$$

subject to:

$$I_{p0t} = I_{p0,t-1} + P_{pt} - \sum_{i \in Nc} \sum_{k \in K} Q_{pikt} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (\text{III-2})$$

$$I_{pit} = I_{pi,t-1} + \sum_{k \in K} Q_{pikt} - d_{pit} \quad \forall p \in P, \forall i \in Nc, \forall t \in T \quad (\text{III-3})$$

$$P_{pt} \leq M \cdot \gamma_{pt} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (\text{III-4})$$

$$\sum_{p \in P} P_{pt} \leq PCap_t \quad \forall t \in T \quad (\text{III-5})$$

$$I_{pit} \leq ICap_{pi} \quad \forall p \in P, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (\text{III-6})$$

$$Q_{pikt} \leq M \cdot \sum_{j \in N} X_{ijkt} \quad \forall p \in P, \forall i \in Nc, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{III-7})$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{i \in Nc} Q_{pikt} \leq VCap \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{III-8})$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} X_{ijkt} = Y_{it} \quad \forall i \in Nc, \forall t \in T \quad (\text{III-9})$$

$$\sum_{j \in N} X_{jikt} = \sum_{j \in N} X_{ijkt} \quad \forall i \in Nc, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{III-10})$$

$$\sum_{j \in Nc} X_{0,jkt} \leq 1 \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{III-11})$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} X_{ijkt} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq Nc, |S| \geq 2, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{III-12})$$

$$P_{pb}, I_{pitb}, Q_{pikt} \geq 0 \text{ and integer} \quad \forall p \in P, \forall i \in N, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{III-13})$$

$$\gamma_{pb}, Y_{it}, X_{ijkt} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, \forall i, j \in N, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{III-14})$$

The objective function (III-1) corresponds to the minimization of total costs relating to production, setups, inventories and routing costs over the planning horizon. Constraints (III-2) and (III-3) represent the inventory flow balance at the plant and customer warehouses, respectively. These equations link the production side with the routing problem through decision variable  $Q_{pikt}$ . Constraint (III-4) ensures that a setup for a product is done during a period, but only if this product is manufactured. Constraint (III-5) limits the total amount to produce of all the items in the production plant during each period. Constraint (III-6) establishes the inventory limits of each product at each node (e.g., plant or customers). Constraints (III-7) to (III-12) deal with the VRP. Only if node  $i$  is visited by vehicle  $k$  during period  $t$  can the delivered amount of product  $p$  by this vehicle be positive, as stated in Constraint (III-7). Moreover, Constraint (III-8) limits the total amount of different products to be transported in a single vehicle according to its capacity. Constraint (III-9) ensures that variable  $Y_{it} = 1$  when node  $i$  is visited by a vehicle. Constraint (III-10) corresponds to vehicle conservation flow; that is, if a vehicle  $k$  arrives at customer  $i$  during period  $t$ , it must leave it during the same period. Constraint (III-11) limits to one the number of trips per vehicle leaving the depot for each period, and Constraint (III-12) eliminates possible subtours for each vehicle during each period. Constraint (III-13) defines the lower bounds and integrality of the production, inventory and shipment amounts, while Constraint (III-14) defines the binary variables relating to setups, visits to customers and travelled arcs.

## 4 Classification criteria

As the production and routing problem has been tackled mainly in recent years (more than 80% of reviewed papers have been published in the last 10 years), to the best of our knowledge, no survey or review article that focuses exclusively on this field has yet been published. For this reason, we propose a classification scheme based on five groups of aspects relating to modelling and solving the production and routing problem: production, inventory, routing, the model of objective

function and solution approach. The classification criteria corresponding to all these categories are described as follows:

1. Production aspects:
  - a. Number of products: it refers to the number of manufactured products considered in each model
  - b. Number of production plants: if there is/are only one single production plant or several manufacturing facilities
  - c. Production capacity: it refers to the capacities of the resources available in the production system
  - d. Setups characteristics: consideration of setups by including the corresponding setup costs and/or setups times, and any other characteristics relating to complex setup structures, such as sequence-dependent setups and setup carry-overs, are identified.
2. Inventory aspects:
  - a. Inventory modelling: it refers to the modelling of a production plant and customer warehouses in which products can be stored
  - b. Inventory capacity: the limitation of the amounts of product at the plant and/or customer warehouses imposed by inventory capacities is identified
  - c. Inventory policies: it details whether the vendor-managed inventory policies for the replenishment of customers, such as, order-up-to level, maximum level, fill-fill-dump, have been considered. The existence of safety stocks levels is also described.
3. Routing aspects:
  - a. Fleet of vehicles: characteristics of the available vehicles in relation to their number (single or multiple, and limited or unlimited) and capacity (if vehicles are capacitated and if capacity is equal in all the vehicles or differs)
  - b. Number of trips and visits per vehicle: it refers to the numbers of trips each vehicle can do during one period by starting and finishing at the central depot
  - c. Transport data: they detail the consideration of different transport parameters, such as transport time between a pair of nodes; transport distance between a pair of nodes; service, unloading or loading times; waiting times; time windows; and available operations time to complete a route



4. Modelling aspects of the objective function structure: it identifies the composition of the objective functions and enumerates their members
5. Solution approaches: these are mathematical methods and solution algorithms that have been developed to solve the proposed production and routing models, such as mathematical programming-based approaches, Lagrangian heuristics, decomposition heuristics, metaheuristics and other heuristics.

#### **4.1 Production aspects**

According to Pochet & Wolsey (2006), production planning can be defined as planning the manufacturing activities required to transform raw materials into finished products by meeting customer demand in the most efficient or economical way possible. In this sense, production planning decisions are related to the determination of the size of the production lots for the different manufactured products, the time at which these lots have to be produced, and sometimes sequencing the production lots. The complexity of not only the production planning problem, but also its modelling and resolution, may be influenced by the number of items manufactured in the production system, the number of production facilities, and the restrictions imposed by the available productive resources. However, the consideration of production facilities manufacturing multiple products with capacity constraints enables more realistic models. Additionally, setup issues are often included in production models by considering setup costs to be a penalty in the objective function, and the setup times that can model the production changeovers between several products and the decreasing production available time capacity. In this sense, additional more complex setup types can also be considered, such as setup carry-overs and sequence-dependent setups (Karimi, Fatemi Ghomi, & Wilson, 2003), which also increase the complexity of the models because they are usually modelled by introducing zero-one variables.

Table III-2 shows the above-described production aspects for each reviewed article. Among the analyzed papers, it is highlighted that the majority include models with a single production plant. Only Lei, Liu, Ruszczynski, & Park (2006) and Calvete, Galé, & Oliveros (2011) propose production and routing models with production systems composed of several manufacturing plants. However, in relation to the number of products whose production planning is addressed, the difference is not as clear as in the previous case. The number of papers that propose single product models is slightly higher than the number of papers that consider manufacturing multiple products, with a difference of only four.

The capacity constraints related to available productive resources also prominate in the reviewed papers. In this sense, the authors opt for different ways to formulate production bounds, such as the maximum number of units to produce during a period, the maximum available production time, or a combination of both these options. Among them, the consideration of the maximum number of units to produce is the commonest, while the maximum available production time is addressed only in Chandra & Fisher (1994), Fumero & Vercellis (1999), Kuhn & Liske (2011) and Amorim, Belo-Filho, Toledo, Almeder, & Almada-Lobo (2013). Moreover, Çetinkaya, Üster, Easwaran, & Keskin (2009) include two kinds of production capacity constraints, the first corresponding to an aggregated production capacity expressed in time units, and the second is related to product-based capacity constraints, expressed in production units. A group of five references (Archetti, Bertazzi, Paletta, & Speranza, 2011; Bertazzi, Paletta, & Speranza, 2005; Chen, Hsueh, & Chang, 2009; Shiguemoto & Armentano, 2010; Van Buer, Woodruff, & Olson, 1999) assumes unlimited production capacity or productive resources with excess of production capacity without constraining the amount to manufacture during each period.

Of all the reviewed works, the vast majority deal with setups and include an associated penalty cost in the objective function. Among them, only Kuhn & Liske (2011) and Amorim, Belo-Filho, et al. (2013) consider setup costs and setup times simultaneously. Moreover, Amorim, Belo-Filho, et al. (2013) include sequence-dependent setup times and setup costs in their model because they address a production lot-sizing and scheduling problem which focuses on the short term. Van Buer et al. (1999) consider only sequence-dependent setup times. Despite setup carry-overs being a typical lot-sizing extension and the possibility of carrying over a setup between periods being a common practice in many industries, none of the reviewed papers includes this additional class of setup issue.

## **4.2 Inventory aspects**

Since production and routing problems are simultaneously composed of a production lot-sizing problem and an inventory routing problem, the corresponding mathematical programming models can present inventory balance equations that model the amounts of products stored at production plants and customer warehouses (e.g., Constraints (III-2) and (III-3)). Generally, the storage space for parts, raw materials and finished products is limited, hence upper limits for inventory can be set to model this limitation. These upper bounds for storage capacities can also determine several inventory replenishment policies on the customers side. In this sense, by assuming that there is a single decision maker responsible for providing finished products to the customer warehouses from production plants, one can distinguish models with different policies, such as a

maximum level (the level of inventory on the customer side after delivery and consumption is not higher than its maximum level or upper limit), the order-up-to level (the quantity shipped to customers is such that the inventory level in the customer warehouse reaches exactly the maximum level at the end of the delivery time instant after delivery and consumption) and fill-fill-dump (the order-up-to level quantity is shipped to all but the last retailer on each delivery route, while the minimum between the order-up-to level quantity and the residual transportation capacity is shipped to the last retailer). Readers are referred to Bertazzi et al. (2005) and to Archetti et al. (2011) for a description and analysis of these policies. Moreover, the lower limits for inventories can also be taken into account in order to protect against uncertainty or due to technical restrictions, among others.

Table III-3 summarizes the works reviewed in terms of modelling inventory amounts at production plants and customer warehouses, inventory capacity constraints and inventory policies. Sixteen of the analyzed papers model inventories at both the production plants and customer warehouses by setting proper inventory balance equations to the corresponding production and routing models. Two references (Kuhn & Liske, 2011; Metters, 1996) consider only inventories at the production plant because they address a different problem in which transport routes are related to inbound logistics, hence customers are not contemplated. Conversely, four references do not consider inventories at any node because they present allocation and aggregated models (Calvete et al., 2011) or short-term planning models with scheduling operations for perishable products which cannot be stored (Amorim et al., 2013; Chen et al., 2009; Van Buer et al., 1999).

Most of the reviewed papers taken into account maximum level inventories in order to reproduce realistic conditions relating to industrial environments with warehouses that have limited storage space. They all include upper levels of inventories at production plants and at customer warehouses, except Archetti et al. (2011), which consider only limitations at the customer warehouses. Order-up-to level and fill-fill-dump policies always address customers' inventories levels in the reviewed papers (Adulyasak, Cordeau, & Jans, 2013; Archetti et al., 2011; Bertazzi et al., 2005). Minimum inventory levels or safety stocks simultaneously at the plants and customer warehouses are mentioned only in Lei et al. (2006) and in Armentano, Shiguemoto, & Løkketangen (2011).

### **4.3 Routing aspects**

Transportation planning in production and routing problems is based on capacitated vehicle routing problems (CVRP) principles. According to Toth & Vigo (2002), the basic version of CVRP assumes that there is a set of identical and sufficient vehicles, each with capacity  $C$ , available at the central depot, to serve all the

customers' demand. Each vehicle may cover one route at the most and each customer can be visited only once per period at the most; that is, each customer demand cannot be split into several vehicles. Moreover, each customer demand is known deterministically. However, in order to capture more realistic constraints relating to routing aspects and available transport resources, some papers neither consider nor modify these assumptions, but may add other data parameters which address additional constraints for transportation and routing activities.

Table III-4 classifies the references reviewed according to the nature of the vehicle fleet, the number of trips and visits to customers, and additional transport data. The assumption of having a homogeneous fleet of vehicles with an identical capacity available at the central depot is made in all of the reviewed papers, except Metters (1996), Lei et al. (2006) and Çetinkaya et al. (2009), which address problems closer to real-world production and routing environments. Hence they reflect the existence of several kinds of vehicles with different capacities. Moreover, this assumption implies that the fleet is composed of a set of multiple vehicles. Only Archetti et al. (2011) present different models that consider the existence of only one single vehicle available at the depot, as well as multiple vehicles. The dimension of this fleet of vehicles is mostly modelled as a limited set, although some references consider that there are no fleet size constraints (Amorim et al., 2013; Çetinkaya et al., 2009; Chandra & Fisher, 1994; Kuhn & Liske, 2011; Metters, 1996). According to Amorim, Belo-Filho, et al., (2013), this assumption is realistic since reference contracts with logistics suppliers are usually established to ensure that a fleet of sufficient size is always available.

According to the CVRP assumptions, the number of trips per vehicle during each period is limited to only one. This condition is explicitly considered in most of the papers under study because it is more appropriate because completing several routes is difficult if the considered time periods are short (e.g., days). Nevertheless, the possibility of reutilizing vehicles which have returned to the central depot after visiting all their corresponding nodes can be considered a way of making transport cost savings. In this sense, four papers allow multiple trips per period per vehicle (Adulyasak et al., 2013; Çetinkaya et al., 2009; Chandra & Fisher, 1994; Van Buer et al., 1999). Yet when customer demands exceed vehicle capacity, assuming only one visit per customer means that the routing problem becomes unfeasible. In this case, it is necessary to allow visits of multiple vehicles to each customer. This relaxation of the original CVRP conditions is known as splitting demand or SVRP (a split vehicle routing problem) and has been proposed in the following reviewed papers: Chandra & Fisher, (1994), Fumero & Vercellis (1999), Lei et al. (2006), Çetinkaya et al. (2009) and Shiguemoto & Armentano (2010). Routing costs reductions can be obtained when split deliveries are allowed given the possibility of reducing the number of delivery routes. Readers are referred to Archetti,

Savelsbergh, & Speranza (2008) and to Archetti & Speranza (2012) for a detailed study of possible savings and a survey on SVRP, respectively.

From the review process, it can be concluded that additional data parameters are linked to the time constraints to complete the corresponding routes in production and routing problems. Along these lines, the papers proposed by Van Buer et al. (1999), Lei et al. (2006), Chen et al. (2009) and Amorim, Belo-Filho, et al. (2013) include the travelling times between each pair of nodes and the service times related to the loading and unloading of goods. These service times are also considered explicitly as an independent parameter in Lei et al. (2006), Chen et al. (2009) and Amorim, Belo-Filho, et al. (2013), while they are considered to be included in the travelling time in Van Buer et al. (1999) and Lei et al. (2006). The time spent on transport and the loading and unloading activities is limited by using two kinds of constraints: by defining a maximum available time to complete routes, or by setting time windows in each customer. In line with this, Lei et al. (2006) establish a maximum duration time for each transport route, while Van Buer et al. (1999) consider an available maximum operation time during which production and transport activities must be completed. Amorim, Belo-Filho, et al. (2013) perform a set of strict time windows during which customers must be served. On the contrary, Chen et al. (2009) define soft time windows, which imply that if any vehicle arrives late at a node, it will incur a penalty, while if any vehicle arrives early, it will have to wait until the beginning of the time window.



Table III-3. Inventory aspects of the reviewed papers

	Inventory aspects									
	Inventory modelling		Inventory capacity			Inventory policies				
	Plant(s)	Customer(s)	Plant(s)	Customer(s)	Safety stock	Maximum level	Order-up-to level	Fill-fill-dump		
Chandra & Fisher (1994)	•	•								
Mellers (1996)	•									
Fumero & Vercellis (1999)	•	•								
Van Buer, Woodruff, & Olson (1999)										
Bertazzi, Paletta, & Speranza (2005)	•	•		•	•		•		•	
Lei, Liu, Rusczyński, & Park (2006)	•	•		•						
Boudia, Louly, & Prins (2007)	•	•		•						
Boudia, Louly, & Prins (2008)	•	•		•						
Bard & Nananukul (2009a)	•	•		•						
Bard & Nananukul (2009b)	•	•		•						
Boudia & Prins (2009)	•	•		•						
Chen, Hsueh, & Chang (2009)										
Çetinkaya, Üster, Easwaran, & Keskin (2009)	•	•		•						
Bard & Nananukul (2010)	•	•		•						
Shiguemoto & Armentano (2010)	•	•		•						
Calvete, Galé, & Oliveros (2011)										
Archetti, Bertazzi, Paletta, & Speranza (2011)	•	•		•				•		
Armentano, Shiguemoto, & Løkketangen (2011)	•	•		•						
Kuhn & Liske (2011)	•	•		•						
Adulyasak, Cordeau, & Jans (2012)	•	•		•						
Adulyasak, Cordeau, & Jans (2013)	•	•		•						
Amorim, Belo-Filho, Toledo, Almeder, & Almada-Lobo (2013)	•	•		•					•	

Table III-4. Routing aspects of the reviewed papers

	Routing aspects															
	Fleet and number of vehicles								Number of trips and visits				Transport data			
	Homogenous	Heterogeneous	Single	Multiple	Unlimited	Limited	Capacitated	Vehicles	Single	Multiple	Split deliveries	Travel times	Travel distances	Loading or unloading time	Time windows	Available operations time
Chandra & Fisher (1994)	•			•				•			•					
Metters (1996)	•			•				•								
Fumero & Vercellis (1999)	•			•				•			•					•
Van Buer, Woodruff, & Olson (1999)	•			•				•			•					
Bertazzi, Paletta, & Speranza (2005)	•			•				•								
Lei, Liu, Rusczyński, & Park (2006)	•			•				•			•					•
Boudia, Louly, & Prins (2007)	•			•				•			•					
Boudia, Louly, & Prins (2008)	•			•				•								
Bard & Nananukul (2009a)	•			•				•								
Bard & Nananukul (2009b)	•			•				•								
Boudia & Prins (2009)	•			•				•								
Chen, Hsueh, & Chang (2009)	•			•				•								
Cetinkaya, Üster, Easwaran, & Keskin (2009)	•			•				•								
Bard & Nananukul (2010)	•			•				•								
Shiguemoto & Armentano (2010)	•			•				•								
Shiguemoto & Armentano (2010)	•			•				•								
Calvete, Galé, & Oliveros (2011)	•			•				•								
Archetti, Bertazzi, Paletta, & Speranza (2011)	•			•				•								
Armentano, Shiguemoto, & Lokketangen (2011)	•			•				•								
Kuhn & Liske (2011)	•			•				•								
Adulyasak, Cordeau, & Jans (2012)	•			•				•								
Adulyasak, Cordeau, & Jans (2013)	•			•				•								
Amorim, Belo-Filho, Toledo, Almeder, & Almada-Lobo (2013)	•			•				•								



#### **4.4 Modelling aspects of the objective function structure**

In the last few decades, mathematical programming formulations have been proposed for a wide range of production and transport planning problems. These formulations are optimization methods based on operations research, which determine the best possible production and/or transport plans by generally minimizing total costs, maximizing total profit, or considering other objective functions. Of the different mathematical programming techniques, most reviewed papers opt for integer linear programming or mixed integer linear programming approaches with total costs minimization objective functions, except Van Buer et al. (1999), Bertazzi et al. (2005) and Archetti et al. (2011), who propose non-linear programming models, and Chen et al. (2009), who present a non-linear programming model with a maximization profit function. Absence of transportation-related objectives, such as travel distance minimization, minimization of delays, etc., is emphasized. Indeed only Van Buer et al. (1999) address a production and routing problem with a model that contains an objective function which minimizes the total travel time.

Table III-5 presents the different costs included in the objective functions of the reviewed papers. Production costs, setup costs, inventory costs, and transport costs associated with travelling between a pair of nodes are the commonest costs included in the production and routing mathematical programming models. Regarding manufacturing costs, only seven references (Adulyasak, Cordeau, & Jans, 2012; Adulyasak et al., 2013; Amorim et al., 2013; Archetti et al., 2011; Armentano et al., 2011; Bertazzi et al., 2005; Shiguemoto & Armentano, 2010), mainly published in recent years, contemplate jointly production and setup costs. On the contrary, it is reported that the consideration of only setup costs was more usual in those papers published until 2011 (Bard & Nananukul, 2009a, 2009b, 2010; Boudia, Louly, & Prins, 2007, 2008; Boudia & Prins, 2009; Chandra & Fisher, 1994; Fumero & Vercellis, 1999; Kuhn & Liske, 2011). Inventory costs are included in all the reviewed models, except in those inventories where they are not allowed because of their short-term or operational orientation (Amorim et al., 2013; Chen et al., 2009; Van Buer et al., 1999) or in those where they are not modelled due to the model's level of aggregation (Calvete et al., 2011). Despite Metters (1996) explicitly considering the decision variables representing inventory levels, their corresponding warehousing costs were not included in the objective function. Generally, these decision variables represent inventory levels at the end of each planning period, hence total inventory costs in the objective functions represent the total ending inventory costs. However, Lei et al. (2006) propose an objective function with ending inventory levels and total costs for customers and an average level of inventory costs for plants.

Transportation costs can be considered differently. The most habitual way is to include transportation costs between nodes, which are generally proportional to the

distances between them. However, Metters (1996), Fumero & Vercellis (1999), Van Buer et al. (1999) and Chen et al. (2009) neglect such transport costs in order to include others. For example, Metters (1996) includes fixed costs per vehicle used in each route, as do Fumero & Vercellis (1999), who also consider fixed costs per empty vehicles returning to the production plant and variable shipping costs per unit transported between nodes. Although they can be similar to the transport costs between nodes, some authors prefer considering the transport costs between location according to the time required to complete a journey (Chen et al., 2009; Lei et al., 2006; Van Buer et al., 1999). Additionally, other costs, such as the fixed costs per delivery made to a customer, and the costs of acquiring and unloading purchased items at customer warehouses, are considered in Bard & Nananukul, (2009a) and in Calvete et al. (2011), respectively.

The progressive consideration of unitary production costs in objective functions over the years is highlighted. While setup, inventory holding and transportation costs were considered jointly in first published references, except Metters (1996), Van Buer et al. (1999) and Lei et al. (2006), the production unitary costs appear for the first time in the objective function proposed by Bertazzi et al. (2005). In recent years, production costs in addition to setup, inventory and transportation costs can be considered a common pattern in the objective function models for production and routing problems. However, the consideration of fixed costs per vehicle is more prevalent in those papers published until 2005. The reviewed papers do not mention whether the vehicle fleet is owned by the manufacturing company or if it is outsourced to logistics suppliers. In this context, fixed costs are associated with the vehicles owned by companies and can relate to the acquiring, maintenance or depreciation costs, while outsourced transport corresponds proportionally to distance costs, which are more frequent in those articles dealing with production and routing problems which were published after 2005.

## **4.5 Solution approach**

In this work, we have taken into account the classification for production planning models proposed by Buschkühl, Sahling, Helber, & Tempelmeier (2010), who differentiate among several solution approaches types, such as mathematical programming-based approaches, Lagrangian heuristics, decomposition heuristics and metaheuristics, etc.

Among the mathematical programming-based approaches relating to the reviewed papers, it is possible to distinguish among exact methods (EX), branch and price (B&P) approaches, branch and cut (B&C) approaches and mathematical programming-based heuristics. This work considers EX as those embedded in default solvers, such as the typical branch and bound algorithm for solving mixed-integer pro-

grams, and which stop after an optimal solution has been found, regardless of any efforts made in terms of the required computation time and memory. Based on the idea that most variables are non-basic and assume a value of zero in the optimal solution, in theory, it is necessary to consider only one subset of variables when solving the production and routing problem. Hence the column generation method takes into account only those variables that have the potential to improve the objective function. Column generation can be hybridized with the branch-and-bound algorithm to generate a solution method called branch-and-price (B&P). Another possibility to cut the size of the solution space is to generate valid inequalities in order to cut off irrelevant parts. If valid inequalities are introduced into the course of a branch-and-bound algorithm, the solution approach is called branch-and-cut (B&C). The hybridization of mixed-integer mathematical programming solution procedures with heuristics (MP-H) can help find high quality solutions in a reasonable computational time by profoundly exploring the promising parts of the solution space (Archetti et al., 2011).

Other solution approaches to solve a difficult optimization problem by approaching it with a simpler one are Lagrangian heuristics and decomposition heuristics. Lagrangian heuristics includes iterative solution approaches based on Lagrangian relaxation (LR). This method incurs an additional cost for violating relaxed inequality constraints by using Lagrangian multipliers. The solution to the relaxed problem comes very close to the optimal solution of the original problem. Decomposition heuristics divides the original problem into subproblems (generally production subproblems and routing subproblems), and then coordinates the solutions obtained by applying improvement heuristics.

According to Verdegay, Yager, & Bonissone (2008), the impossibility of discovering exact solutions corresponding to optimization problems, and the need to respond to the practical situations considered in many real-world cases, have led to an increased use of heuristic-type algorithms, which have proven valuable tools to provide solutions where exact algorithms do not. Metaheuristics has emerged as a result of the extensive application of these heuristic-type algorithms to many optimization problems. A metaheuristics can be defined as an iterative master process that guides and modifies subordinate heuristics operations to efficiently produce high quality solutions (Voss, Osman, & Roucairol, 1999). Metaheuristic procedures start from an initially provided solution. By exploring the search space and by exploiting accumulated search experience, they are able to obtain non-optimal solutions, which can largely satisfy the decision maker. Examples of metaheuristics algorithms include genetic algorithms (Holland, 1975), tabu searches (TS) (Glover & McMillan, 1986; Glover, 1989, 1990), simulated annealing (SA) (Černý, 1985; Kirkpatrick, Gelatt, & Vecchi, 1983), the greedy randomized adaptive search procedure (GRASP) (Feo & Resende, 1989), memetic algorithms (MA) (Moscato, 1989), ant colony optimization (ACO) (Dorigo, Maniezzo, & Coloni, 1996), the

ant colony system (ACS) (Dorigo & Gambardella, 1997a, 1997b), adaptive large neighbourhood search (ALNS) (Ropke & Pisinger, 2006), scatter searches and path relinking (Glover, Laguna, & Martí, 2000; Glover, 1998), etc.

Table III-6 provides the solution approaches proposed in the reviewed papers. Metaheuristics and decomposition heuristics emerge as the commonest solution methods to tackle complex production and routing problems. Eight reviewed papers propose different metaheuristic algorithms, while decomposition heuristics are proposed in six of the analyzed works. Mathematical programming-based approaches are proposed only by seven references. Finally, Lagrangian relaxation and  $\epsilon$ -exact solution methods are presented only in Fumero & Vercellis (1999) and in Kuhn & Liske (2011), respectively. The progressive utilization of mathematical programming-based approaches is highlighted, especially B&P, B&C and MP-H to the detriment of decomposition heuristics, which has been proposed until 2009. Metaheuristics has been considered to be solution methods throughout the time frame corresponding to this survey. Among them, TS is the most frequent given its simplicity and the good results obtained, especially when combined with complementary improvement methods, such as path relinking. The rest of the metaheuristics are found only in one reference each, and they progressively appear in the corresponding references in performance and sophistication order.

Next, details of each solution approach adopted by the different reviewed works are provided.

#### **4.5.1 Mathematical programming-based approaches**

Metters (1996) focuses on a practical application of a combined production and routing problem about postal service division. The proposed model is solved near optimality after eliminating infeasible routes to hence reduce the possible number of routes and integer variables, and by using a mixed integer linear programming solver based on EX, such as a Simplex algorithm. Moreover, Amorim, Belo-Filho, et al. (2013) quantify the impact of considering lot sizing versus batching in the production and distribution planning of perishable goods by solving the corresponding models with EX embedded in commercial solvers for small randomly generated instances.

In Bard & Nananukul (2009b) and Bard & Nananukul (2010), the original production and routing problem is decomposed into a restricted master problem (relating to production problem) and several subproblems (corresponding to distribution and routing decisions) as they apply a column generation procedure. Bard & Nananukul (2009b) propose a two-step solution approach, which improves the initial B&P algorithm proposed by these authors to solve the corresponding subproblems based

on firstly determining delivery quantities and then finding delivery routes by applying a VRP tabu search code (Carlton & Barnes, 1996) within the B&P framework. The computational results obtained by this solution approach improve the results obtained by the CPLEX solver within 1 hour of the CPU time by an average 12.2% for instances with up to 8 time periods and 50 customers. This improvement of solution approach performance in relation to the CPLEX solver is confirmed by the B&P algorithm used by Bard & Nananukul (2010), which adds a new branching strategy to deal with master problem degeneracy, to reduce the effects of symmetry, and to combine rounding heuristics and a tabu search with the original branch-and-price method.

Adulyasak et al. (2013) present B&C approaches for both vehicle and non-vehicle index formulations. The vehicle index uses the minimum  $s$ - $t$  cut algorithm of the Concorde callable library (Applegate, Bixby, Chvátal, & Cook, 2001). Moreover, subtour elimination inequalities are added to improve the proposed algorithm's performance. For the non-vehicle index formulation, three different separation algorithms are employed to address the three different subtour eliminations constraints. Since it is very time-consuming to solve all the separation problems at each node of the branch-and-bound tree, an improvement cut generation strategy is adopted. Moreover, a heuristics to compute the upper bounds used in branch-and-cut algorithms is proposed. This heuristics is based on the adaptive large neighbourhood search (ALNS) framework proposed by Ropke & Pisinger (2006) for the VRP. Maximum level (ML) and order-up-to level (OU) inventory replenishment policies are made in the proposed index and non-index vehicle formulations. The results reveal that the vehicle index formulations are much better at finding optimal solutions. Problem instances with up 35 customers, 3 periods and 3 vehicles are solved to optimality for the ML policy within 2 hours, as are problem instances with up 25 customers for the OU policy. Moreover, problem instances with up to 50 customers, 3 time periods and 3 vehicles for the ML policy, and 35 customers, 6 time periods and 3 vehicles, can also be solved with a multi-core CPU with 8 processors in an average computing time of 2.1 hours and 0.8 hours, respectively.

Archetti et al. (2011) present two production and routing mathematical programming models. The first, which corresponds to a problem in which only one vehicle can be used in each delivery time instant, is solved by using a B&C algorithm in which the subtour elimination constraints by Gendreau, Laporte, & Semet (1998) are introduced by using the separation algorithm of Padberg & Rinaldi (1991), and other valid inequalities (Archetti, Bertazzi, Hertz, & Speranza, 2012) are added at the beginning of the optimization process. A set of generated instances is used to evaluate the proposed B&C algorithm's performance, which obtains optimal results for instances with up 15 nodes in few seconds of computational time. Moreover, a model that considers an homogeneous fleet of vehicles with limited capacity is also presented. A three-step hybrid heuristic algorithm is proposed to solve the multi-

vehicle problem by decomposing the problem into two subproblems, one on production and the other dealing with distribution, which are solved sequentially. Firstly, the distribution problem is solved by assuming infinite production capacity at the plant. The distribution subproblem is solved by applying a heuristics in which one retailer is inserted into the solution in each iteration. For each retailer, a mixed integer linear programming model, referred to as the single retailer problem, is solved by applying an exact algorithm based on the properties of the optimal solution, and also on the feasibility and dominance relations among the partial solutions. The production subproblem is optimally solved because it's a Wagner & Whitin (1958) class problem. Finally, the obtained solution is improved iteratively by removing and reinserting two retailers at a time, provided the solution is improved. The performance of this solution method is evaluated with the same data sets as in the B&C algorithm, and results that come close to optimality can also be obtained in short CPU times.

#### **4.5.2 Lagrangian heuristics**

Fumero & Vercellis (1999) consider a Lagrangian relaxation solution method based on relaxing balance inventory and vehicle capacity constraints, and by applying Lagrange multipliers to transform the original production and routing problem into a dual model composed of four subproblems: (1) production; (2) inventory; (3) distribution; and (4) routing. These subproblems are solved by applying a simple procedure based on all-or-nothing criteria for the production subproblem; by a simple greedy procedure for the inventory subproblem; by using a linear programming solver with a distribution subproblem; and by transforming the routing subproblem into a minimum cost flow formulation. Moreover, a primal feasible solution and upper bounds are obtained heuristically to evaluate the effectiveness of the proposed solution method, which obtains an average gap of 5.5% if compared to this upper bound for instances with up to 12 customers, 10 finished goods and 8 time periods.

#### **4.5.3 Decomposition heuristics**

Chandra & Fisher (1994) decouple the original production and routing problem to solve production and distribution subproblems separately and sequentially. Production scheduling is solved to optimality by adding valid inequalities and by using exact algorithms from the literature (Barany, Roy, & Wolsey, 1984; Leung, Magnanti, & Vachani, 1989). The distribution scheduling problem is then solved by

taking into account the available inventories and production amounts obtained in the first step, and by also applying different heuristics, such as sweep (Gillett & Miller, 1974), neighbour rule (Rosenkrantz, Stearns, & Lewis, 1974) and 3-opt interchange (Lin & Kernighan, 1973), for each route created. Moreover, a coordinated production and distribution approach is proposed by using a local improvement heuristics to search for cost-reducing changes in the decoupled approach through the consolidation of deliveries and production schedules changes. Computational experiments run with three datasets demonstrate the value of coordinating production and routing with savings ranging between 3% to 20%, if compared to the decoupled approach, of 6% on average.

Two hierarchical algorithms are proposed by Bertazzi et al. (2005) to solve a production and routing problem after its decomposition. The first, referred to as VMI-PDP, is similar to that proposed by Chandra & Fisher (1994). In the VMI-PDP, the production subproblem is firstly solved by assuming that all the retailers are served daily. Then given the production quantities, the distribution subproblem is solved. Given the quantity to ship to each retailer in each time instant, the production subproblem is solved again. The second algorithm, referred to as heuristic VMI-DP, is based on firstly solving the distribution subproblem, fixing the quantity that suffices to serve retailers as the initial production quantity, and then solving the production subproblem. The production problem is solved to optimality by building an acyclic network reformulation and by also determining the shortest path, as described in Lee & Nahmias (1993). The distribution and routing problem is solved by an iterative heuristic algorithm which inserts a retailer in each iteration. The solution obtained by hierarchically solving the subproblems can be improved by applying the iteratively improvement and coordination procedures between the production and distribution problems. In each iteration in the former, two retailers are temporarily removed from the current solution. Then retailers are inserted into the current solution and the production subproblem is solved in order to determine the optimal quantity to produce in each time instant. If this reduces the total cost, then the solution is modified accordingly. This iteration is repeated as long as the total cost is improved. The proposed algorithms are compared for the OU and fill-fill-dump inventory policies in relation to a traditional retailer managed inventory (RMI) policy based on randomly generated instances with 50 customers and 30 periods. The results illustrate the quality of the solutions obtained by using VMI-DP, which outperforms the RMI policy for all the considered instances, despite the required computational time being an average of 4 minutes.

Lei et al. (2006) propose a two-step solution approach to solve a production and routing problem. In the first step, the model is solved as a mixed integer linear programming problem that is subject to all the constraints in the original model, except the vehicle routings are restricted to direct shipments. This phase determines production quantities, the inventory levels in the plants and distribution centres, and the

number of shippings and trips per vehicle, during each time period. Then a heuristic algorithm to consolidate less than load shipments to the distribution centres is proposed to avoid direct shipments proving inefficient in the first phase by determining the routes per vehicle at each plant during each period by dropping the respective indices. When compared to the CPLEX solver, the proposed two-step approach provides the same, or a better, solution in most of the numerical instances generated with a single plant and up to 12 distribution centres, 2 vehicles and 4 time periods. Moreover, the proposed solution method is validated in a real-life supply network relating to a chemical company.

In Boudia et al. (2008), two heuristics are proposed to solve the production and routing problem. The first corresponds to an uncoupled approach in which the production plan is firstly calculated to optimality with a Wagner & Whitin (1958) method and after determining the distribution plan without modifying production decisions. Firstly, the set of deliveries to customers is calculated, then the routing problem is solved by applying Clarke & Wright (1964) heuristics for VRP. Finally, a local search improvement based on 2-opt and customer exchanges with two different strategies is performed. Two coupled heuristics are also proposed, which differ only as far as the local search procedure applied at the end is concerned. The first algorithm uses the same local search improvement as the decoupled approach. The second solution method considers a local search improvement procedure which can modify the quantity delivered to each customer in 1 day, the production day, the delivery date, the delivery trip and the position in this trip. These heuristics are composed of three phases prior to the local search improvement procedure: (1) determination of the quantities to deliver each day; (2) trip construction; and (3) determination of the definitive production dates. The first phase returns a provisional amount to produce and to deliver to each customer. The second phase also applies Clarke & Wright (1964) heuristics for VRP. The third phase determines the definitive production plan based on the Wagner & Whitin (1958) algorithm. Computational tests are performed with benchmark instances, as presented in Boudia, Louly, & Prins (2005), which contain datasets with 50, 100 and 200 customers, 20 time periods and only one single product. The best results are obtained for the instances with 200 nodes by reducing total costs by an average of 13.40% for the first coupled version algorithm and by 15.22% for the second coupled approach if compared to the decoupled solution method. Moreover, the corresponding average running times are 3.42 seconds and 10.43 seconds, respectively.

An integer non-linear mathematical programming model for production and vehicle routing planning with time windows (VRPTW) and perishable products is proposed by Chen et al. (2009). The original model is converted into a non-linear programming model with non-negative constraints and a VRPTW in the objective function. Hence two subproblems are obtained: production scheduling and VRPTW. The production scheduling problem is solved by using a direct search algorithm, called



the Nelder-Mead method, which considers boundary constraints. The routing problem is solved by applying a heuristic insertion algorithm by considering production quantities and the time start production obtained in the production phase. Then customers are inserted with a minimum cost criteria or new routes are created. Finally, routes are improved by inserting or removing nodes. For the purpose of evaluating the proposed solution method, a group of instances has been generated and is based on the benchmark instances by Solomon (1987), with 3 products and a number of customers ranging from 5 to 100. The results illustrate that the proposed algorithm can solve the considered problem for instances with up to 75 retailers within 10 minutes. Small sized instances with 5 and 6 retailers are generated to compare the performance of the proposed solution method in relation to the LINGO solver. The solutions of the proposed algorithm are better than the local optimal solutions found by LINGO with CPU times under 1s in most cases, while LINGO takes hours to find a local optimal solution.

In Çetinkaya et al. (2009), the original problem is decomposed into inventory and routing subproblems, which are solved iteratively until a cost-based improvement for the overall solution cannot be found or the limit of the maximum number of iterations is reached. The inventory subproblem seeks to determine the weekly replenishment and shipment quantities at the distribution centres, bins, and direct delivery (DD) customers, and also considers requirements at other plants. Given the weekly replenishment and shipment quantities, the routing subproblem specifies the truck routes and minimizes the actual loading and routing costs. The algorithm starts with an initial solution in which the shipment quantities for each potential DD customer is set, based on that customer's corresponding demand, to satisfy the demand constraints. The replenishment quantities from the factory warehouse to the distribution centres, bins, and other plants are set, based on the remaining overall requirements of the corresponding locations, using inventory balance constraints. The load balance constraints and demand constraints are also taken into account to determine the remaining overall requirements by the shipment quantities of the other customers. After obtaining an initial solution, the routing subproblem is solved to determine the route-based setup costs and routes by applying pre-processing to check the possible full-truck-load shipments and to then determine less-than-truck-load routes. The routing subproblem is solved for each period separately by using the Clarke & Wright (1964) algorithm with an additional improvement phase. Finally, the production subproblem is solved optimally by using the CPLEX solver. The proposed model is validated by the real data from Frito-Lay North America and is compared with benchmark instances in relation to the policies used in the considered firm. The obtained results are up to 11% better than current policies on total costs and are calculated within approximately 10 minutes.

#### 4.5.4 *Metaheuristics*

Van Buer et al. (1999) solve a production and routing problem based on the newspaper industry by using two local search algorithms and by also considering the option of recycling empty trucks at the end of routes to obtain cost savings. Starting with an initial solution obtained by a heuristic sort, a neighbourhood search relating to full insertion moves, lot and trucks insertion, and whole trucks insertions are included in the TS and SA heuristics. By means of computational experiments with real data from a newspaper producer, the authors conclude that the use or non-use of recycling is much more important than the choice between the better performing search algorithms. Furthermore, based on other nature behaviours, Calvete et al. (2011) present a bi-level ACS algorithm to solve the production-distribution-routing problem with multiple depots. In order to obtain an initial feasible solution, a nearest neighbour heuristics is applied. That is to say, while it is possible to add another retailer to the route, the nearest retailer to the incumbent retailer is selected to be visited from the set of accessible retailers that have not yet been visited. Then the lower level problem is solved to optimality. Next the algorithm parameters are initialized. In each iteration, a prescribed number of  $M$  feasible solutions for the bi-level problem is computed. The ant-based procedure starts with an ant that constructs a feasible multi-depot VRP solution. For this purpose, the ant, which represents a vehicle, starts at the super-depot (which is connected to the rest of depots with a null cost) and selects the depot to visit first. Afterwards, it successively selects the following retailer from the set of accessible retailers still to be visited. Whenever the selection of a retailer leads to an unfeasible solution due to the bounds imposed by vehicle capacity or because the driver's working time is exceeded, the ant returns to the super-depot via the depot visited and starts again until all the retailers have been visited. After crossing an arc, the local pheromone trail is updated. At the end of this iteration phase, the ant provides a set of routes that start and end at any depot. Then the lower level production problem is solved to optimally consider the information provided by the previous phase. Once the  $M$  feasible solutions of the bi-level problem have been obtained, the global pheromone trail is updated to reflect the quality of the solutions found. This process is iteratively run until a stop condition is reached. A set of small-sized generated instances and a group of benchmark problems ranging from 48 to 288 retailers and 4 or 6 depots and plants have been used to perform computational experiments, and have shown efficiency in terms of the CPU time consumed.

Boudia et al. (2007) propose a GRASP and two improved versions using either a reactive mechanism or a path-relinking process. The basic GRASP algorithm is based on a construction phase and a local search phase. The first phase determines the subset of customers to be visited, the amount to be delivered to each one (this amount may cover several consumption days), and the associated trips. First of all,

the goal is to fulfil all the unmet demand for period  $t$ . A second step attempts to meet some of the demand during period  $t$  for future periods. In a third step, the Clarke & Wright (1964) savings heuristics is applied to improve the routing plan of vehicles. The production plan is also modified in a second phase by shifting some production days to achieve the best compromise between the setup and storage costs at the plant. The subsequent local search phase is based on changing the following for each customer in one day: the quantity delivered; the production day; the delivery date; the delivery trip; the position in this trip. The proposed GRASP becomes reactive by allowing the algorithm to find the best value on the restricted candidate list (RCL) in a small set of allowed values. Moreover, a path relinking method is proposed to improve the basic GRASP. The benchmark instances from Boudia et al. (2005) are used to compare the results obtained by the basic GRASP, the reactive version and the two versions with the path relinking procedure with the decomposition heuristics proposed in Boudia et al. (2008). The four GRASP methods obtain better results in total costs terms despite the increase noted as far as computational times are concerned, which both depend on the number of customers of the problem instances. The savings obtained through integration increase with the instance size (18.5% on average if compared with the basic heuristics two-phase decomposition method), while running times range from approximately 2 minutes (for instances with 50 customers) to 35 minutes (for instances with 200 customers). Bard & Nananukul (2009a) develop a two-phase approach to design a reactive TS algorithm to solve a production and routing problem. In the first part of phase 1, an initial solution is found by solving an allocation model which determines customer delivery quantities. In the second part, these values become the demand for  $T$  independent routing problems, where  $T$  is the number of periods in the planning horizon. An efficient CVRP subroutine, also based on TS (Carlton & Barnes, 1996), is called to find the solutions. In phase 2, a neighbourhood search is performed to improve the allocations and routing assignments found in phase 1. The results obtained by performing computational experiments using the benchmark instances by Boudia et al. (2005) show improvements in all cases which range from 10% to 20% if compared to those obtained by the previous GRASP procedure of Boudia et al. (2007). However, the increase of between 3 and 5 times in running times is emphasized.

Later, Boudia & Prins (2009) address the same production and routing problem by proposing an MA which creates an initial solution in 3 steps. In step 1, a production plan is determined without considering production capacities limitations. It is assumed in this step that the total amount to produce equals the total customer demand throughout the planning horizon minus the initial plant inventory. In step 2, the savings algorithm of Clarke & Wright (1964) is applied to determine the vehicle trips. Finally, the production plan is adjusted and repaired by applying a modified version of the Wagner & Whitin (1958) algorithm. Next, selection and crossover are performed to generate new solutions, which are improved with the local search

procedure proposed in Boudia et al. (2007) before being selected by population management mechanisms. Computational tests are carried out with the dataset of instances in Boudia et al. (2007). Hence results obtained by the MA are compared to those obtained by the GRASP procedures and the decomposition heuristics proposed by the same authors. The experiments show that the MA can tackle the biggest instances (200 customers and 20 periods) in an average CPU time of 68 minutes, and that it obtains 23% more savings if compared to a classical decoupled approach.

Other TS applications are found in Shiguemoto & Armentano (2010) and in Armentano et al. (2011). A TS algorithm with a relaxation mechanism that allows the evaluation of infeasible solutions to guide a solution search is proposed in Shiguemoto & Armentano (2010). This algorithm constructs an initial solution by setting equal amounts to deliver to the demand levels by applying the Clarke & Wright (1964) algorithm to determine not only the routes per period, but also the production plan using an implementation of the Wagner & Whitin (1958) algorithm. A composite move is examined for each item, each customer and all the periods, and the move that leads to the smallest total cost is executed and stored in the short-term memory as a tabu. The composite move is based on three components: (1) transferring the maximum quantity from one period to another without violating inventory bounds; (2) inserting this quantity into one route; and (3) determining a new production plan based on a Wagner & Whitin (1958) algorithm by taking into account the shift of the transferred amount. Finally, a diversification strategy is performed. This TS procedure is applied to the sets of single item instances generated by Bertazzi et al. (2005), whose results, which were obtained by their heuristics for the order-up-to level inventory policy, are compared to those obtained by the TS algorithm for a maximum level policy at the customer warehouses. The computational results indicate that TS provides an average total cost reduction of 48-50% if compared to the decomposition heuristic algorithm by Bertazzi et al. (2005), while the average computational time required by the TS procedure is approximately the same as that required by the previous heuristics with properly set stopping criteria values. A set of generated instances has also been used to evaluate the performance of the proposed TS procedure for multi-item production and routing problems if compared to a decoupled approach. For a set of instances of 5 and 10 items, 12 and 24 time periods, and 30, 50 and 100 customers, the proposed TS algorithm achieves 58.97% total savings on average, while the overall computational time mean is more than 6 times longer than that of the decoupled approach. Armentano et al. (2011) present two TS variants for the production and routing problem: one with two phases, namely, construction and short-term memory, and one that also incorporates longer term memory to be used in a path relinking procedure. This approach also allows some infeasible solutions in the TS and path relinking procedures, which renders it easier to proceed to good solutions. Construction and short-term memory are determined in the same way as in Shiguemoto &

Armentano (2010), but by considering the additional capacity constraints (production and trip length). Finally, a path relinking procedure is proposed to integrate intensification and diversification strategies into the solution method. All these solution procedures are tested in instances with multiple items generated by the authors, and also in the single item instances by Boudia et al. (2005). The two variants of the proposed TS algorithm yield good tradeoffs between the obtained savings and computational time. Moreover, these approaches outperform the MA developed by Boudia & Prins (2009) and the reactive TS proposed by Bard & Nananukul (2009a) in all the single item instances considered. The best results are obtained by the path relinking version, which achieves improvements in relation to up 8.57% for instances with 200 customers if compared to the reactive TS algorithm, although the increased computational time is an average of 46.82%.

Adulyasak et al. (2012) propose an ALNS framework based on reducing the complexity of the production and routing problem by decomposing it into several sub-problems, which are easier to solve. The initial solution is obtained by solving a production-distribution problem with a fix-and-optimize approach and a routing problem by using the Clarke & Wright (1964) heuristics. In addition, an initial solution is generated by applying a setup move procedure based on iteratively adding the inequalities by Fischetti & Lodi (2003) for local branching. These initial solutions are then improved in the next phase by applying ALNS. Binary variables are handled by the selection and transformation operators in the ALNS algorithm, whereas the optimal value of the remaining continuous variables is determined by a minimum cost network flow algorithm with an exact optimization algorithm. In order to evaluate the efficiency of the proposed solution method, computational experiments are performed with the benchmark instances proposed by Archetti et al. (2011) and Boudia et al. (2005). For the first dataset, the results obtained by the ALNS method are compared to those generated by the heuristic algorithm proposed by Archetti et al. (2011). For the second dataset, this comparison is made with the GRASP by Boudia et al. (2007), the reactive TS by Bard & Nananukul (2009a), the MA by Boudia & Prins (2009) and the reactive TS with path relinking by Armentano et al. (2011). The proposed ALNS solution approach outperforms all the previous heuristics approaches as it provides high quality solutions. Thus, the improvements prove more relevant for the larger instances of the Boudia et al. (2005) datasets as the savings in total costs obtained is 7.8% versus the reactive TS with path relinking by Armentano et al. (2011) and the best previous solution method evaluated with this benchmark's instances. However, the additional computational time required by ALNS is an average of 96.56 minutes, which is 47.58% longer than that used by the TS with path relinking.

Table III-5. Modelling aspects of the reviewed papers

	Modelling of objective function structure									
	Production costs	Setup costs	Inventory costs	Transport costs between nodes	Transport time costs	Fixed cost per vehicle	Fixed cost per empty vehicle	Variable cost per product transported	Fixed cost per delivery made to a customer	Acquiring and unloading cost
Chandra & Fisher (1994)	•	•	•	•		•	•			
Metters (1996)										
Fumero & Vercellis (1999)		•	•			•	•	•		
Van Buer, Woodruff, & Olson (1999)		•	•		•	•	•			
Bertazzi, Paletta, & Speranza (2005)	•	•	•	•		•	•			
Lei, Liu, Ruszczyński, & Park (2006)	•	•	•	•		•	•			
Boudia, Louly, & Prins (2007)		•	•	•		•	•			
Boudia, Louly, & Prins (2008)		•	•	•		•	•			
Bard & Nananukul (2009a)		•	•	•		•	•			
Bard & Nananukul (2009b)		•	•	•		•	•		•	
Boudia & Prins (2009)		•	•	•		•	•			
Chen, Hsieh, & Chang (2009)	•		•		•					
Çetinkaya, Üster, Easwaran, & Keskin (2009)			•			•				
Bard & Nananukul (2010)		•	•	•		•	•			
Shigemoto & Armentano (2010)		•	•	•		•	•			
Calvete, Galé, & Oliveros (2011)	•	•	•	•		•	•			•
Archetti, Bertazzi, Paletta, & Speranza (2011)	•	•	•	•		•	•			
Armentano, Shigemoto, & Lokketangen (2011)	•	•	•	•		•	•			
Kulin & Liske (2011)		•	•	•		•	•			
Adulyasak, Cordeau, & Jans (2012)	•	•	•	•		•	•			
Adulyasak, Cordeau, & Jans (2013)	•	•	•	•		•	•			
Amorim, Belo-Filho, Toledo, Almeder, & Almada-Lobo (2013)	•	•	•	•		•	•			

Table III-6. Solution approaches of the reviewed papers

	Mathematical programming-based approaches			Lagrangian heuristics		Decomposition heuristics	Metaheuristics						Other heuristics	
	EX	B&P	B&C	MP-H	Lagrangian heuristics		Decomposition heuristics	TS	SA	GRASP	MA	ACS	ALNS	Other heuristics
					LR									
Chandra & Fisher (1994)	•						•							
Metters (1996)														
Fumero & Vercellis (1999)						•								
Van Buer, Woodruff, & Olson (1999)									•					
Bertazzi, Paletta, & Speranza (2005)							•							
Lei, Liu, Ruszczyński, & Park (2006)							•							
Boudia, Louly, & Prins (2007)											•			
Boudia, Louly, & Prins (2008)							•							
Bard & Nananukul (2009a)														
Bard & Nananukul (2009b)														
Bard & Prins (2009)		•											•	
Chen, Hsueh, & Chang (2009)														
Çetinkaya, Üster, Easwaran, & Keskin (2009)							•							
Bard & Nananukul (2010)														
Sliguemoto & Armentano (2010)														
Calvete, Galé, & Oliveros (2011)														
Archetti, Bertazzi, Paletta, & Speranza														
Armentano, Sliguemoto, & Lokketaugen														
Kuhn & Liske (2011)														
Armouto, Sliguemoto, & Lokketaugen														
Kuhn & Liske (2011)														
Adulyasak, Cordeau, & Jans (2012)														
Adulyasak, Cordeau, & Jans (2013)														
Amorim, Belo-Filho, Toledo, Almeder, & Almada-Lobo (2013)	•													

## **5 Discussion and further research directions**

Although production lot-sizing and VRP problems have been traditionally classified as mid-term problems by Karimi, Fatemi Ghomi, & Wilson (2003) and Crainic & Laporte (1997), respectively, most of the reviewed articles do not explicitly state their correspondence to the tactical decision level. Moreover, different nomenclatures for the names of the periods into which the planning horizon is divided are identified according to the particular issues dealt with by the addressed problems. For those multiperiod models oriented to mid-term problems, the authors opt to use generic periods or to contemplate a planning horizon divided into several days. Obviously, the vehicle routing and the distribution of final products to customers can strongly impact on production planning and scheduling, especially where perishable goods are concerned. In this context, in which operational issues are prevalent, the time periods correspond to short frames, e.g., hours, or the planning horizon reduces to include a single period. This kind of production and routing problem is found less frequently in the literature; indeed we have identified three papers that deal with the operational decision level (Amorim et al., 2013; Chen et al., 2009; Van Buer et al., 1999). The main difference between tactical and operational production and the routing problem lies in the fact that, at the tactical level, distribution activities start at the end of each period, after production has been completed, while at operational level, the delivery process may start once customers' orders have been completed to more accurately and better synchronize the two planning processes (Amorim et al., 2013). Moreover in this operational decision level context, with products that have a very short lifespan, no inventory is carried from one planning horizon to the next. Hence the inventories equations at the production plant and customer warehouses are not included in the problem.

The majority of the reviewed papers assume that a single global manager coordinates the decisions made on production, inventories and routing with a centralized approach (Perea-López, Ydstie, & Grossmann, 2003). Accordingly, this decision maker has total visibility and control over the production plants and retailers, and can individually manage the inventory levels at his/her customer warehouses, as in a VMI system enriched with production and routing decisions. Along these lines, some of the reviewed papers focus on evaluating different inventory policies (maximum level, order-up to level and fill-fill dump) for the replenishment of capacitated retailer warehouses.

On the other hand, the modelling of the production system is done in a general way without considering typical lot-sizing extensions, such as back-orders, setup carry-overs, sequencing, and parallel machines, which relate more to operational issues, but most of the analyzed papers consider warehouses with limited capacity in production facilities. Moreover, the considered production-distribution systems are always composed of only one production plant (except in Calvete et al., 2011 and



Lei et al., 2006) and several customers, whose number may vary. In fact, the number of customers has a much stronger impact on problem complexity than the number of production sites because of the exponential growth of problem size when determining transport routes. All the reviewed papers contemplate a routing problem with multiple capacitated vehicles, which implies solving another bin packing problem. However, classical VRP assumptions are frequently considered, such as a homogenous and limited fleet of vehicles that only can perform one trip per period and can only visit each node at least once. In this sense, these assumptions oversimplify the routing problem as far as real-world distribution networks are concerned which, under dynamic conditions, can render these problems unfeasible. Additionally, neither are the trade-offs between several conflicting criteria managed by decision makers in such environments contemplated because all the reviewed papers opt for single-objective models, which generally offer a minimized total costs function, including the production, setups, inventory and transport costs relating to total travelled distances and less frequently fixed costs per used vehicles. Given all these assumptions, solutions for real production and routing problems and practical applications in industrial environments are scarce, hence the proposed models are validated mainly with numerical randomly generated datasets.

The main efforts made by the authors focus more on developing efficient solution methods for these production and distribution environments, despite their artificiality. The formidable complexity of the considered problem, formed by a combination of a lot-sizing problem and a capacitated multiperiod vehicle routing problem, indicates a common pattern for solving such problems. In general, most of the reviewed articles opt for decoupling production and routing decisions and for solving the corresponding problems separately with proper solution methods. For example, production planning problem is frequently solved to optimality by applying the Wagner & Whitin (1958) algorithm, or its variations, or by using the exact methods embedded in MIP solvers, while vehicle routing is overcome with several well-known heuristic algorithms (e.g., Clarke & Wright, 1964). This approach can also be used as a starting point or an initial solution for constructive search heuristics and metaheuristics, which are used as post-processing solution improvement methods. Therefore, these solution procedures attempt to interconnect both problems in order to preserve the coordination of production and routing planning decisions and the corresponding savings. The impossibility of obtaining optimal solutions given the heuristic nature of the solution methods proposed is reflected in the progressive evolution made by the level of sophistication of the solution methods to obtain better results, despite the longer computational times required if compared to previous solution approaches. In this sense, a current trend in developing exact algorithms to solve the production and routing problem has been identified in the works of Bard & Nananukul (2010); Archetti et al. (2011) and Adulyasak et al. (2013).

Apart from the representative seminal works of Chandra & Fisher (1994) and Fumero & Vercellis (1999), to the best of our knowledge, there is a core of researchers (Boudia and Prins; Bard and Nananukul; Armentano and Shiguemoto; Adulyasak, Cordeau and Jans and Archetti and Bertazzi) who offer 12 of the 22 reviewed papers to address production and routing problems. They can be considered reference authors given their continuous work in this area. Despite their shared point of view, in this group of papers, only Armentano et al. (2011) consider a multiproduct production and routing problem with production capacity constraints, while Shiguemoto & Armentano (2010) address a multiproduct, but uncapacitated, problem. On occasion, this group of reference papers compares the proposed solution methods with decoupled approaches (Chandra & Fisher, 1994; Fumero & Vercellis, 1999) and the optimal results obtained by MIP solvers for only small instances (Amorim et al., 2013). Nonetheless, a comparison of the performance of the proposed solution methods is generally made with their previously published solution methods and by using the typical benchmark instances available in the literature (Archetti et al., 2011; Boudia et al., 2005) in accordance with the problem parameters considered. For example, the instances of Archetti et al. (2011) take into account aspects such as inventory costs at customer warehouses, initial inventory at customer warehouses, and varying transportation and production costs, but not production and inventory capacity limitations. However, the datasets of Boudia et al. (2005) contemplate only one product, zero inventory costs at the customer warehouses, and problem sizes are generally larger. One of the drawbacks of both datasets is oversized available capacities.

According to the drawbacks detected in the reviewed papers, a set of future research lines can be identified to improve current production and routing models:

### *5.1 More realistic models*

Firms in industrial sectors need models that provide solutions to their current production and routing challenges. Hence, there is room for improvement by developing models which incorporate more realistic planning issues on production, inventory and routing aspects. In this sense, the consideration of more accurately modelled production systems (e.g., including setup times, several production lines, overtimes, subcontracting production, etc.) and other routing problems like the configuration of time windows at customer warehouses, backhauling or open routes without having to return to the central depot, among others, can enrich production and routing models, and can also facilitate their practical application in real-world industries. Accordingly, the additional complexity of the resulting models which incorporate these additional and more realistic issues must necessarily be accompanied by solution approaches which provide good quality solutions in

reasonable computational times for industrial and logistics managers or for decision makers in these firms.

### *5.2 Consideration of uncertainty*

Production and routing problem environments can be subjected to the influence of uncertainties that relate to procurement, manufacturing and transportation activities, and also to customer preferences or market conditions. However of the reviewed papers, only Chen et al. (2009) consider uncertainty conditions relating to demand levels. According to Mula, Poler, García-Sabater, & Lario (2006) and to Peidro, Mula, Poler, & Verdegay (2009), the literature provides several approaches to address these uncertainty conditions, such as the analytical approaches, simulation approaches and hybrid approaches (based on the integration of analytical and simulation models) that represent uncertainties based on probability distributions, which are generally based on historic data. However, when statistical data are unreliable or are not available, models based on probability distributions are not the best choice (Wang & Shu, 2005). In this context, fuzzy mathematical programming can be an alternative approach to model and integrate all the different types of uncertainty inherent to production and routing planning processes to help develop robust models that can give flexible, valid plans in these uncertainty environments.

### *5.3 Focus on inbound vehicle routing*

The production and routing problem is defined by the consideration of simultaneously planning production amounts and routes to serve manufactured final products to the respective customers. However, the consideration of vehicle routing planning for inbound logistic processes that perform the procurement of parts and raw materials in a material requirement planning industrial system can be most challenging. In line with this, vehicles would travel among multiple suppliers to collect the components required to manufacture finished goods according to the bill of materials, and also to the corresponding stock levels at the production plants. To address this new problem, procurement vehicle routes can be better synchronized with production processes, thus obtaining savings in logistic, production and inventory costs, especially in those industries with complex bills of materials, such as automobile and aeronautic firms, which are generally responsible for their procurement transport processes.

#### *5.4 Globalization and different transport modes*

The increase in worldwide commercial transactions corresponding to the procurement of components and raw materials in countries with lower labour costs made by western companies and their corresponding sales in different countries or continents implies developing production and routing models that explicitly consider long-distance transportation issues and different transport modes (e.g., truck, railway, ship, plane) with their corresponding travel transit times, costs and inherent routing constraints. Moreover for both short- and long-distance transport processes in production and routing problems, the simultaneous consideration of different collection and delivery strategies, such as direct deliveries, milk runs, grouping and cross-docking consolidation, can also improve the flow of products among partners, cut transport delays and, hence, lower larger inventory levels at warehouses that go against them.

#### *5.5 Environmental and social responsible constraints*

Current production and distribution logistics strategies are not sustainable in the long term because of their negative impact on environmental and social aspects despite being economically feasible. For example, relocation of manufacturing activities in countries with lower costs can increase the carbon footprint associated with the production and delivery of products, as well as destruction of employment in countries of origin. Hence, a new perspective that focuses on evaluating plans from not only the economic cost viewpoint, but also from an ecological and social perspective, have to be taken into account when modelling production and routing problems. In this sense, the new constraints relating to waste management, emission of dangerous gases and noises produced by transport processes, and improved worker conditions, among others, can be added to current production and routing problem models to tackle environmental and social requirements.

#### *5.6 Better benchmarks*

In order to validate proposed production and routing problems, and examine the effectiveness of solution methods, a set of benchmarks inspired in real industrial and logistics environments is required. To the best of our knowledge, current available dataset instances in the literature are artificially generated and are oversized if compared with available capacities. In this sense, the development of a new group of instances which contains parameters deriving from a rich description of constraints related to realistic production and routing problems would be interesting. The consideration of the above future research lines in designing this new dataset

would also be valuable, as would their publication on the Internet where they would be available for researchers in this field.

## 6 Conclusions

This work reviews the optimization models for integrated production and routing planning decisions given the recent interest shown in this field, and also the increase in the number of publications on production and routing problems. To examine the selected papers, a classification based on the analysis of the following criteria has been proposed: production; inventory and routing aspects; modelling aspects of the objective function structure and solution approach. Moreover, a discussion of the findings and the proposal of future research lines have been provided in accordance with the detected trends and drawbacks. The reviewed papers dealing with production and routing planning decisions present models with simple production and transport issues and single objective approaches. Real applications in industrial environments are not common because researchers centre more on developing efficient solution methods that are validated with artificially generated datasets. In our opinion, the production and routing problem is extremely challenging. Therefore, effective methods that can obtain good quality solutions in a reasonable running time for highly realistic models which consider uncertain conditions, inbound logistic processes and different transport modes is a path left open to conduct new research works given their possible impact on industrial applications.

## 7 References

- Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F., & Jans, R. (2012). Optimization-Based Adaptive Large Neighborhood Search for the Production Routing Problem. *Transportation Science*. doi:10.1287/trsc.1120.0443
- Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F., & Jans, R. (2013). Formulations and Branch-and-Cut Algorithms for Multivehicle Production and Inventory Routing Problems. *INFORMS Journal on Computing*.
- Amorim, P., Belo-Filho, M. A. F., Toledo, F. M. B., Almeder, C., & Almada-Lobo, B. (2013). Lot sizing versus batching in the production and distribution planning of perishable goods. *International Journal of Production Economics*, 146(1), 208–218.
- Applegate, D., Bixby, R., Chvátal, V., & Cook, W. (2001). Concorde TSP solver.

- Archetti, C., Bertazzi, L., Hertz, A., & Speranza, M. G. (2012). A Hybrid Heuristic for an Inventory Routing Problem. *INFORMS Journal on Computing*, 24(1), 101–116. doi:10.1287/ijoc.1100.0439
- Archetti, C., Bertazzi, L., Paletta, G., & Speranza, M. G. (2011). Analysis of the maximum level policy in a production-distribution system. *Computers & Operations Research*, 38(12), 1731–1746.
- Archetti, C., Savelsbergh, M., & Grazia Speranza, M. (2008). To split or not to split: That is the question. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(1), 114–123.
- Archetti, C., & Speranza, M. G. (2012). Vehicle routing problems with split deliveries. *International Transactions in Operational Research*, 19(1-2), 3–22. doi:10.1111/j.1475-3995.2011.00811.x
- Armentano, V. A., Shiguemoto, A. L., & Løkketangen, A. (2011). Tabu search with path relinking for an integrated production-distribution problem. *Computers and Operations Research*, 38(8), 1199–1209.
- Barany, I., Roy, T. J. Van, & Wolsey, L. A. (1984). Strong Formulations for Multi-Item Capacitated Lot Sizing. *Management Science*, 30(10), 1255–1261.
- Bard, J. F., & Nananukul, N. (2009a). The integrated production-inventory-distribution-routing problem. *Journal of Scheduling*, 12(3), 257–280.
- Bard, J. F., & Nananukul, N. (2009b). Heuristics for a multiperiod inventory routing problem with production decisions. *Computers & Industrial Engineering*, 57(3), 713–723.
- Bard, J. F., & Nananukul, N. (2010). A branch-and-price algorithm for an integrated production and inventory routing problem. *Computers and Operations Research*, 37(12), 2202–2217.
- Bertazzi, L., Paletta, G., & Speranza, M. G. (2005). Minimizing the Total Cost in an Integrated Vendor—Managed Inventory System. *Journal of Heuristics*, 11(5-6), 393–419. doi:10.1007/s10732-005-0616-6
- Bilgen, B., & Ozkarahan, I. (2004). Strategic tactical and operational production-distribution models: a review. *International Journal of Technology Management*. doi:10.1504/IJTM.2004.005059
- Boudia, M., Louly, M. A. O., & Prins, C. (2005). Combined optimization of production and distribution. In *CD-ROM proceedings of the international conference on industrial engineering and systems management, IESM (Vol. 5)*.

- Boudia, M., Louly, M. A. O., & Prins, C. (2007). A reactive GRASP and path relinking for a combined production-distribution problem. *Computers and Operations Research*, 34(11), 3402–3419.
- Boudia, M., Louly, M. A. O., & Prins, C. (2008). Fast heuristics for a combined production planning and vehicle routing problem. *Production Planning and Control*, 19(2), 85–96.
- Boudia, M., & Prins, C. (2009). A memetic algorithm with dynamic population management for an integrated production-distribution problem. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 703–715.
- Bravo, J. J., & Vidal, C. J. (2013). Freight transportation function in supply chain optimization models: A critical review of recent trends. *Expert Systems with Applications*, 40(17), 6742–6757. doi:10.1016/j.eswa.2013.06.015
- Buschkühl, L., Sahling, F., Helber, S., & Tempelmeier, H. (2010). Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches. *OR Spectrum*, 32(2), 231–261. doi:10.1007/s00291-008-0150-7
- Calvete, H. I., Galé, C., & Oliveros, M.-J. (2011). Bilevel model for production–distribution planning solved by using ant colony optimization. *Computers & Operations Research*, 38(1), 320–327. doi:10.1016/j.cor.2010.05.007
- Carlton, W. B., & Barnes, J. W. (1996). Solving the traveling-salesman problem with time windows using tabu search. *IIE transactions*, 28(8), 617–629.
- Černý, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*. doi:10.1007/BF00940812
- Çetinkaya, S., Üster, H., Easwaran, G., & Keskin, B. B. (2009). An integrated outbound logistics model for frito-lay: Coordinating aggregate-level production and distribution decisions. *Interfaces*, 39(5), 460–475.
- Chandra, P., & Fisher, M. L. (1994). Coordination of production and distribution planning. *European Journal of Operational Research*. doi:10.1016/0377-2217(94)90419-7
- Chen, H.-K., Hsueh, C.-F., & Chang, M.-S. (2009). Production scheduling and vehicle routing with time windows for perishable food products. *Computers & Operations Research*, 36(7), 2311–2319. doi:10.1016/j.cor.2008.09.010
- Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4), 568–581. doi:10.1287/opre.12.4.568

- Crainic, T. G., & Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 97(3), 409–438.
- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997a). Ant colonies for the travelling salesman problem. *Biosystems*, 43, 73–81. doi:10.1016/S0303-2647(97)01708-5
- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997b). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1, 53–66. doi:10.1109/4235.585892
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colorni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part B, Cybernetics: a publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society*, 26, 29–41. doi:10.1109/3477.484436
- Erengüç, Ş. S., Simpson, N. C., & Vakharia, A. J. (1999). Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review. *European Journal of Operational Research*, 115(2), 219–236.
- Fahimnia, B., Farahani, R. Z., Marian, R., & Luong, L. (2013). A review and critique on integrated production–distribution planning models and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 1–19.
- Feo, T. A., & Resende, M. G. . (1989). A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters*. doi:10.1016/0167-6377(89)90002-3
- Fischetti, M., & Lodi, A. (2003). Local branching. *Mathematical Programming*, 98(1-3), 23–47. doi:10.1007/s10107-003-0395-5
- Fumero, F., & Vercellis, C. (1999). Synchronized development of production, inventory, and distribution schedules. *Transportation Science*, 33(3), 330–340.
- Gendreau, M., Laporte, G., & Semet, F. (1998). A branch-and-cut algorithm for the undirected selective traveling salesman problem. *Networks*, 32(4), 263–273. doi:10.1002/(SICI)1097-0037(199812)32:4<263::AID-NET3>3.0.CO;2-Q
- Gillett, B. E., & Miller, L. R. (1974). A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem. *Operations Research*. doi:10.1287/opre.22.2.340
- Glover, F. (1989). Tabu Search {--} Part I. *ORSA Journal on Computing*, 1, 190–206. doi:10.1287/ijoc.1.3.190
- Glover, F. (1990). Tabu Search--Part II. *INFORMS Journal on Computing*. doi:10.1287/ijoc.2.1.4
- Glover, F. (1998). A template for scatter search and path relinking. *Artificial Evolution*, 1363, 3–51. doi:10.1.1.138.4182



- Glover, F., Laguna, M., & Martí, R. (2000). Fundamentals of Scatter Search and Path Relinking. *Control and Cybernetics*, 39, 653–684. doi:10.1007/0-306-48056-5\_1
- Glover, F., & McMillan, C. (1986). The general employee scheduling problem. An integration of MS and AI. *Computers & Operations Research*, 13(5), 563–573.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor MI University of Michigan Press (Vol. Ann Arbor, pp. 1–228). doi:10.1086/418447
- Karimi, B., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Wilson, J. M. (2003). The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, 31(5), 365–378.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science (New York, N.Y.)*, 220, 671–680. doi:10.1126/science.220.4598.671
- Kuhn, H., & Liske, T. (2011). Simultaneous supply and production planning. *International Journal of Production Research*, 49(13), 3795–3813.
- Lee, H. L., & Nahmias, S. (1993). Chapter 1 Single-Product, single-Location models. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 4, 3–55.
- Lei, L., Liu, S., Ruszczyński, A., & Park, S. (2006). On the integrated production, inventory, and distribution routing problem. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 38(11), 955–970. doi:10.1080/07408170600862688
- Leung, J. M. Y., Magnanti, T. L., & Vachani, R. (1989). Facets and algorithms for capacitated lot sizing. *Mathematical Programming*, 45(1-3), 331–359. doi:10.1007/BF01589110
- Lin, S., & Kernighan, B. W. (1973). An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*. doi:10.1287/opre.21.2.498
- Metters, R. D. (1996). Interdependent transportation and production activity at the United States postal service. *Journal of the Operational Research Society*, 47(1), 27–37.
- Moscato, P. (1989). On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts - Towards Memetic Algorithms. *Caltech concurrent computation program, C3P Report*, 826.
- Mula, J., Poler, R., García-Sabater, J. P., & Lario, F. C. (2006). Models for production planning under uncertainty: A review. *International Journal of Production Economics*, 103(1), 271–285.

- Mula, Josefa, Peidro, D., Díaz-Madroñero, M., & Vicens, E. (2010). Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204(3), 377–390.
- Padberg, M., & Rinaldi, G. (1991). A Branch-and-Cut Algorithm for the Resolution of Large-Scale Symmetric Traveling Salesman Problems. *SIAM Review*. doi:10.1137/1033004
- Peidro, D., Mula, J., Poler, R., & Verdegay, J.-L. (2009). Fuzzy optimization for supply chain planning under supply, demand and process uncertainties. *Fuzzy Sets and Systems*, 160(18), 2640–2657.
- Perea-López, E., Ydstie, B. E., & Grossmann, I. E. (2003). A model predictive control strategy for supply chain optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 27(8), 1201–1218.
- Pochet, Y., & Wolsey, L. A. (2006). *Production Planning by Mixed Integer Programming*. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. Springer.
- Ropke, S., & Pisinger, D. (2006). An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. *Transportation Science*, 40(4), 455–472. doi:10.1287/trsc.1050.0135
- Rosenkrantz, D. J., Stearns, R. E., & Lewis, P. M. (1974). Approximate algorithms for the traveling salesperson problem. *15th Annual Symposium on Switching and Automata Theory (swat 1974)*. doi:10.1109/SWAT.1974.4
- Schmid, V., Doerner, K. F., & Laporte, G. (2013). Rich routing problems arising in supply chain management. *European Journal of Operational Research*. doi:10.1016/j.ejor.2012.08.014
- Shiguemoto, A. L., & Armentano, V. A. (2010). A tabu search procedure for coordinating production, inventory and distribution routing problems. *International Transactions in Operational Research*, 17(2), 179–195. doi:10.1111/j.1475-3995.2009.00741.x
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35, 254–265. doi:10.1287/opre.35.2.254
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*. (P. Toth & D. Vigo, Eds.) *Optimization* (Vol. 9, p. 367). Society for Industrial and Applied Mathematics. doi:10.1137/1.9780898718515
- Van Buer, M. G., Woodruff, D. L., & Olson, R. T. (1999). Solving the medium newspaper production/distribution problem. *European Journal of Operational Research*, 115(2), 237–253. doi:10.1016/S0377-2217(98)00300-2

Verdegay, J. L., Yager, R. R., & Bonissone, P. P. (2008). On heuristics as a fundamental constituent of soft computing. *Fuzzy Sets and Systems*, 159(7), 846–855.

Vidal, C. J., & Goetschalckx, M. (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98(1), 1–18.

Voss, S., Osman, I. H., & Roucairol, C. (1999). Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization.

Wagner, H. M., & Whitin, T. M. (1958). Dynamic Version of the Economic Lot Size Model. *Management Science*, 5(1), 89–96. doi:10.1287/mnsc.5.1.89

Wang, J., & Shu, Y.-F. (2005). Fuzzy decision modeling for supply chain management. *Fuzzy Sets and Systems*, 150(1), 107–127.

CAPÍTULO IV

**PLANTEAMIENTO DEL MODELO ANALÍTICO MRP IV**



---

## CAPÍTULO IV

### PLANTEAMIENTO DEL MODELO ANALÍTICO MRP IV

---

1.	Introducción.....	IV-2
2.	Modelos de referencia.....	IV-2
2.1	Modelos MRP: el modelo de Mula et al. (2006) .....	IV-3
2.2	Modelos de transporte de camión completo: Peidro et al. (2010), Díaz-Madroñero et al. (2012), Díaz-Madroñero et al. (2010) y Díaz-Madroñero et al. (2014) .....	IV-6
2.3	Modelos de <i>production routing problem</i> : el modelo de Adulyasak et al. (2014) .....	IV-11
2.4	Modelos de <i>inventory routing problem</i> : el modelo de Agra et al. (2013) ..	IV-15
2.5	Modelos de rutas <i>milk-run</i> : el modelo de Chuah y Yingling (2005) ..	IV-20
2.6	Comparación de los modelos.....	IV-23
3.	Planteamiento del modelo analítico MRP IV.....	IV-28
3.1	Descripción del problema.....	IV-28
3.2	Formulación del modelo analítico MRP IV.....	IV-37
4.	Conclusiones.....	IV-50
5.	Referencias.....	IV-50

## 1. Introducción

En la actualidad, en un entorno económico caracterizado por la globalización y la deslocalización de los proveedores los sistemas de planificación de la producción más extendidos presentan diferentes deficiencias debido a que fueron diseñados en épocas donde se perseguía el incremento de la productividad en entornos de fabricación locales. En este sentido, los sistemas de planificación actuales, basados principalmente en las propuestas de Orlicky (1975) (MRP) y White (1981) (MRP II), se centran básicamente en la planificación de materiales y capacidades de producción, constituyendo una limitación importante en empresas con proveedores situados en países lejanos. En estos casos, el transporte resulta un elemento de gran importancia puesto que determina la disponibilidad de componentes y materias primas en los centros de fabricación y, por lo tanto, influyen en el nivel de servicio al cliente. Sin embargo, a pesar de su importancia y de su estrecha relación, y de los altos costes que implica, las actividades de planificación de la producción y planificación de transporte suelen gestionarse de una forma independiente, obteniendo resultados subóptimos y, en ocasiones, infactibles.

El objetivo de este capítulo es proponer un modelo para la planificación de la producción y el transporte de aprovisionamiento de materias primas y componentes en un entorno de fabricación de ensamblaje o MRP, que contemple los principales modos de envío presentes en entornos industriales actuales, así como las restricciones de capacidad de producción, almacenamiento y transporte, e integre ambas planificaciones en un mismo sistema de decisión o modelo. Para ello, en el apartado 2 se analizan los modelos de referencia utilizados como base para el desarrollo del modelo conceptual de MRP IV, que se presenta en el apartado 3, y en el que se describe el problema a abordar y se identifican las posibles entradas, salidas, objetivos, restricciones, enfoques de modelado y de solución. Asimismo, en la sección 3 se presenta el modelo analítico MRP IV formulado a partir del análisis de los modelos de referencia seleccionados y del modelo conceptual propuesto. Por último, en el apartado 4 se presentan las conclusiones de este capítulo.

## 2. Modelos de referencia

Tal y como se ha analizado en el capítulo 2, existen múltiples contribuciones en la literatura que han abordado el desarrollo de modelos de programación matemática para la planificación táctica de la producción. Asimismo, el capítulo 3 analiza un conjunto más reducido de trabajos que permiten integrar la planificación de la producción e inventario con el diseño de rutas de transporte. Este problema es conocido como *production routing problem*, y es una extensión del problema de planificación integrada de rutas de transporte e inventario, denominado, clásicamente, *inventory routing problem*. Por otro lado, en la literatura también pueden encontrarse

contribuciones orientadas a la planificación del transporte de aprovisionamiento mediante camiones completos, o el diseño de rutas de aprovisionamiento repetitivas, denominadas *milk-run*, frecuentes en la industria del automóvil. En este apartado se han seleccionado algunos de los trabajos más representativos que servirán de base para el desarrollo de un nuevo modelo analítico denominado MRP IV.

Los modelos seleccionados son:

1. Modelos MRP: Mula et al. (2006a)
2. Modelos de transporte de camión completo: Peidro et al. (2010), Díaz-Madroñero et al. (2012), Díaz-Madroñero et al. (2010), Díaz-Madroñero et al. (2014)
3. Modelos de *production routing problem*: Adulyasak et al. (2014)
4. Modelos de *inventory routing problem*: Agra et al. (2013)
5. Modelos de rutas *milk-run*: Chuah y Yingling (2005)

Esta selección se ha basado en el aspecto novedoso de los trabajos y en el índice de impacto de la publicación que los recoge. En el caso de los trabajos propios, una motivación adicional se basa en que han sido trabajos iniciales para el desarrollo del modelo final MRP IV. A continuación, se realiza una descripción de los trabajos seleccionados.

## 2.1 Modelos MRP: el modelo de Mula et al. (2006)

Mula et al. (2006) proponen un modelo de programación lineal para la optimización del problema de planificación de la producción en un entorno de fabricación tipo MRP, multiproducto, multinivel y multiperiodo con limitaciones de capacidad. El objetivo principal es determinar el plan maestro de producción, el MRP para cada componente en cada periodo, los niveles de inventario, la demanda retrasada y los niveles de utilización de la capacidad de producción a lo largo de un horizonte de planificación. La nomenclatura y la formulación del modelo es la siguiente:

### Índices

- $T$       Número de periodos del horizonte de planificación ( $t = 1 \dots T$ )  
 $I$       Número de productos ( $i = 1 \dots I$ )



$J$  Número de productos padre en la lista de materiales ( $j = 1 \dots J$ )

$R$  Número de recursos ( $r = 1 \dots R$ )

Parámetros

$d_{it}$  Demanda de mercado del producto  $i$  en el periodo  $t$

$\alpha_{ij}$  Cantidad necesaria de  $i$  para producir una unidad del producto  $j$

$LT_i$  Tiempo de suministro del producto  $i$

$RP_{it}$  Recepciones programadas del producto  $i$  en el periodo  $t$

$INVT_{i0}$  Inventario del producto  $i$  en el periodo 0

$Rd_{i0}$  Demanda retrasada del producto  $i$  en el periodo 0

$CAP_{rt}$  Capacidad de producción del recurso  $r$  en el periodo  $t$

$AR_{ir}$  Tiempo necesario para fabricar el producto  $i$  en el recurso  $r$

Variables de decisión

$P_{it}$  Cantidad de producto  $i$  a producir en el periodo  $t$

$INV_{it}$  Inventario de producto  $i$  al final del periodo  $t$

$Rd_{it}$  Demanda retrasada de producto  $i$  al final del periodo  $t$

$Toc_{rt}$  Horas ociosas del recurso  $r$  en el periodo  $t$

$Tex_{rt}$  Horas extra del recurso  $r$  en el periodo  $t$

Función objetivo

Minimizar  $z =$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (cp_i P_{it} + ci_i INVT_{it} + crd_i Rd_{it}) + \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T (ctoc_n Toc_n + ctex_n Tex_n)$$

(IV-1)

Restricciones

$$INVT_{i,t-1} + P_{i,t-LT_i} + RP_{it} - INVT_{i,t} - Rd_{i,t-1} - \sum_{j=1}^I \alpha_{ij} (P_{jt} + RP_{jt}) + Rd_{it} = d_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (IV-2)$$

$$\sum_{i=1}^I P_{it} AR_{ir} + Toc_n - Tex_n = CAP_n \quad \forall r, \forall t \quad (IV-3)$$

$$Rd_{iT} = 0 \quad \forall i \quad (IV-4)$$

$$P_{it}, INVT_{it}, Rd_{it}, Toc_n, Tex_n \geq 0 \quad \forall i, \forall r, \forall t \quad (IV-5)$$

La función objetivo (IV-1) considera el conjunto de costes totales a minimizar: costes de producción, costes de inventario, costes de tiempo extra utilizado por los recursos productivos y el coste de tiempo ocioso de los mismos. Los costes de penalización correspondientes se representan por  $cp_i$ ,  $ci_i$ ,  $ctex_{rt}$ ,  $ctoc_{rt}$ . Además, este modelo incluye la posibilidad de satisfacer demanda con retraso con una penalización adicional  $crd_i$ . Se asume que este coste es lineal al número de unidades retrasadas en cada periodo.

La restricción (IV-2) se corresponde con la ecuación de balance de inventario para cada producto. Esta restricción tiene en cuenta los retrasos de demanda y los considera como un nivel negativo de inventario. Cabe destacar la presencia de las recepciones programadas,  $RP_{it}$ , que garantizan la continuidad del plan de producción a través de ejecuciones sucesivas a lo largo del horizonte de planificación considerado.

La producción en cada periodo está limitada por la disponibilidad de un grupo de recursos compartidos. La restricción (IV-3) considera los límites de capacidad de estos recursos. Las variables de decisión  $Toc_n$  y  $Tex_n$  no están limitadas por ningún parámetro establecido pero se penalizan con los costes correspondientes en la función objetivo. La restricción (IV-4) elimina los retrasos de demanda en el último periodo del horizonte de planificación y la restricción (IV-5) contempla la no negatividad de las variables de decisión.

## 2.2 Modelos de transporte de camión completo: Peidro et al. (2010), Díaz-Madroñero et al. (2012), Díaz-Madroñero et al. (2010) y Díaz-Madroñero et al. (2014)

Peidro et al. (2010) y Díaz-Madroñero et al. (2012) proponen diferentes enfoques para resolver un modelo fuzzy multiobjetivo de planificación operativa de transporte aplicado a una cadena de suministro real perteneciente a la industria del automóvil. El problema de planificación de transporte a nivel operativo considerado optimiza el uso de los recursos de transporte y los niveles de inventario determinando la cantidad de cada producto a aprovisionar bajo limitaciones de almacenamiento y transporte, tales como la capacidad de transporte, el número de camiones disponibles por periodo y el porcentaje mínimo de ocupación de camión a completar. Por otro lado, los tiempos de transporte desde los proveedores no se consideran. La nomenclatura y la formulación del modelo se muestran a continuación:

### Índices

$I$	Conjunto de productos ( $i = 1, 2, \dots, I$ )
$J$	Conjunto de camiones ( $j = 1, 2, \dots, J$ )
$T$	Conjunto de periodos de planificación (días) ( $t = 1, 2 \dots T$ )

### Parámetros

$u_i$	Dimensiones del producto $i$ (metros/unidad)
$l_i$	Número de unidades que componen cada lote de producto $i$ (unidades)
$W_i$	Máximo espacio de almacén disponible para el producto $i$ (unidades)
$D_{it}$	Demanda del producto $i$ en $t$ (unidades)
$\tilde{M}$	Longitud máxima fuzzy de los camiones disponibles (en metros lineales)
$m$	Ocupación mínima de camión (en metros lineales)
$IO_i$	Nivel de inventario de producto $i$ en periodo 0

Variables de decisión

$Q_{ijt}$	Unidades transportadas de producto $i$ en camión $j$ en periodo $t$ (unidades)
$I_{it}$	Nivel de inventario de producto $i$ al final del periodo $t$ (unidades)
$K_{ijt}$	Número de lotes a pedir del producto $i$ en camión $j$ en periodo $t$
$Y_{jt}$	1 si el camión $j$ se utiliza en el periodo $t$ , 0 en otro caso

Funciones objetivo

Minimizar el número total de camiones utilizados

$$\text{Minimizar } z_1 \cong \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Y_{jt} \quad (\text{IV-6})$$

Minimizar el inventario total generado

$$\text{Minimizar } z_2 \cong \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T I_{it} \quad (\text{IV-7})$$

Restricciones

$$I_{it} = I_{i(t-1)} - D_{it} + \sum_{j=1}^J Q_{ijt} \quad \forall i, \forall t \quad (\text{IV-8})$$

$$Q_{ijt} = K_{ijt} \cdot l_i \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (\text{IV-9})$$

$$I_{it} \leq W_i \quad \forall i, \forall t \quad (\text{IV-10})$$

$$\sum_{i=1}^I Q_{ijt} \cdot u_i \leq \tilde{M} \cdot Y_{jt} \quad \forall j, \forall t \quad (\text{IV-11})$$

$$\sum_{i=1}^I Q_{ijt} \cdot u_i \geq m \cdot Y_{jt} \quad \forall j, \forall t \quad (\text{IV-12})$$

$$I_{it} \geq D_{it+1} \quad \forall i, \forall t \quad (\text{IV-13})$$

$$I_{it}, K_{it}, Q_{ijt} \geq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (\text{IV-14})$$

La restricción (IV-8) representa la ecuación de balance de inventario. La ecuación (IV-9) representa la cantidad a pedir de cada producto en cada camión en cada periodo, determinada como un múltiplo entero del número de unidades que componen un lote. La restricción (IV-10) limita el nivel de inventario de cada producto en cada periodo de acuerdo con las dimensiones máximas del almacén. La restricción (IV-11) garantiza que, como mucho, se ocuparán aproximadamente  $M$  metros lineales en cada camión, mientras que la restricción (IV-12) asegura que el espacio ocupado en cada camión estará por encima de un mínimo determinado ( $m$ ) para evitar un uso ineficiente de los mismos. A continuación, la restricción (IV-13) asegura un día de cobertura de los niveles de inventario a final de cada periodo. De esta forma, el modelo no crea retrasos de demanda. Finalmente, la restricción (IV-14) establece la condición de no negatividad de las variables de decisión.

Por otro lado, en un contexto similar, Díaz-Madroñero et al. (2010) y Díaz-Madroñero et al. (2014) desarrollan un modelo basado en programación matemática fuzzy como herramienta para la toma de decisiones multiobjetivo relacionada con la planificación del transporte de camiones completos en una cadena de suministro perteneciente al sector del automóvil. En este contexto, los proveedores establecen agrupaciones de productos. Cada grupo de productos está formado por 3 ítems determinados por las diferentes opciones que el ensamblador de automóviles ofrece a sus clientes. Los proveedores obligan a que los pedidos sean realizados para cada grupo de productos de forma conjunta y según su tamaño de lote asociado, con un alto coste de penalización adicional para aquellas piezas pedidas de forma desequilibrada. La carga del camión se realiza en función de la capacidad disponible (entre 84 y 90 contenedores por camión), las agrupaciones de productos que han de ser pedidos de forma conjunta y el tamaño de lote de pedido asociado a estos grupos, asumiendo que la demanda es firme a lo largo de todo el horizonte de planificación y sin considerar tiempos de transporte.

El modelo propuesto, basado en el método de recogida mediante camión completo, determina la cantidad de cada producto y el número de contenedores a cargar en cada camión en cada periodo. La novedad principal de este modelo es la optimiza-

ción de las cargas en cada camión, asegurando la cobertura de la demanda con un nivel mínimo de inventario a nivel operativo.

La nomenclatura y la formulación del modelo se muestran a continuación:

### Índices

$I$	Conjunto de productos ( $i = 1, 2, \dots, I$ )
$J$	Conjunto de grupos de productos formado por productos que deben ser pedidos conjuntamente ( $j = 1, 2, \dots, J$ )
$K$	Conjunto de camiones ( $k = 1, 2, \dots, K$ )
$T$	Conjunto de periodos de planificación (días) ( $t = 1, 2 \dots T$ )

### Parámetros

$u_i$	Número de unidades de producto $i$ que caben en un contenedor (unidades)
$l_j$	Número de unidades que componen cada lote de pedido del grupo $j$ (unidades)
$b_{ij}$	1 si el producto $i$ pertenece al grupo $j$ , 0 en caso contrario
$D_{it}$	Demanda del producto $i$ en el periodo $t$ (se considera firme)
$\tilde{M}$	Capacidad máxima fuzzy de cada vehículo disponible (en contenedores)
$m$ :	Mínima capacidad a ocupar en cada vehículo (en contenedores)
$I_{0i}$ :	Nivel de inventario del producto $i$ en el periodo 0
$\eta$ :	Porcentaje mínimo de la demanda del periodo $t+1$ que debe disponerse en inventario al final del periodo $t$

### Variables de decisión

$Q_{ikt}$	Unidades a transportar del producto $i$ en el camión $k$ en el periodo $t$ (unidades)
$G_{ijkt}$	Unidades a transportar del producto $i$ correspondientes el grupo $j$ , en el camión $k$ , en el periodo $t$ (unidades)

$C_{kt}$	Contenedores transportados por el camión $k$ en el periodo $t$ (unidades)
$I_{it}$	Inventario del producto $i$ al final del periodo $t$ (unidades)
$K_{jkt}$	Número de lotes a pedir de los productos del grupo $j$ , a transportar en el camión $k$ , en el periodo $t$ (unidades)
$Y_{kt}$	1 si el camión $k$ se utiliza en el periodo $t$ , 0 en caso contrario

Funciones objetivo

Minimizar el número total de camiones utilizados

$$\text{Minimizar } z_1 \cong \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Y_{jt} \quad (\text{IV-15})$$

Minimizar el inventario total generado

$$\text{Minimizar } z_2 \cong \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T I_{it} \quad (\text{IV-16})$$

Restricciones

$$I_{it} = I_{i(t-1)} - D_{it} + \sum_{k=1}^K Q_{ikt} \quad \forall i, \forall t \quad (\text{IV-17})$$

$$Q_{ikt} = \sum_{j=1}^J G_{ijk} \quad \forall i, \forall k, \forall t \quad (\text{IV-18})$$

$$G_{ijk} = K_{jkt} \cdot l_j \cdot b_{ij} \quad \forall i, \forall j, \forall k, \forall t \quad (\text{IV-19})$$

$$C_{kt} = \sum_{i=1}^I Q_{ikt} / u_i \quad \forall k, \forall t \quad (\text{IV-20})$$

$$C_{kt} \leq \tilde{M} \cdot Y_{kt} \quad \forall k, \forall t \quad (\text{IV-21})$$

$$C_{kt} \geq m \cdot Y_{kt} \quad \forall k, \forall t \quad (\text{IV-22})$$

$$I_{it} \geq \eta \cdot D_{it+1} \quad \forall i, \forall t \quad (\text{IV-23})$$

$$I_{it}, Q_{ikt}, G_{ijkt}, C_{kt}, K_{jkt}, Y_{kt} \geq 0 \quad \forall i, \forall j, \forall k, \forall t \quad (\text{IV-24})$$

La restricción (IV-17) representa el balance del inventario. La restricción (IV-18) representa la cantidad total a pedir de cada producto, en cada camión, por cada periodo. La restricción (IV-19) establece la cantidad a pedir de cada producto, según cada una de las agrupaciones de productos a las que pertenece. La restricción (IV-20) calcula los contenedores a colocar en cada camión, en función de las cantidades a pedir por cada producto y de las unidades que caben por contenedor. La restricción (IV-21) asegura que no se sobrepase el número máximo de contenedores que caben en cada camión, mientras que la restricción (IV-22) establece el número mínimo de contenedores que se cargarán en cada camión. La restricción (IV-23) asegura un inventario capaz de cumplir al menos una proporción  $\eta$  de la demanda con un día de antelación. La restricción (IV-24) establece las condiciones de no negatividad de las variables de decisión

### 2.3 Modelos de *production routing problem*: el modelo de Adulyasak et al. (2014)

Adulyasak et al. (2014) proponen un modelo de programación lineal entera mixta para abordar el *production routing problem*, con la finalidad de determinar decisiones de producción, inventario, distribución y rutas de una forma integrada. El escenario considerado por Adulyasak et al. (2014) se corresponde con una planta de producción con un almacén con limitaciones de capacidad para productos finales, varios clientes con almacenes con limitaciones de capacidad y una flota de camiones homogéneos limitados en número y capacidad.

Este modelo determina la cantidad a fabricar de cada producto por periodo, los niveles de inventario en los almacenes de la planta productiva y en los clientes en cada periodo, las rutas de transporte, así como el número necesario de camiones a utilizar y su ocupación. Sin embargo, los autores realizan diferentes suposiciones tales como que las rutas de transporte han de comenzar y finalizar en la planta de producción, y deben completarse en un solo periodo, así como la existencia de distancias simétricas entre nodos. Además, los tiempos de tránsito entre los nodos



tampoco se consideran y la demanda debe satisfacerse en cada periodo por lo que no se permiten retrasos de demanda.

El modelo de programación matemática propuesto por Adulyasak et al. (2014) se define en un grafo  $G = (N, E)$  donde  $E = \{(i, j): i, j \in N, i \neq j\}$  con la siguiente notación:

### Índices

$T$	Conjunto de $l$ periodos temporales, representados por $t \in \{1, 2, \dots, l\}$
$N$	Conjunto de planta de producción y clients, representados por $i \in \{0, \dots, n\}$ donde la planta de producción se representa por el nodo 0 y $N_c = N \setminus \{0\}$ es el subconjunto de los $n$ clientes
$K$	Conjunto de $m$ vehículos, representados por $k \in \{1, \dots, m\}$

### Parámetros

$u$	Coste unitario de producción
$f$	Coste fijo por cada setup
$h_i$	coste unitario de inventario en el nodo $i$
$c_{ij}$	coste de transporte desde nodo $i$ a nodo $j$ (se assume que $c_{ij} = c_{ji}, \forall (i, j) \in E$ )
$d_{it}$	Demanda del cliente $i$ en el periodo $t$
$C$	Capacidad de producción
$Q$	Capacidad de cada vehículo
$L_i$	Capacidad de almacenamiento en el nodo $i$
$I_{i0}$	Inventario inicial disponible en el nodo $i$ ;
$M_t$	igual al $\min \{C, \sum_{j=t}^l \sum_{i \in N_c} d_{ij}\}$
$\tilde{M}_{it}$	igual al $\min \{Q, \sum_{j=t}^l d_{ij}\}$

### Variables de decisión

$p_t$	Cantidad a producir en periodo $t$
-------	------------------------------------

$I_{it}$	Inventario en el nodo $i$ al final del periodo $t$
$r_{it}$	Cantidad a enviar al cliente $i$ en el periodo $t$
$y_t$	1 si se produce un setup en el periodo $t$ , 0 en otro caso
$z_{it}$	1 si el cliente $i$ se visita en el periodo $t$ , 0 en otro caso
$x_{ijkt}$	1 si el vehículo $k$ viaja directamente desde el nodo $i$ al nodo $j$ en el periodo $t$ , 0 en otro caso
$q_{ikt}$	Cantidad entregada al cliente $i$ con el vehículo $k$ en el periodo $t$

### Función objetivo

Minimizar costes totales

$$\text{Minimizar } z = \sum_{t \in T} \left( u \cdot p_t + f \cdot y_t + \sum_{i \in N} h_i I_{it} + \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijkt} \right) \quad (\text{IV-25})$$

### Restricciones

$$I_{0,t-1} + p_t = \sum_{i \in Nc} r_{it} + I_{0t} \quad \forall t \in T \quad (\text{IV-26})$$

$$I_{i,t-1} + r_{it} = d_{it} + I_{it} \quad \forall i \in Nc, \forall t \in T \quad (\text{IV-27})$$

$$p_t \leq M_t y_t \quad \forall t \in T \quad (\text{IV-28})$$

$$I_{it} \leq L_i \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (\text{IV-29})$$

$$r_{it} = \sum_{k \in K} q_{ikt} \quad \forall i \in Nc, \forall t \in T \quad (\text{IV-30})$$

$$q_{ikt} \leq \tilde{M}_{it} \sum_{j \in N} x_{ijkt} \quad \forall k \in K, \forall i \in N_c, \forall t \in T \quad (\text{IV-31})$$

$$\sum_{i \in N_c} q_{ikt} \leq Q \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{IV-32})$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk t} = z_{it} \quad \forall i \in N_c, \forall t \in T \quad (\text{IV-33})$$

$$\sum_{j \in N} x_{jik t} = \sum_{j \in N} x_{ijkt} \quad \forall k \in K, \forall i \in N_c, \forall t \in T \quad (\text{IV-34})$$

$$\sum_{j \in N_c} x_{0,jkt} \leq 1 \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{IV-35})$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk t} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset N_c, |S| \geq 2, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{IV-36})$$

$$p_{ib}, I_{ib}, r_{ib}, q_{ikt} \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{IV-37})$$

$$y_b, z_{ib}, x_{ijk t} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, \forall k \in K, \forall t \in T \quad (\text{IV-38})$$

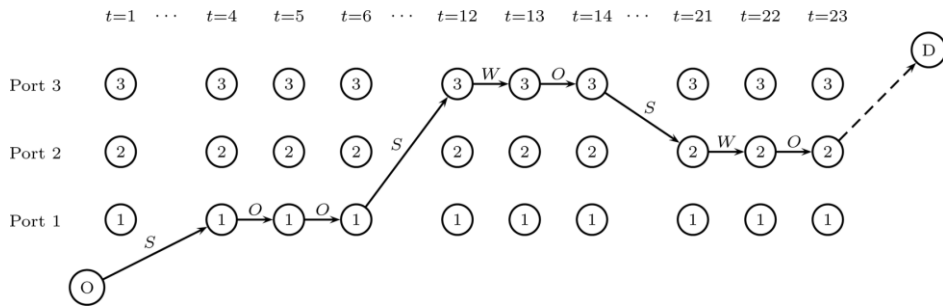
La función objetivo (IV-25) minimiza los costes totales incluyendo los costes variables y fijos de producción por *setups*, los costes de inventario y los costes de transporte por rutas realizadas. Las restricciones (IV-26) y (IV-27) se corresponden con las ecuaciones de balance de inventario en la planta de producción y en los clientes, respectivamente. La restricción (IV-28) fuerza que la variable de *setup* tome el valor 1 si existe producción y limita la cantidad de producción al mínimo de la capacidad de producción o el total de la demanda de los periodos restantes. La restricción (IV-29) impone los límites de inventario almacenado tanto en la planta de producción como en los clientes. La restricción (IV-30) establece que la cantidad total a enviar a cada cliente es igual a la cantidad total enviada por todos los vehículos. La restricción (IV-31) permite una cantidad positiva de envío del vehículo  $k$  al nodo  $i$  en el periodo  $t$  solo si el nodo es visitado por el vehículo en el periodo  $t$ . La restricción (IV-32) limita la cantidad total cargada en cada camión. La restricción (IV-

33) hace que  $z_{it} = 1$  si hay un camión saliendo desde el nodo  $i$ . La restricción (IV-34) se corresponde con la ecuación de conservación de flujo de vehículos en cada nodo, mientras que la restricción (IV-35) establece que cada vehículo puede salir desde la planta de fabricación, como máximo, una vez por periodo. La restricción (IV-36) corresponde con la eliminación de bucles en las rutas y las restricciones (IV-37) y (IV-38) con las condiciones de no negatividad y carácter binario de las variables de decisión, respectivamente.

## 2.4 Modelos de *inventory routing problem*: el modelo de Agra et al. (2013)

Agra et al. (2013) proponen un modelo de tiempo discreto relacionado con el *inventory routing problem* en el ámbito de transporte marítimo. El problema considerado por los autores es de carácter monoproducto. Este producto se fabrica en puertos de carga y se descarga en puertos de consumo. Además, este producto puede almacenarse en los puertos, dependiendo de sus capacidades de almacenamiento, que pueden ser variables con el tiempo. Las tasas de producción y consumo son deterministas pero pueden variar, a su vez, con el tiempo a lo largo del horizonte de planificación. El número de barcos que pueden cargar o descargar a la vez en los puertos está limitado por las capacidades de los muelles o embarcaderos. Una flota heterogénea de barcos, con diferentes capacidades, velocidades, costes de operación y tasas de carga y descarga se utiliza para el transporte del producto. El problema de planificación consiste en diseñar las rutas y la programación para la flota de barcos de forma que se minimicen los costes de transporte, los costes de operación en cada puerto y determinar las cantidades a cargar o descargar sin exceder las capacidades de almacenamiento. En función del segmento en el que la flota opere, el periodo de planificación se extiende desde una semana a varios meses.

Se propone una formulación de tiempo discreto porque tanto las tasas de producción como de consumo pueden variar a lo largo del horizonte de planificación. Por lo tanto, se asume que los tiempos de espera, los tiempos de carga y descarga y los tiempos de navegación entre nodos se pueden expresar como un múltiplo entero del periodo básico de tiempo. Se puede utilizar una red de tiempo expandido para ilustrar el movimiento de un barco (Figura IV-1). En este ejemplo, el barco parte de una posición inicial  $O$  y navega hacia el Puerto 1 donde opera durante dos periodos antes de navegar hasta el Puerto 3. Allí, este barco espera durante un periodo antes de operar y viajar hacia el Puerto 2. En este puerto, se necesita un periodo de espera antes de realizar las operaciones de carga y de descarga que ponen fin a la ruta del barco. Por motivos de modelado, se asume que en este momento el barco navega a un nodo artificial final denominado  $D$ . Por lo tanto, la programación de cada barco viene determinada por el camino seguido a través de la red.



**Figura IV-1.** Ejemplo del movimiento de un barco en una red de tiempo expandido

La nomenclatura y la formulación del modelo se muestran a continuación:

Índices

- $N^P$  Conjunto de puertos de producción con índices  $i$  y  $j$
- $N^D$  Conjunto de puertos de consumo con índices  $i$  y  $j$
- $N$  Conjunto de puertos de producción y consumo con índices  $i$  y  $j$ ,  
 $N = N^P \cup N^D$
- $T$  Conjunto de periodos de tiempo con índice  $t$
- $V$  Conjunto de barcos con índice  $v$

Parámetros

- $B_{it}$  Capacidad de muelles de amarre en número de barcos en el puerto  $i$  en el periodo  $t$
- $C_{ijv}^T$  Coste de navegación desde el puerto  $i$  al puerto  $j$  con el barco  $v$
- $C_v^W$  Coste de espera del barco  $v$  por periodo de tiempo
- $C_{iv}^P$  Coste de operación en el puerto  $i$  para el barco  $v$  por periodo de tiempo
- $D_{it}$  Consumo en el puerto  $i$  en el periodo  $t$
- $P_{it}$  Producción en el puerto  $i$  en el periodo  $t$
- $K_v$  Capacidad del barco  $v$

$L_v^0$	<i>Carga inicial a bordo del barco v</i>
$Q_v$	<i>Límite superior de la cantidad que el barco v carga/descarga por periodo de tiempo</i>
$\bar{S}_{it}$	<i>Límite superior del nivel de inventario en el puerto i al final del periodo de tiempo t</i>
$\underline{S}_{it}$	<i>Límite inferior del nivel de inventario en el puerto i al final del periodo de tiempo t</i>
$S_i^0$	<i>Nivel de inventario en el puerto i al principio del horizonte de planificación</i>
$o(v)$	<i>Posición inicial del barco v</i>
$d(v)$	<i>Nodo final artificial para el barco v</i>
$T_{ijv}$	<i>Tiempo de tránsito de navegación entre el puerto i y el puerto j para el barco v</i>

Variables de decisión

$o_{ivt}$	<i>1 si el barco v opera (carga/descarga) en el puerto i en el periodo t, 0 en caso contrario</i>
$x_{ijvt}$	<i>1 si el barco v navega desde el puerto i al puerto j, comenzando en el periodo t, 0 en caso contrario</i>
$w_{ivt}$	<i>1 si el barco v está esperando fuera del puerto i en el periodo t, 0 en caso contrario</i>
$l_{vt}$	<i>Carga a bordo del barco v al final del periodo de tiempo t</i>
$q_{ivt}$	<i>Cantidad cargada/descargada en el periodo de tiempo t en el puerto i por el barco v</i>
$s_{it}$	<i>Nivel de inventario en el puerto i al final del periodo de tiempo t</i>

Función objetivo

Minimizar costes totales

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } z = & \sum_{v \in V} \sum_{i \in N \cup \{o(v)\}} \sum_{j \in N \cup \{d(v)\}} \sum_{t \in T} C_{ijv}^T x_{ijvt} + \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} C_{iv}^P o_{ivt} + \\ & + \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \sum_{t \in T} C_v^W w_{ivt} \end{aligned} \quad (\text{IV-39})$$

Restricciones

$$\sum_{j \in N \cup \{o(v)\}} \sum_{t \in T} x_{o(v)jvt} = 1 \quad \forall v \in V \quad (\text{IV-40})$$

$$\sum_{i \in N \cup \{o(v)\}} \sum_{t \in T} x_{id(v)vt} = 1 \quad \forall v \in V \quad (\text{IV-41})$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \in N \cup \{o(v)\}} x_{jiv,t-T_{jv}} + w_{iv,t-1} + o_{iv,t-1} = \\ \sum_{j \in N \cup \{d(v)\}} x_{ijvt} + w_{ivt} + o_{ivt} \end{aligned} \quad \forall v \in V, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (\text{IV-42})$$

$$o_{iv,t-1} \leq \sum_{j \in N \cup \{d(v)\}} x_{ijvt} + o_{ivt} \quad \forall v \in V, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (\text{IV-43})$$

$$o_{iv,t-1} \geq \sum_{j \in N \cup \{d(v)\}} x_{ijvt} \quad \forall v \in V, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (\text{IV-44})$$

$$\sum_{v \in V} o_{ivt} \leq B_{it} \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (\text{IV-45})$$

$$0 \leq q_{ivt} \leq Q_v o_{ivt} \quad \forall v \in V, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (\text{IV-46})$$

$$s_{i,t-1} + \sum_{v \in V} q_{ivt} = D_{it} + s_{it} \quad \forall i \in N^D, \forall t \in T \quad (\text{IV-47})$$

$$s_{i,t-1} + P_{it} = \sum_{v \in V} q_{ivt} + s_{it} \quad \forall i \in N^P, \forall t \in T \quad (\text{IV-48})$$

$$\underline{S}_{it} \leq s_{it} \leq \bar{S}_{it} \quad \forall i \in N, \forall t \in T \quad (\text{IV-49})$$

$$s_{i0} = S_i^0 \quad \forall i \in N \quad (\text{IV-50})$$

$$l_{v,t-1} + \sum_{i \in N^P} q_{ivt} - \sum_{i \in N^D} q_{ivt} - l_{vt} = 0 \quad \forall v \in V, \forall t \in T \quad (\text{IV-51})$$

$$0 \leq l_{vt} \leq K_v \quad \forall v \in V, \forall t \in T \quad (\text{IV-52})$$

$$l_{v0} = L_v^0 \quad \forall v \in V \quad (\text{IV-53})$$

$$x_{ijvt} \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, \forall i \in N \cup \{o(v)\} \\ \forall j \in N \cup \{d(v)\}, \forall t \in T \quad (\text{IV-54})$$

$$o_{ivt}, w_{ivt} \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, \forall i \in N, \forall t \in T \quad (\text{IV-55})$$

La función objetivo (IV-39) está formada por la suma de los costes de navegación, los costes de operación y los costes de espera. Las restricciones (IV-40) y (IV-41) aseguran que la ruta llevada a cabo por cada barco tenga un inicio y un final. Por otro lado, la restricción (IV-42) es la ecuación de conservación de flujo de barcos en cada puerto en cada periodo. La restricción (IV-43) evita que un barco espere en un puerto después de haber realizado una operación, mientras que la restricción (IV-44) asegura que un barco solo puede navegar tras haber operado. La restricción (IV-45) impone la limitación de amarre en los muelles de los puertos. La restricción (IV-46) garantiza que un barco no pueda cargar/descargar si no se encuentra en modo de operación y define el límite superior de la cantidad cargada/descargada. Las restricciones (IV-47) y (IV-48) representan los balances de inventario para los puertos de consumo y de producción, respectivamente. Las restricciones (IV-49) y



(IV-50) definen los límites superiores e inferiores de los niveles de inventario y el inventario inicial. Las restricciones (IV-519, (IV-52) y (IV-53) modelan la cantidad a bordo en cada barco cuando carga y descarga. Finalmente, las restricciones (IV-54) y (IV-55) determinan las condiciones binarias de las variables de decisión.

## 2.5 Modelos de rutas *milk-run*: el modelo de Chuah y Yingling (2005)

Chuah y Yingling (2005) formulan un modelo de programación matemática para resolver el problema de diseño de rutas de aprovisionamiento para un fabricante de automóviles que hace uso de la tecnología de producción *Just in Time* (JIT). En este entorno de fabricación, con el objetivo de reducir los niveles de inventario, las rutas *milk-run* permiten recoger pequeñas cantidades de piezas y componentes en los proveedores cercanos varias veces al día, según una frecuencia fija acordada previamente.

Los autores formulan su modelo definiendo un conjunto de grafos  $G^k = (V^k, A^k)$ , donde  $V^k$  representan los vertices correspondientes a cada uno de los proveedores, y  $A^k$  representan los arcos que conectan cada par de proveedores entre sí. Cada grafo  $k$  se corresponde con una combinación de capacidades de transporte de los vehículos utilizados y frecuencias de paso por proveedor. Cada proveedor tiene asociada una demanda  $D_i$ , correspondiente con el total de piezas que debe suplir al fabricante en un periodo. En este caso, si un vehículo visita un proveedor definido sobre el grafo  $G^k$ , la cantidad que cargará para transportar al fabricante en cada visita  $D_i^k$  (dependerá de la frecuencia asociada al grafo  $G^k$ . Así pues:

$$D_i^k = r_i \left\lceil \frac{D_i}{f^k} \right\rceil \quad (\text{IV-56})$$

Donde  $r_i$  es una función de redondeo dependiente de las posibles características de los contenedores de transporte de las mercancías. El modelo propuesto se describe a continuación:

### Índices

$I, J$	Conjunto de proveedores (el fabricante se representa con $i=0$ )
$K$	Conjunto de grafos

Parámetros

- $c_{ij}$  Coste de viajar desde el nodo  $i$  al nodo  $j$   
 $t_{ij}^k$  Tiempo empleado en viajar desde el nodo  $i$  al nodo  $j$  en el grafo  $k$   
 $f^k$  Frecuencia de recogida en proveedores asociada al grafo  $k$   
 $a_i$  Instante de comienzo de la ventana temporal de recogida en el proveedor  $i$   
 $b_i$  Instante de finalización de la ventana temporal de recogida en el proveedor  $i$   
 $Q_k$  Capacidad de transporte de los vehículos asociados al grafo  $k$   
 $D_i$  Demanda total de componentes al proveedor  $i$  en el periodo considerado  
 $\gamma$  Capacidad máxima de almacén en el fabricante  
 $\alpha$  Coste de mantenimiento de inventario

VARIABLES DE DECISIÓN

- $X_{ij}^k$  1 si el arco  $(i, j)$  se selecciona en el grafo  $k$ , 0 en otro caso  
 $T_{ij}^k$  Instante de llegada de la primera visita al proveedor  $j$  en el grafo  $k$   
 $L_j^k$  Volumen de carga en el camión después de pasar por el proveedor  $j$  en el grafo  $k$

Función objetivo

Minimización de costes totales

$$\text{Min } z = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A^k} \left[ f^k c_{ij} X_{ij}^k + \alpha g_i \left( \frac{D_i}{f^k} \right) X_{ij}^k + \beta_i (D_i, f^k) X_{ij}^k \right] \quad (\text{IV-57})$$

Restricciones

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V^k} X_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in V^k \setminus \{0\} \quad (\text{IV-58})$$

$$\sum_{i \in V^k} X_{ij}^k - \sum_{i \in V^k} X_{ji}^k = 0 \quad \forall k \in K, \forall j \in V^k \setminus \{0\} \quad (\text{IV-59})$$

$$\sum_{i \in V^k} X_{0i}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (\text{IV-60})$$

$$\sum_{i \in V^k} X_{i0}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (\text{IV-61})$$

$$X_{ij}^k (T_i^k + t_{ij}^k - T_j^k) \leq 0 \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A^k \quad (\text{IV-62})$$

$$a_i \leq T_i^k \leq b_i - h_i(f^k) \quad \forall k \in K, \forall i \in V^k \setminus \{0\} \quad (\text{IV-63})$$

$$X_{ij}^k (L_i^k + D_j^k - L_j^k) \leq 0 \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A^k \quad (\text{IV-64})$$

$$D_i^k \leq L_i^k \leq Q^k \quad \forall k \in K, \forall i \in V^k \setminus \{0\} \quad (\text{IV-65})$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V^k \setminus \{0\}} \sum_{j \in V^k} D_i^k X_{ij}^k \leq \gamma \quad (\text{IV-66})$$

$$X_{ij}^k = \{0, 1\} \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A^k \quad (\text{IV-67})$$

$$T_j^k \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall j \in V^k \quad (\text{IV-68})$$

$$L_j^k \geq 0 \quad \forall k \in K, \forall j \in V^k \quad (\text{IV-69})$$

La función objetivo (IV-57) está compuesta de tres términos. El primero de ellos consiste en el coste de transporte obtenido como el producto del coste incurrido por recorrer cada arco entre nodos y la frecuencia de paso por cada uno de ellos. El segundo término corresponde al coste de inventario. Para cada componente  $i$ , una función  $g_i$  convierte la carga promedio por viaje ( $D_i/f^k$ ) al producto del valor económico de cada componente y su permanencia media en el almacén. El último término consiste en un coste de transporte interno de las piezas y componentes hasta

su punto de uso. Este coste depende del componente en cuestión, su demanda y su frecuencia de entrega, dada por  $\beta(D_i, f^k)$ .

La restricción (IV-58) implica que cada proveedor debe tener exactamente solo un arco de salida entre todos los grafos. Como consecuencia, cada proveedor solo será visitado por una única ruta. La restricción (IV-59) asegura la continuidad de las rutas en cada nodo, haciendo que el número de arcos de entrada y salida en cada uno de ellos sea idéntico. Las restricciones (IV-60) y (IV-61) previenen la creación de bucles en el grafo que no incluyen al nodo origen 0.

Por otro lado, la restricción (IV-62) asegura que si se recorre el arco entre  $i$  y  $j$  en el grafo  $k$ , entonces  $T_j^k$  es mayor que  $T_i^k$  al menos una cantidad igual al tiempo de tránsito entre ambos  $t_{ij}^k$ . La restricción (IV-63) asegura que el instante de la primera visita es lo suficientemente anticipado dentro de la ventana temporal determinada por  $a_i$  y  $b_i$  para asegurar la programación del resto de  $f^k$  rutas. Asimismo, la restricción (IV-63) evita la creación de bucles en las rutas entre proveedores dado que  $t_{ij}^k > 0$ .

La restricción (IV-64) establece que si existe una ruta entre el proveedor  $i$  y el proveedor  $j$  en el grafo  $k$ , la carga  $L_j$  es mayor que la carga  $L_i$  en  $D_j^k$  unidades. La restricción (IV-65) limita la carga del camión a su máxima capacidad  $Q^k$ . Por otro lado, la restricción (IV-66) fuerza que las rutas tengan la suficiente frecuencia de forma que el nivel de inventario en el almacén sea inferior a un determinado nivel máximo determinado por  $\gamma$ . Por último, las restricciones (IV-67), (IV-68) y (IV-69) imponen las condiciones de las variables binarias, y de no negatividad de las variables de decisión, respectivamente.

## 2.6 Comparación de los modelos

Una vez descritos los distintos trabajos tomados como referencia, en la Tabla IV-1 se resume la comparación de los aspectos más fundamentales considerados por cada modelo estudiado. Los elementos de comparación se han extraído tomando como base algunos de los identificados en el capítulo 2 y capítulo 3, a los que se han añadido algunos elementos significativos adicionales para facilitar la comparación entre ellos.

Tabla IV-1. Comparación de modelos de referencia

	Mula et al. (2006)	Peidro et al. (2010) y Diaz-Madroñero et al. (2012)	Diaz-Madroñero et al. (2010) y Diaz-Madroñero et al. (2014)	Aduyasak et al. (2014)	Agra et al. (2013)	Chuah y Yingling (2005)
	•			•		
	•	•	•			•
	•	•	•	•	•	
		•	•			
				•	•	
						•
	MILP	MILP	MILP	MILP	MILP	MILP
Enfoque de modelado	Múltiple	Múltiple	Múltiple	Único	Único	Múltiple
Aspectos de producción	Producto final	Componentes	Lista de Materiales	Tiempos de producción extra/ciosa		

	Mula et al. (2006)	Peidro et al. (2010) y Díaz-Madroño et al. (2012)	Díaz-Madroño et al. (2010) y Díaz-Madroño et al. (2014)	Adulyasak et al. (2014)	Agra et al. (2013)	Chuah y Yingling (2005)
	•			•		
	•					
Aspectos de inventario		•		•	•	•
		•	•		•	
		Homogénea	Homogénea	Homogénea	Heterogénea	Heterogénea
		•	•	•	•	•
		Múltiple	Múltiple	Única	Múltiple	Múltiple
Aspectos de transporte				•	•	•
						•
					•	
Elementos función objetivo	•			•		
				•		
	•	•*	•*	•	•	•

	Mula et al. (2006)	Peidro et al. (2010) y Díaz-Madroño et al. (2012)	Díaz-Madroño et al. (2010) y Díaz-Madroño et al. (2014)	Adulyasak et al. (2014)	Agra et al. (2013)	Chuah y Yingling (2005)
	Costes de transporte entre nodos			•	•	•
	Costes de parada, carga o descarga				•	

\*Se minimiza el inventario total generado, sin tener en cuenta los costes correspondientes al ser el único componente de la función objetivo.

Todos los modelos presentan combinaciones o planificaciones integradas en cuanto a problemas de producción, aprovisionamiento e inventario (Mula et al. 2006), aprovisionamiento, inventario y planificación de camiones completos (Peidro et al. 2010; Díaz-Madroñero et al. 2012; Díaz-Madroñero et al. 2010; Díaz-Madroñero et al. 2014), aprovisionamiento y rutas de vehículos (Agra et al. 2013); planificación de la producción, inventario y rutas de vehículos (Adulyasak et al. 2014) y aprovisionamiento y planificación de rutas *milk-run* (Chuah y Yingling, 2005).

El enfoque de modelado considerado en los trabajos seleccionados es común a todos ellos, utilizando la programación lineal entera mixta (MILP).

En cuanto a los aspectos de producción cabe destacar que solo Mula et al. (2006) consideran la existencia de múltiples productos finales mientras que Adulyasak et al. (2014) y Agra et al. (2013) presentan modelos monoproducción. Por otro lado, el resto de modelos de referencia solo contemplan la existencia de múltiples montajes, componentes o materias primas, al igual que Mula et al. (2006) que, además, consideran la existencia de posibles retrasos en la demanda, tiempos de producción extra u ociosa y listas de materiales. Por otro lado, esta referencia junto con Adulyasak et al. (2014) presentan modelos con restricciones de capacidades productivas.

Por otro lado, en lo que respecta a los aspectos de inventario, solo los modelos de Peidro et al. (2010), Díaz-Madroñero et al. (2012), Adulyasak et al. (2014), Agra et al. (2013) y Chuah y Yingling (2005) presentan restricciones de capacidad de almacenamiento. A su vez, Agra et al. (2013) establecen valores mínimos de los niveles de inventario a mantener mediante límites inferiores o stocks de seguridad. Por otro lado, Peidro et al. (2010), Díaz-Madroñero et al. (2012), Díaz-Madroñero et al. (2010) y Díaz-Madroñero et al. (2014) establecen valores mínimos de inventario a mantener al final del periodo como una proporción de la demanda del siguiente periodo.

Todos los modelos que consideran aspectos de transporte, camión completo, *production routing problem*, *inventory routing problem* o planificación de rutas *milk-run* consideran vehículos con una capacidad limitada de carga a transportar. En el caso de Agra et al. (2013) y Chuah y Yingling (2005) consideran que los diferentes vehículos pueden tener capacidades diferentes y, por lo tanto, se dispone de una flota heterogénea, mientras que Peidro et al. (2010), Díaz-Madroñero et al. (2012), Díaz-Madroñero et al. (2010), Díaz-Madroñero et al. (2014) y Adulyasak et al. (2014) consideran vehículos de idénticas características pertenecientes a una flota homogénea. Por otro lado, solo Adulyasak et al. (2014) establecen que cada nodo pueda ser visitado una única vez por periodo, a diferencia del resto de modelos con opciones de transporte. Las distancias recorridas entre los diferentes puntos solo se consideran en Adulyasak et al. (2014), Agra et al. (2013) y Chuah y Yingling (2005) pero como costes incurridos por el viaje, sin modelar explícitamente la distancia. Asimismo, Chuah y Yingling (2005) tienen en cuenta los tiempos de tránsito



entre nodos inferiores a un periodo, dado que las rutas posibles siempre se completarán en un único periodo. Por otro lado, Agra et al. (2013) presentan tiempos de tránsito entre nodos múltiplos enteros de un periodo básico, por lo que las rutas, generalmente, se completan en varios periodos.

Por último, respecto a los costes considerados en la función objetivo, solo Mula et al. (2006) y Adulyasak et al. (2014) consideran costes de producción, y solo este último considera, a su vez, los costes de setup. Todas las referencias contemplan costes de posesión de inventario, aunque cabe destacar que Peidro et al. (2010), Díaz-Madroñero et al. (2012), Díaz-Madroñero et al. (2010), Díaz-Madroñero et al. (2014) solo minimizan el inventario total generado, sin tener en cuenta los costes asociados, ya que al tratarse de un modelo multiobjetivo no es necesaria la consideración de los costes como elemento agregador de componentes diversos en la función a optimizar. Respecto a los costes de transporte, solo Adulyasak et al. (2014), Agra et al. (2013) y Chuah y Yingling (2005) consideran costes de transporte entre nodos relacionados con las distancias entre ellos. Por otro lado, cabe destacar que solo Agra et al. (2013) añaden costes relacionados con las operaciones de espera, carga y/o descarga en cada una de las paradas realizadas.

### **3. Planteamiento del modelo analítico MRP IV**

El objetivo de este apartado es desarrollar un modelo analítico para el problema de la planificación integrada de la producción y el transporte de aprovisionamiento de materias primas y componentes que contemple los tipos de envío de camión completo, rutas y rutas repetitivas *milk-run*. El modelo MRP IV es un modelo de programación lineal entera mixta basado en los modelos analizados en el apartado anterior.

#### **3.1 Descripción del problema**

Díaz-Madroñero, Mula, et al. (2012) describen el problema en el que se basa el modelo conceptual MRP IV propuesto por los autores, que sirve de base para el desarrollo del posterior modelo analítico que se presentará posteriormente.

Existen dos problemas principales a los que se enfrentan los fabricantes de productos finales en cadenas de suministro de ensamblaje: la optimización de sus planes de producción y los procesos de aprovisionamiento. Por un lado, los fabricantes determinan sus planes de producción para satisfacer la demanda de sus clientes teniendo en cuenta sus niveles de inventario y los diferentes costes de producción. Por otro lado, los fabricantes tienen que optimizar sus procesos de aprovisionamiento deter-

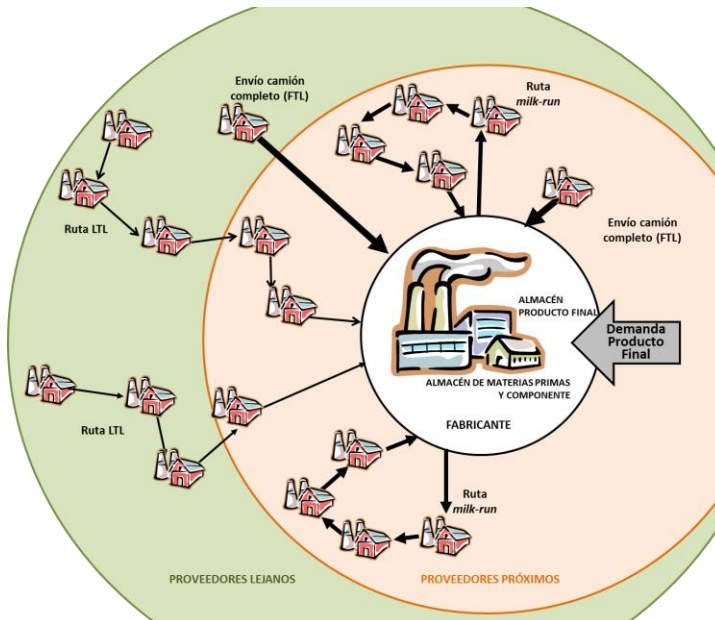
minando el plan de compra de materias primas y componentes y la recolección de los mismos en las instalaciones de los proveedores. El primer problema se corresponde con uno de producción *multi-level lot-sizing*, o MRP, mientras que el segundo corresponde con uno de ruta de vehículos, o VRP, para determinar el conjunto de productos que deben enviarse en un vehículo y la ruta que éste debe seguir.

El problema descrito considera un horizonte de planificación discreto y finito y un sistema logístico formado por un fabricante de productos finales, con una única planta de producción, un conjunto de varios proveedores de materias primas y componentes relacionados biunívocamente y un conjunto de varios proveedores de transporte. La planta de producción se caracteriza por tener una capacidad de fabricación limitada en función de sus recursos productivos disponibles que también pueden determinar el tiempo necesario para fabricar cada producto final, los tiempos de cambio de partida o de *setup* (si fueran necesarios), y el tamaño de los lotes de producción. Asimismo, los recursos productivos pueden operar en tiempo regular o en horas extraordinarias, o pueden, por el contrario, estar en estado ocioso. Por otro lado, la demanda puede diferirse de acuerdo con la disponibilidad de los recursos en cada periodo, los inventarios de seguridad predefinidos y el tamaño del almacén. Finalmente, el sistema de producción está caracterizado por un conjunto de funciones de coste: costes de producción, costes de compra de materias primas y componentes, costes de inventario de productos finales, materias primas y componentes, costes de demanda retrasada, costes de producción en horas extra, costes de tiempo ocioso en recursos productivos.

La lista de materiales expresa la cantidad de cada componente y materia prima necesaria para producir una unidad de cada producto final. Cada componente y materia prima se caracteriza por sus dimensiones físicas y, en algunos casos, unidades de embalaje o transporte especiales para su envío, como palets o contenedores específicos. Además, los proveedores pueden determinar arbitrariamente el tamaño de los lotes de pedido, que pueden coincidir o no con el tamaño de lote de fabricación de productos finales.

Según Fleischmann (2005), la planificación del transporte usualmente es responsabilidad de los proveedores, pero hay excepciones importantes, como por ejemplo en la industria del automóvil, donde el fabricante controla los envíos desde los proveedores y determina las cantidades necesarias de materias primas y componentes a recoger en cada proveedor para ser llevadas a la planta de producción. Las características de la red de transporte están definidas por la distribución geográfica de los proveedores de componentes y materias primas, la capacidad de transporte ofrecida por la flota de camiones disponible y las diferentes funciones de coste relacionadas con la distancia recorrida, las paradas realizadas y las posibles operaciones de carga y descarga, entre otras. Además, existen diferentes tipos de envío, como camión completo o *full-truckload* (FTL), rutas o *less-than-truckload* (LTL) y rutas *milk-run*, que pueden utilizarse para realizar el envío de materias primas y componentes

desde los proveedores hasta la planta de fabricación. Los envíos por camión completo se realizan directamente desde el proveedor a la planta de fabricación. Las rutas LTL comienzan en cualquier proveedor asignado a este modo de envío y están formadas por paradas en aquellos proveedores de media o larga distancia en los que se deben recoger componentes o materias primas a transportar hasta la planta de fabricación. Por otro lado, las rutas *milk-run* están formadas por aquellos proveedores situados muy próximos entre ellos y muy cercanos a la planta de fabricación donde las rutas se repiten con una frecuencia fija cada día dependiendo del grupo de proveedores implicados. Se asume que la correspondencia entre cada proveedor y cada modo de transporte, al igual que la frecuencia de envíos, están definidas previamente según la planificación a largo plazo realizada en el fabricante según la distribución geográfica de los diferentes proveedores y el volumen de pedidos que reciben. La capacidad de transporte, los modos de envío y la frecuencia pueden regularse mediante contratos establecidos con los proveedores de transporte. Asimismo, en el caso de que los costes lo posibiliten, se permite que un proveedor con modo de transporte asignado a rutas LTL pueda realizar el envío de un camión completo. La Figura IV-2 muestra los diferentes modos de envío dependiendo del grosor de las líneas, las cuales representan el volumen de materias primas y componentes a transportar.



**Figura IV-2.** Modos de envío de materias primas y componentes desde proveedores a fabricante

Fuente: Díaz-Madroñero, Mula et al. (2012)

Sin embargo, a pesar de que los problemas de planificación de la producción y de planificación del transporte están estrechamente relacionados y deberían resolverse de forma conjunta para obtener una solución óptima, en la práctica se resuelven de forma separada e independiente. Según Mula et al. (2012), el procedimiento más habitual es el cálculo del plan maestro de producción y el MRP, con el objetivo de determinar las cantidades a fabricar de cada producto final y las cantidades necesarias asociadas de componentes y materias primas. Si las cantidades a pedir pueden transportarse con la capacidad de transporte disponible, los pedidos se hacen firmes. Por otro lado, si los resultados obtenidos por el cálculo del MRP son infactibles en relación a la red de transporte existente, tienen que ser rectificadas manualmente hasta que sean factibles o, por el contrario, será necesario incrementar la capacidad de transporte disponible y ejecutar de nuevo el cálculo del MRP. En la mayoría de casos, en este contexto, la planificación del transporte se basa en la experiencia y decisiones personales de los planificadores mediante el uso de hojas de cálculo, lo que puede implicar la obtención de resultados subóptimos.

Por tanto, teniendo en cuenta la descripción de la naturaleza del problema, el modelo analítico propuesto será un modelo de planificación de producción y transporte de aprovisionamiento con los modos de envío más frecuentes en la industria, multiproducto, multinivel, multiperiodo, con restricciones de capacidad de producción, almacenamiento y transporte.

Por multiproducto se entiende un entorno de fabricación donde se consideran múltiples productos. Por término producto se considera tanto a los productos finales fabricados, como a los componentes y materias primas requeridos para la fabricación de productos finales y que son adquiridos a los diferentes proveedores. Una producción multinivel permite que los subconjuntos de componentes se ensamblen independientemente y, por tanto, que los recursos productivos puedan utilizarse de un modo eficiente. Por el contrario, una producción uninivel requiere que los componentes se ensamblen secuencialmente a lo largo del tiempo de entrega del producto.

Como horizonte de planificación se considerará un conjunto de periodos de tiempo (consecutivos y enteros) de igual longitud. El tiempo de suministro de un componente o materia prima es el número de periodos (consecutivos y enteros) que se requieren para tenerlo a disposición en la planta de producción desde el lanzamiento del pedido al proveedor correspondiente. Asimismo, los tiempos de tránsito entre nodos para rutas LTL, se expresan como un número de periodos consecutivos y enteros. En el caso de rutas *milk-run*, dado que los proveedores se encuentran muy próximos entre sí y al fabricante, se consideran tiempos de suministro y tiempos de tránsito nulos, al ser inferiores a un periodo entero.

El inventario de un producto es el volumen disponible del mismo al final de un periodo dado. El retraso de la demanda de un producto final se define como la dife-

rencia no negativa entre la demanda retrasada acumulada y el volumen de producto disponible.

Las capacidades consideradas en el modelo analítico MRP IV son la capacidad de los recursos de producción, la capacidad de almacenamiento de materias primas y componentes y la capacidad de transporte de los camiones disponibles. Se supone que existe un único almacén de materias primas y componentes, sin espacios dedicados en exclusiva a cada uno de ellos, por lo que la capacidad disponible se reparte entre cada uno de los ítems. Todos los camiones disponibles se consideran homogéneos y de capacidad idéntica para cada uno de los modos de envío utilizados.

De acuerdo con la descripción del problema, y tomando como base los trabajos de Díaz-Madroñero, Mula, et al. (2012) y Mula et al. (2012), se pueden identificar las entradas, enfoques de modelado y solución, y salidas en un modelo conceptual de referencia de MRP IV para la posterior propuesta del modelo analítico (Figura IV-3). Las entradas, salidas, enfoques de modelado y solución se describen a continuación:

#### **ENTRADAS:**

1. Horizonte de planificación dividido en periodos de duración idéntica, por ejemplo, diaria.
2. Demanda de los clientes de productos finales.
3. Lista de materiales.
4. Demanda retrasada inicial de productos finales e inventarios iniciales de productos finales, componentes y materias primas.
5. Inventarios de seguridad de cada producto final, componente y materia prima.
6. Tiempo de suministro para cada componente y materia prima. Se considera nulo para los productos finales y los componentes y materias primas suministrados mediante rutas *milk-run*.
7. Recepciones programadas de cada producto final, componente y materia prima.
8. Funciones de coste del sistema de producción. Se corresponden con los costes variables de producción, costes de adquisición de componentes y materias primas, costes de inventario de productos finales, componentes y materias primas, costes por demanda retrasada, costes por producción en tiempo extra, costes por tiempo ocioso de máquina.
9. Capacidad de producción de los recursos disponibles.

10. Tiempo de producción necesario para la fabricación de una unidad de producto final.
11. Tiempo de cambio de partida o tiempo de *setup* (si fuera necesario).
12. Tamaño de lote de fabricación (si fuera necesario).
13. Dimensiones de componentes y materias primas.
14. Tamaño de lote de pedido de cada componente y materia prima (si fuera necesario). Puede ocurrir que los proveedores fijen arbitrariamente un tamaño de lote de pedido, de acuerdo con sus intereses, de forma que las cantidades a pedir deban ser un múltiplo entero de ese tamaño de lote.
15. Distancias y tiempos de tránsito entre proveedores y entre proveedores y la planta de producción para poder determinar las rutas.
16. Funciones de coste de transporte. Incluyen costes por distancia recorrida y costes incurridos por la espera y operaciones de carga y descarga. Pueden contemplarse otros costes añadidos como costes por uso de capacidad extra, costes por envíos urgentes, costes por volumen de camión ocupado, descuentos, etc.
17. Capacidad de transporte. Se corresponde con la capacidad de la red de transporte entre los proveedores de componentes y materias primas y el fabricante de productos finales. Esta red de transporte es, generalmente, estable y se regula mediante contratos suscritos entre el fabricante y sus proveedores logísticos o de transporte.
18. Modos de envío. Pueden considerarse diferentes modos de envío dependiendo del volumen de componentes y materias primas a transportar y la localización geográfica de los proveedores. Por ejemplo, los envíos de camión completo o *full-truckload* se corresponden con aquellos proveedores con mayor volumen de pedidos. Los envíos por rutas o *less-than-truckload* son indicados para aquellos proveedores con volúmenes de pedidos pequeños y situados a media o larga distancia del fabricante, de forma que se puedan consolidar los envíos mediante el diseño de las rutas. Por último, las rutas *milk-run* se corresponden con aquellos proveedores situados muy próximos entre ellos y al fabricante, con volúmenes de pedidos superiores y que se reciben varias veces al día mediante rutas que se repiten con una frecuencia dada. Los modos de envío y su funcionamiento también se regulan mediante contratos suscritos con los proveedores de transporte.
19. Frecuencia de envío. Consiste en la frecuencia de llegada a la planta de componentes y materias primas desde proveedores asignados a rutas *milk-run*. La frecuencia de llegada puede regularse mediante contratos entre el

fabricante y los proveedores de transporte y de materias primas y componentes.

20. Unidades de embalaje o envío. Pueden ser necesarias para el transporte de ciertos componentes o materias primas, y consisten en contenedores especiales, palets, *racks*, etc.

### **ENFOQUE DE MODELADO:**

Diferentes enfoques de modelado, como la programación lineal, la programación lineal entera (mixta), la programación multiobjetivo, la programación matemática *fuzzy*, la programación estocástica o la simulación y los modelos híbridos pueden ser utilizados para el desarrollo del modelo analítico MRP IV. Este modelo debe contemplar una o varias funciones objetivo, como por ejemplo la minimización de los costes totales de producción, inventario, adquisición de materias primas y componentes, retraso de demanda, horas extra de producción, tiempo ocioso y transporte, y diferentes restricciones, tales como:

1. Ecuaciones de balance de inventario de producto final y materias primas y componentes.
2. Ecuaciones de cálculo de capacidad productiva regular, extraordinaria y tiempo de recurso ocioso.
3. Restricción de limitación máxima de cantidades almacenadas en inventario.
4. Restricción de nivel de inventario mínimo por producto o stock de seguridad.
5. Restricción de limitación de la demanda retrasada.
6. Ecuaciones de regulación de la circulación de camiones entre proveedores para los diferentes modos de envío: entrada, salida, paso por proveedores, disponibilidad de vehículos, eliminación de bucles de rutas, etc.
7. Ecuaciones de limitación de carga máxima en camiones para los diferentes modos de envío.

### **ENFOQUE DE SOLUCIÓN**

Buschkuehl et al. (2010) identifican cinco grupos de enfoques de solución para la resolución de problemas de planificación de producción:

1. Programación matemática.
2. Heurísticas lagrangianas.

3. Heurísticas de descomposición y agregación.
4. Metaheurísticas.
5. Heurísticas *greedy* específicas para cada problema.

**SALIDAS:**

1. Plan maestro de producción (PMP), que especifica la cantidad a producir de cada producto final.
2. Tiempo de producción extra y tiempo ocioso de cada recurso productivo.
3. Plan de aprovisionamiento de componentes y materias primas, que especifica las cantidades a pedir de cada componente y materia prima a cada proveedor.
4. Número de vehículos, carga y rutas a seguir por cada uno de ellos. El número de vehículos necesario se calcula para cada modo de envío, así como la carga transportada por cada uno de los camiones. Asimismo, para los envíos mediante rutas *milk-run*, se determinan las rutas a seguir en función de la frecuencia de paso establecida previamente.
5. Inventario al final de cada periodo.
6. Retraso de demanda al final de cada periodo de planificación.

Según Díaz-Madroñero, Mula, et al. (2012) y Mula et al. (2012), después de obtener las salidas del modelo MRP IV, debe evaluarse su factibilidad. Si las salidas son infactibles, puede deberse a causas relacionadas con el diseño de sistema de producción o transporte. Por lo tanto, cuando las salidas obtenidas sean infactibles, es necesario examinar cuidadosamente las capacidades de producción y transporte y ajustarlas adecuadamente antes de recalcular y ejecutar el modelo MRP IV. Por otro lado, si las salidas obtenidas son factibles es necesario evaluar económicamente la solución obtenida teniendo en cuenta los diferentes costes asociados con el modelo. Aunque esta situación puede conducir a la obtención de soluciones factibles, la ocupación de los camiones puede reducirse, lo que implica vehículos con espacio vacío disponible que podría suponer un coste adicional inapropiado. Por lo tanto, es necesario llegar a una solución de compromiso que permita una mejor ocupación de camiones y mantenga unos niveles de inventario aceptables. Del mismo modo, el modelo MRP IV debe incluir un periodo para la revisión de la red de transporte y el sistema de producción de manera que pueda adaptarse a los diversos cambios que se producen en el entorno.



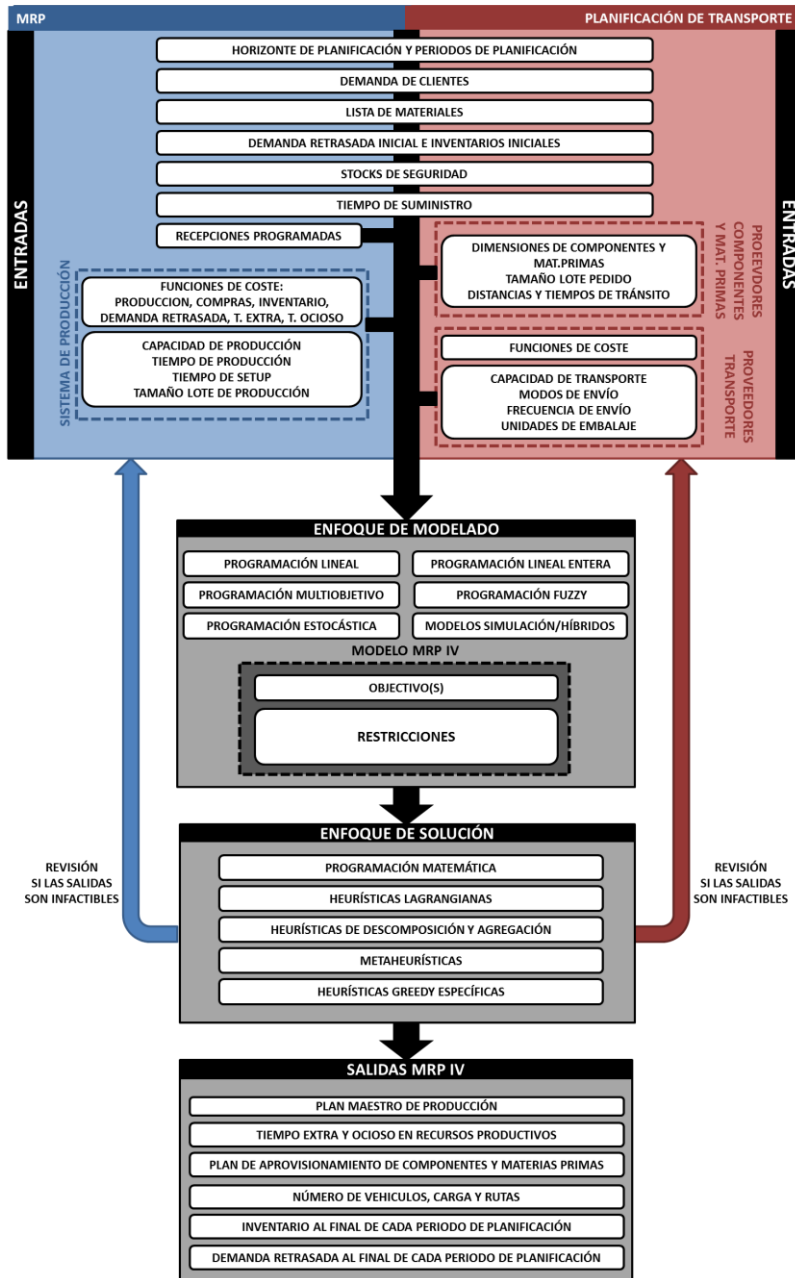


Figura IV-3. Entradas, salidas, enfoques de modelado y solución modelo MRP IV  
Fuente: Basado en Díaz-Madroño, Mula et al. (2012)

### 3.2 Formulación del modelo analítico MRP IV

#### Índices

$I,S$	Conjunto de productos finales, componentes, submontajes y materias primas, proveedores, nodo planta y nodo virtual
$TF$	Conjunto de proveedores de camión completo
$TR$	Conjunto de proveedores de rutas
$TM$	Conjunto de proveedores de rutas milk-run
$G$	Conjunto de grafos de rutas milk-run
$T$	Conjunto de periodos de tiempo
$J$	Conjunto de productos finales
$C$	Conjunto de componentes y materias primas
$R$	Conjunto de recursos productivos
$K$	Conjunto de camiones disponibles por periodo para envío completo
$L$	Conjunto de camiones disponibles en todo el horizonte de planificación para envío por rutas

#### Parámetros

$d_{it}$	Demanda de producto final $i$ en el periodo $t$
$ts_i$	Tiempo de suministro del proveedor $i$
$INVTP_{i0}$	Inventario inicial de producto final $i$ disponible en planta
$INVTC_{i0}$	Inventario inicial de componente $i$ disponible en planta
$RP_{it}$	Recepciones programadas de componente $i$ en periodo $t$
$RD_{i0}$	Retraso inicial de demanda de producto final $i$
$\alpha_{ji}$	Cantidad necesaria de $i$ para producir una unidad del producto $j$
$CAP_{rt}$	Capacidad de producción del recurso $r$ en el periodo $t$
$AR_{ir}$	Tiempo necesario para fabricar el producto $i$ en el recurso $r$
$SS_i$	Stock de seguridad del componente $i$

$CAPALM$	Capacidad total de almacenamiento de componentes en la planta
$tam_i$	Tamaño de cada unidad de producto $i$
$DistF_i$	Distancia a la planta desde el proveedor $i$
$DistR_{si}$	Distancia desde el proveedor $s$ al proveedor $i$
$TT_{si}$	Tiempo de tránsito desde el nodo $s$ al nodo $i$
$CAPTR$	Capacidad máxima de transporte por camión
$np$	Nodo correspondiente a la planta de producción
$nv$	Nodo virtual correspondiente al inicio de cada ruta
$f_g$	Frecuencia de paso por cada nodo y periodo en el grafo $g$
$cp_{it}$	Costes variables de producción por unidad de producto $i$ en el periodo $t$
$cmp_{it}$	Costes de compra de componente $i$ en el periodo $t$
$ci_{it}$	Costes de inventario de producto $i$ en el periodo $t$
$crd_{it}$	Costes de retraso de demanda de producto $i$ en el periodo $t$
$ctoc_{rt}$	Costes de tiempo ocioso en el recurso $r$ en el periodo $t$
$ctext_{rt}$	Costes de tiempo extra en el recurso $r$ en el periodo $t$
$ckm$	Coste por kilómetro recorrido
$cpar$	Coste por parada de recogida de productos en cada proveedor

Variables de decisión

$P_{it}$	Cantidad a producir del producto $i$ en el periodo $t$
$QRF_{ikt}$	Cantidad a pedir al proveedor $i$ mediante camión completo en el camión $k$ en el periodo $t$
$QRD_{ilt}$	Cantidad a pedir al proveedor $i$ mediante rutas en el camión $kr$ en el periodo $t$
$QRM_{it}$	Cantidad a pedir al proveedor $i$ mediante rutas milk-run en el periodo $t$
$INVTP_{it}$	Inventario de producto final $i$ al final del periodo $t$

$INVC_{it}$	<i>Inventario de componente i al final del periodo t</i>
$RD_{it}$	<i>Retraso de demanda del producto final i en el periodo t</i>
$TOC_{rt}$	<i>Horas ociosas del recurso r en el periodo t</i>
$TEX_{rt}$	<i>Horas extra del recurso r en el periodo t</i>
$TRF_{ikt}$	<i>Espacio de camión ocupado por la cantidad <math>Q_{RF}</math> para envío mediante camión completo en el camión k en el periodo t</i>
$TRD_{ilt}$	<i>Espacio de camión ocupado por la cantidad <math>Q_{RD}</math> para envío mediante rutas en el camión kr en el periodo t</i>
$TRM_{git}$	<i>Espacio de camión ocupado por la cantidad recogida cada vez en el proveedor i para envío mediante rutas milk-run en el periodo t</i>
$Y_{ikt}$	<i>1 si el camión k viaja desde proveedor i a la planta mediante envío por camión completo, 0 en caso contrario</i>
$X_{ltsi}$	<i>1 si el camión kr sale desde el nodo s hacia el nodo i en el periodo t</i>
$LX_{ltsi}$	<i>1 si el camión kr llega al nodo i desde el nodo s en el periodo t</i>
$YR_{lst}$	<i>1 si el camión kr visita el nodo s en el periodo t, 0 en caso contrario</i>
$YRD_{lit}$	<i>1 si el valor de TRD es mayor que 0, 0 en otro caso</i>
$M_{gsit}$	<i>1 si el vehículo del grafo g viaja desde el nodo i al nodo s en el periodo t, 0 en caso contrario</i>
$YM_{git}$	<i>1 si el vehículo del grafo g pasa por el nodo i en el periodo t, 0 en caso contrario</i>
$WR_{lst}$	<i>Variable auxiliar utilizada en la restricción de eliminación de bucles de rutas</i>
$WM_{gst}$	<i>Variable auxiliar utilizada en la restricción de eliminación de bucles de rutas milk-run en cada grafo g</i>

Función objetivo

Minimizar costes totales

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar } z = & \sum_{i \in J} \sum_t cp_{it} \cdot P_{it} + \sum_{i \in C} \sum_k \sum_t cmp_{it} \cdot QRF_{ikt} + \sum_{i \in C} \sum_l \sum_t cmp_{it} \cdot QRD_{ilt} \\
 & + \sum_{i \in C} \sum_t cmp_{it} \cdot QRM_{it} + \sum_{i \in J} \sum_t ci_{it} \cdot INVTP_{it} + \sum_{i \in C} \sum_t ci_{it} \cdot INVTC_{it} \\
 & + \sum_{i \in J} \sum_t crd_{it} \cdot RD_{it} + \sum_r \sum_t ctoc_n \cdot TOC_n + \sum_r \sum_t ctex_n \cdot TEX_n \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_t ckm \cdot DistF_i \cdot Y_{ikt} + \sum_l \sum_t \sum_s \sum_i ckm \cdot DistR_{si} \cdot X_{ltsi} \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_t cpar \cdot Y_{ikt} + \sum_l \sum_t \sum_s \sum_{i=0} cpar \cdot LX_{ltsi} \\
 & + \sum_g \sum_{s \in TM \cup np} \sum_{i \in TM \cup np} \sum_t ckm \cdot f_g \cdot DistR_{si} \cdot M_{gsit}
 \end{aligned} \tag{IV-70}$$

Restricciones

$$INVTP_{i,t-1} + P_{i,t-t\delta_i} + RP_{it} - RD_{i,t-1} + RD_{it} - INVTP_{it} = d_{it}$$

$$\forall i \in J, \forall t \quad (IV-71)$$

$$INVC_{i,t-1} + \sum_k QRF_{ik,t-ts_i} + \sum_{kr} QRD_{i,kr,t-ts_i} + QRM_{it} + RP_{it} - INVC_{it} = \sum_j \alpha_{ji} \cdot P_{jt} \quad \forall i \in C, \forall t \quad (IV-72)$$

$$\sum_{i \in J} P_{it} AR_{ir} + TOC_n - TEX_n = CAP_n \quad \forall r, \forall t \quad (IV-73)$$

$$TRF_{ikt} = tam_i \cdot QRF_{ikt} \quad \forall i \in C \cap \{TF \cup TR\}, \forall k, \forall t \quad (IV-74)$$

$$TRF_{ikt} \leq CAPTR \cdot Y_{ikt} \quad \forall i \in C \cap \{TF \cup TR\}, \forall k, \forall t \quad (IV-75)$$

$$TRD_{ilt} = tam_i \cdot QRD_{ilt} \quad \forall i \in C \cap TR, \forall l, \forall t \quad (IV-76)$$

$$TRM_{git} = tam_i \cdot \frac{QRM_{it}}{f_g} \quad \forall i \in C \cap TM, \forall g, \forall t \quad (IV-77)$$

$$\sum_l \sum_{i \in TR \cup nv} X_{lt,np,i} = 0 \quad \forall t \quad (IV-78)$$

$$\sum_l \sum_{s \in TR \cup np} X_{lts,nv} = 0 \quad \forall t \quad (IV-79)$$

$$\sum_t \sum_{i \in TR \cup np} X_{lt,nv,i} \leq 1 \quad \forall l \quad (IV-80)$$

$$\sum_t \sum_{s \in TR \cup np} X_{lts,np} \leq 1 \quad \forall l \quad (IV-81)$$

$$\sum_l \sum_t \sum_{i \in TR \cup np} X_{lt,nv,i} \leq L \quad (IV-82)$$

$$\sum_l \sum_t \sum_{s \in TR \cup nv} X_{lts,np} \leq L \quad (IV-83)$$

$$\sum_{s \in TR \cup nv} LX_{ltsi} = YRD_{l,it} \quad \forall i \in TR, \forall l, \forall t \quad (IV-84)$$

$$TRD_{ilt} \leq CAPTR \cdot YRD_{lit} \quad \forall i \in C \cap TR, \forall l, \forall t \quad (IV-85)$$

$$\sum_{i \in TR \cap C} \sum_t TRD_{ilt} \leq CAPTR \quad \forall l \quad (IV-86)$$

$$\sum_{i \in TR \cup np} X_{ltsi} = YR_{lst} \quad \forall s \in TR, \forall l, \forall t \quad (IV-87)$$

$$X_{ltsi} = LX_{l,t+TT_{si},si} \quad \forall i \in TR \cup np, \forall s \in TR \cup nv, \forall l, \forall t \quad (IV-88)$$

$$\sum_{i \in TR \cup np} X_{ltsi} = \sum_{i \in TR \cup nv} LX_{ltsi} \quad \forall s \in TR \cup np, \forall l, \forall t \quad (IV-89)$$

$$\sum_{i \in TM \cup np} M_{gsit} = \sum_{i \in TM \cup np} M_{gist} \quad \forall s \in TM, \forall g, \forall t \quad (IV-90)$$

$$\sum_{s \in TM} M_{g,np,s,t} = 1 \quad \forall g, \forall t \quad (IV-91)$$

$$\sum_{s \in TM} M_{g,s,np,t} = 1 \quad \forall g, \forall t \quad (IV-92)$$

$$\sum_{s \in TM \cup np} M_{gsit} = YM_{git} \quad \forall i \in TM, \forall g, \forall t \quad (IV-93)$$

$$\sum_{i \in TM \cup np} M_{gsit} = YM_{gst} \quad \forall s \in TM, \forall g, \forall t \quad (IV-94)$$

$$\sum_g YM_{git} = 1 \quad \forall i \in TM, \forall t \quad (IV-95)$$

$$\sum_{i \in TR} (TRM_{git} \cdot YM_{git}) \leq CAPTR \quad \forall g, \forall t \quad (IV-96)$$

$$WR_{lst} - WR_{i,t+TT_{si}} + (TR-1) \cdot LX_{l,t+TT_{si},si} \leq TR-2$$

$$\forall i, s \in TR, \forall l, \forall t \quad (IV-97)$$

$$WM_{gst} - WM_{git} + (TM-1) \cdot M_{gtsi} \leq TM-2$$

$$\forall i, s \in TM, \forall g, \forall t \quad (IV-98)$$

$$\sum_{i \in C} INVTC_{it} \leq CAPALM \quad \forall t \quad (IV-99)$$

$$INVTC_{it} \geq SS_i \quad \forall i \in C, \forall t \quad (IV-100)$$

$$RD_{i,t=T} = 0 \quad \forall i \in J \quad (IV-101)$$

$$TOC_{rt}, TEX_{rt}, TRF_{ikt}, TRD_{ilt}, WR_{lst}, WM_{gst} \geq 0$$

$$\forall i, \forall s, \forall r, \forall k, \forall l, \forall g, \forall t \quad (IV-102)$$

$$P_{it}, INVTP_{it}, INVTC_{it}, Rd_{it}, QRF_{ikt}, QRD_{ilt}, QRM_{it} \geq 0 \in Z$$

$$\forall i, \forall r, \forall k, \forall l, \forall t \quad (IV-103)$$

$$X_{ltsi}, LX_{ltsi}, YRD_{lit}, YR_{lst}, Y_{ikt}, M_{gsit}, YM_{git} \in \{0,1\}$$

$$\forall i, \forall s, \forall k, \forall l, \forall g, \forall t \quad (IV-104)$$



La función objetivo (IV-70) se corresponde con la minimización de los costes totales relativos a la planificación de la producción y el transporte. Incluye los costes de producción, costes de adquisición de materias primas y componentes, costes de mantenimiento de inventario de productos finales y materias primas y componentes, costes de tiempo ocioso y tiempo extra de los recursos productivos, costes por retraso de demanda, costes de transporte asociados a los envíos de camión completo, a los envíos de rutas (incluyendo los costes de espera por parada) y a los envíos por rutas *milk-run*.

Las restricciones (IV-71) y (IV-72) establecen las ecuaciones de balance de inventario para productos finales y materias primas y componentes, respectivamente. El inventario de un determinado producto, al final de un periodo, será igual a las entradas menos las salidas del producto producidas en ese mismo periodo. En el caso de los productos finales, en la restricción (IV-71), las entradas se corresponden con las cantidades producidas, las posibles recepciones programadas y el inventario en el periodo anterior, mientras que las salidas se refieren a la demanda de cada producto final. En el caso de las materias primas y componentes, en la restricción (IV-72), las entradas corresponden con las cantidades a pedir a cada uno de los proveedores, recibidas por los diferentes modos de transporte, las recepciones programadas y el nivel de inventario en el periodo anterior. Las salidas corresponden al consumo de cada una de las materias primas y componentes necesarios para la fabricación de los productos finales, obtenido por explosión de la lista de materiales.

La producción en cada periodo está limitada por la disponibilidad de un grupo de recursos compartidos. La restricción (IV-73) considera los límites de capacidad de estos recursos. Al igual que en Mula et al. (2006), las variables de decisión  $TOC_{rt}$  y  $TEX_{rt}$  no están limitadas por ningún parámetro establecido pero se penalizan con los costes correspondientes en la función objetivo.

La restricción (IV-74) determina el tamaño de la carga, en metros lineales, correspondiente a las cantidades pedidas a cada proveedor mediante el modo de envío por camión completo. La restricción (IV-75) se corresponde con la limitación de capacidad de los transportes realizados por camiones completos, de forma que el tamaño de la carga no exceda la capacidad total del camión, en metros lineales. El modelo permite el envío de componentes y materias primas mediante camiones completos desde proveedores asociados previamente a envío por rutas, siempre y cuando sea más ventajoso en costes incurridos.

La restricción (IV-76) es equivalente a la restricción (IV-74) pero aplicada a envíos por rutas. La restricción (IV-77) determina el tamaño de los envíos de materias primas y componentes desde proveedores asociados a rutas *milk-run*, dividiendo el tamaño total de las cantidades a pedir, por la frecuencia de paso correspondiente.

El carácter abierto de las rutas de transporte viene dado por el conjunto de restricciones siguientes. La restricción (IV-78) asegura que ningún camión podrá salir

desde la planta de fabricación en dirección a otro nodo, mientras que la restricción (IV-79) determina que ningún camión podrá entrar al nodo virtual utilizado como nodo de salida en cada una de las rutas. Asimismo, la restricción (IV-80) determina que cada camión solo podrá salir, como máximo, una vez desde el nodo virtual en dirección a cualquier proveedor de rutas, a lo largo de todo el horizonte de planificación, mientras que la restricción (IV-81) asegura que cada camión procedente desde cualquier proveedor solo podrá entrar en la planta de fabricación, como máximo, una vez a lo largo de todo el horizonte. Por otro lado, la restricción (IV-82) establece que desde el nodo virtual solo podrán salir en dirección a cualquier proveedor de rutas, como máximo, el número total de camiones disponibles ( $L$ ). Análogamente, la restricción (IV-83) determina la limitación de camiones que llegan a la planta de fabricación desde cualquier proveedor de rutas a lo largo de todo el horizonte de planificación.

Las restricciones (IV-84) y (IV-85) establecen la condición de paso por cada proveedor de rutas, de forma que, solo si el tamaño en metros lineales de la cantidad a pedir en cada camión  $l$  es mayor que cero, el camión  $l$  pasará por el proveedor. La restricción (IV-86) se corresponde con la limitación de capacidad de transporte, de forma que el total de cantidades cargadas por un camión en los proveedores por los que ha pasado sea inferior a la capacidad total del camión. Por otro lado, la restricción (IV-87) establece que cada camión  $l$  solo pueda salir una vez desde cada proveedor.

La restricción (IV-88) se incluye con la finalidad de facilitar la comprensión del modelo en lo referente al movimiento de los camiones a lo largo de la red de tiempo expandido. Concretamente, la restricción (IV-88) muestra la equivalencia de las variables  $X_{ltsi}$  y  $LX_{ltsi}$  teniendo en cuenta el decalaje de tiempo asociado al tiempo de tránsito entre los nodos  $s$  e  $i$ . Teniendo en cuenta esta equivalencia, la ecuación de balance de flujo de vehículos en cada nodo viene determinada por la restricción (IV-89).

A diferencia del carácter abierto de las rutas convencionales, las rutas *milk-run* son de carácter cerrado, comenzando y terminando en la planta de fabricación, al igual que en los modelos clásicos de planificación de rutas VRP. Las restricciones (IV-90) hasta (IV-96) corresponden a las restricciones típicas en este tipo de problemas (Chuah y Yingling 2005). La restricción (IV-90) determina la ecuación de balance de flujo de vehículos en cada nodo, estableciendo que el número de camiones que salen de un nodo ha de ser igual al número de camiones que han llegado a ese nodo. Las restricciones (IV-91) y (IV-92) determinan que el vehículo asociado al grafo  $g$  inicia y finaliza su ruta en el nodo correspondiente a la planta de producción. Las restricciones (IV-93), (IV-94) y (IV-95) determinan que cada proveedor solo puede ser visitado por un único camión de un único grafo. Por otro lado, la restricción (IV-96) establece la limitación de capacidad de transporte, de forma que el total de las cantidades recogidas en cada proveedor en cada ruta sea inferior a la capacidad del

camión utilizado. En este caso, la formulación presenta un producto de una variable de decisión binaria y una variable de decisión continua, dando lugar a un modelo de programación no lineal entera mixta. Con la finalidad de evitar esta no linealidad, esta expresión puede linealizarse fácilmente con el uso de una nueva variable auxiliar según se indica en Williams (2013).

Las restricciones (IV-97) y (IV-98) se corresponden con las ecuaciones de Miller et al. (1960) para la eliminación de bucles en las rutas convencionales y en las rutas *milk-run* respectivamente. En este último caso, la formulación de la restricción es inmediata mientras que en el caso de las rutas sobre la red de tiempo expandido, la expresión original de la ecuación ha tenido que ser adaptada al resto del modelo.

Las restricciones (IV-99) y (IV-100) establecen los límites asociados a las cantidades de componentes y materias primas almacenadas en inventario. En el caso de la restricción (IV-99) el total de las unidades almacenadas viene limitado por la capacidad total del almacén, mientras que en la restricción (IV-100) se establece que el inventario de cada componente y materia prima ha de ser superior al stock de seguridad al final de cada periodo. La restricción (IV-101) asegura que el retraso de demanda será nulo al final del horizonte de planificación.

Por último, la restricción (IV-102) establece la condición de no negatividad para las variables de decisión, al igual que la restricción (IV-103) que además establece la condición de integralidad. La restricción (IV-104) hace referencia a la condición binaria del resto de variables de decisión.

Tras plantear el modelo analítico MRP IV, se muestra la comparación con modelos de referencia en la Tabla IV-2.

**Tabla IV-2.** Comparación del modelo analítico MRP IV con los modelos de referencia

	Mula et al. (2006)	Feidro et al. (2010) y Díaz-Madroño et al. (2012)	Díaz-Madroño et al. (2010) y Díaz-Madroño et al. (2014)	Adulyasak et al. (2014)	Agra et al. (2013)	Chuah y Yingling (2005)	MRP IV
Tipo de problema	Planificación producción	•		•			•
	Planificación aprovisionamiento	•	•			•	•
	Planificación inventario	•	•	•	•		•
	Planificación transporte camión completo		•	•			•
	Planificación rutas de vehículos				•	•	•
	Planificación de rutas <i>milk-run</i>						•
Enfoque de modelado	MILP	MILP	MILP	MILP	MILP	MILP	MILP
Aspectos de producción	Múltiple			Único	Único	Múltiple	Múltiple
Componentes	Múltiple	Múltiple	Múltiple			Múltiple	Múltiple

	Mula et al. (2006)	Peidro et al. (2010) y Díaz-Madroño et al. (2012)	Díaz-Madroño et al. (2010) y Díaz-Madroño et al. (2014)	Adulyasak et al. (2014)	Agra et al. (2013)	Chuah y Yingling (2005)	MRP IV
	•						•
	•						•
	•			•			•
	•						•
Aspectos de inventario		•		•	•	•	•
		•	•				•
							•
Aspectos de transporte		Homogénea	Homogénea	Homogénea	Heterogénea	Heterogénea	Homogénea
		•	•	•	•	•	•
		Múltiple	Múltiple	Única	Múltiple	Múltiple	Múltiple
				•	•	•	•
							•

	Mula et al. (2006)	Peidro et al. (2010) y Díaz-Madroño et al. (2012)	Díaz-Madroño et al. (2010) y Díaz-Madroño et al. (2014)	Adulyasak et al. (2014)	Agra et al. (2013)	Chuah y Yingling (2005)	MRP IV
Elementos función objetivo	Tiempos de tránsito entre nodos superiores a un periodo				•		•
	Costes de producción	•		•			•
	Costes de <i>setup</i>			•			
	Costes de inventario	•	•*	•	•	•	•
	Costes de transporte entre nodos				•	•	•
Costes de parada, carga o descarga					•		•

## 4. Conclusiones

En este capítulo se ha planteado un modelo de programación matemática lineal entera mixta denominado MRP IV para la planificación integrada de la producción y el transporte de aprovisionamiento de materias primas y componentes que contempla diferentes modos de envío. Para la definición de dicho modelo se consideraron otros trabajos previos en el ámbito de modelos MRP (Mula et al. 2006), modelos de transporte por camión completo (Peidro et al. 2010; Díaz-Madroñero et al. 2012; Díaz-Madroñero et al. 2010; Díaz-Madroñero et al. 2014), *production routing problems* (Adulyasak et al. 2014) e *inventory routing problems* (Agra et al. 2013), así como modelos de diseño de rutas *milk-run* (Chuah y Yingling 2005). A partir del análisis detallado de los distintos modelos de referencia (ver Tabla IV-1. Tabla comparativa de los modelos de referencia) se han identificado las posibles entradas, salidas, y los posibles enfoques de modelado y de solución que han servido para elaborar un modelo conceptual de MRP IV que ha servido como base para el desarrollo del modelo analítico propuesto. Este modelo ha pretendido reunir las características más destacadas de cada modelo analizado.

El modelo analítico MRP IV se ha planteado de la forma más general posible para resolver la problemática de la planificación de la producción y transporte de aprovisionamiento, considerando los tipos de envío más comunes en la industria, en un entorno multiproducto, multinivel, multiperiodo, con restricciones de capacidad de recursos productivos, almacenamiento y transporte. Los tipos de envío considerados se corresponden con el transporte mediante camiones completos o *full-truckload*, rutas o envíos *less-than-truckload* y rutas repetitivas *milk-run*.

En el capítulo 5 se presentarán los resultados computacionales del modelo analítico MRP IV obtenidos a través de la aplicación en un entorno real de fabricación y transporte perteneciente al sector del automóvil.

## 5. Referencias

- Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F., Jans, R. (2014). Optimization-Based Adaptive Large Neighborhood Search for the Production Routing Problem. *Transportation Science*, 48(1), 20–45.
- Agra, A., Andersson, H., Christiansen, M., Wolsey, L. (2013). A maritime inventory routing problem: Discrete time formulations and valid inequalities. *Networks*, 62(4), 297–314.

- Buschkuehl, L., Sahling, F., Helber, S., Tempelmeier, H. (2010). Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches. *OR SPECTRUM*, 32(2), 231–261.
- Chuah, K. H., Yingling, J. C. (2005). Routing for a Just-in-Time Supply Pickup and Delivery System. *Transportation Science*, 39(3), 328–339.
- Díaz-Madroñero, M., Mula, J., Peidro, D. (2012). A Conceptual Model for MRP IV. En J. Hernández, P. Zarate, F. Dargam, B. Delibašić, S. Liu, & R. Ribeiro (Eds.), *Decision Support Systems – Collaborative Models and Approaches in Real Environments* (Vol. 121, pp. 14–25). Springer Berlin Heidelberg.
- Díaz-Madroñero, M., Peidro, D., Mula, J. (2012). Planificación operativa del transporte en una cadena de suministro mediante un enfoque interactivo de programación lineal fuzzy multiobjetivo. *Dirección Y Organización*, (46), 31–44.
- Díaz-Madroñero, M., Peidro, D., Mula, J. (2014). A fuzzy optimization approach for procurement transport operational planning in an automobile supply chain. *Applied Mathematical Modelling*. (en prensa) doi:10.1016/j.apm.2014.04.053
- Díaz-Madroñero, M., Peidro, D., Mula, J., Ferriols, F. J. (2010). Enfoques de programación matemática fuzzy multiobjetivo para la planificación operativa del transporte en una cadena de suministro del sector del automóvil. *Revista de Métodos Cuantitativos Para La Economía Y La Empresa*, 9, 44–68.
- Fleischmann, B. (2005). Distribution and Transport Planning. En H. Stadtler y C. Kilger (Eds.), *Supply Chain Management and Advanced Planning* (pp. 229–244). Springer Berlin Heidelberg.
- Miller, C. E., Tucker, A. W., Zemlin, R. A. (1960). Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. *Journal of the ACM*.
- Mula, J., Díaz-Madroñero, M., Peidro, D. (2012). A Conceptual Model for Integrating Transport Planning: MRP IV. En J. Frick y B. T. Laugen (Eds.), *Advances in Production Management Systems. Value Networks: Innovation, Technologies, and Management* (pp. 54–65). Springer Berlin Heidelberg.
- Mula, J., Poler, R., Garcia, J. P. (2006). {MRP} with flexible constraints: A fuzzy mathematical programming approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(1), 74–97.
- Orlicky, J. (1975). *Material Requirements Planning*. New York: McGraw-Hill.



Peidro, D., Díaz-Madroñero, M., Mula, J. (2010). An interactive fuzzy multi-objective approach for operational transport planning in an automobile supply chain. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 7(2), 283–294.

White, O. W. (1981). *MRP II—Unlocking America's Productivity Potential*. CBI Publishing, Boston.

Williams, H. P. (2013). *Model Building in Mathematical Programming. Model Building in Mathematical Programming* (Vol. 4). John Wiley & Sons.

CAPÍTULO V

**APLICACIÓN DEL MODELO MRP IV EN UNA CADENA  
DE SUMINISTRO DEL SECTOR DEL AUTOMÓVIL**

---



---

## CAPÍTULO V

### APLICACIÓN DEL MODELO MRP IV EN UNA CADENA DE SUMINISTRO DEL SECTOR DEL AUTOMÓVIL

---

1.	Introducción.....	V-3
2.	La cadena de suministro.....	V-3
2.1	La planificación y programación de la producción en fabricantes de automóviles .....	V-4
2.2	Características de los proveedores de la planta de montaje de asientos .....	V-6
2.3	Características de la planta de montaje de asientos .....	V-7
2.4	Proceso de planificación de la producción en la planta de montaje de asientos .....	V-9
2.5	Proceso de planificación del transporte de aprovisionamiento en la planta de montaje de asientos.....	V-10
3.	Método de evaluación .....	V-16
3.1	Eficiencia computacional .....	V-17
3.2	Costes de planificación.....	V-17
3.3	Indicadores relativos a la planificación del transporte.....	V-18
3.3.1	Total de distancia recorrida .....	V-18
3.3.2	Distancia recorrida por camión .....	V-18
3.3.3	Número de camiones utilizados.....	V-18
3.3.4	Ocupación media de los camiones utilizados por modo de envío ..	V-18
3.3.5	Costes de transporte por unidad de producto final fabricado .....	V-19
4.	Experimento computacional piloto .....	V-19
4.1	Datos de partida.....	V-19
4.2	Suposiciones.....	V-36
4.3	Mecanismo de cálculo .....	V-37
4.4	Modelos para la comparación del enfoque de planificación integrado y secuencial en la planta de montaje de asientos.....	V-41

4.4.1	Enfoque de planificación integrado: modelo MRP IV .....	V-41
4.4.2	Enfoque de planificación secuencial: modelo de planificación de producción adaptado de Mula et al. (2006).....	V-47
4.4.3	Enfoque de planificación secuencial: modelo de planificación de transporte mediante camión completo adaptado de Díaz-Madroñero et al. (2012) y Peidro et al. (2010).....	V-51
4.4.4	Enfoque de planificación secuencial: modelo de planificación de transporte mediante rutas. ....	V-53
4.5	Estructura de los datos de entrada y salida .....	V-57
4.6	Evaluación de los resultados.....	V-62
4.6.1	Eficiencia computacional .....	V-62
4.6.2	Costes de planificación .....	V-66
4.6.3	Indicadores relativos a la planificación del transporte.....	V-69
5.	Conclusiones .....	V-70
6.	Referencias.....	V-72

## 1. Introducción

En la presente tesis doctoral, se ha propuesto un modelo denominado MRP IV, que integra las decisiones de producción y transporte de aprovisionamiento, con la finalidad de mejorar los procedimientos habituales de este tipo de planificaciones, realizadas, generalmente, de modo secuencial e independiente en la mayor parte de las empresas.

En este capítulo se pretende mostrar la aplicación del modelo propuesto en un caso real. En concreto, en una empresa representativa del sector del automóvil dedicada al montaje de asientos para automóviles. El objetivo fundamental es validar el modelo propuesto al contrastarlo con la realidad empresarial, aunque siempre bajo la perspectiva de que no se trata de resolver una situación puntual, sino de desarrollar un marco de trabajo general. Por otro lado, la aplicación en un caso real permitirá conocer aspectos de los modelos propuestos que, como se suponía desde un principio, habrá que ir desarrollando con mayor profundidad dependiendo del sector específico de aplicación.

Este capítulo se inicia con una breve descripción de la empresa objeto de estudio desde un punto de vista general. Esto permitirá hacerse una idea aproximada de la empresa, sus características generales y cómo se desarrolla el proceso de planificación de la producción y el transporte. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la experiencia computacional, comparando los resultados obtenidos por el modelo propuesto frente a los obtenidos por una planificación secuencial sin ningún tipo de integración entre la producción y el transporte.

## 2. La cadena de suministro

La cadena de suministro donde se aplicará el modelo propuesto MRP IV pertenece al sector del automóvil. Dicha cadena de suministro está formada por un conjunto de 32 proveedores de segundo nivel que envían sus materias primas y componentes a un proveedor de primer nivel, encargado de la fabricación de asientos, para su envío posterior a un fabricante o ensamblador de automóviles. Este proveedor de asientos se corresponde con un *full service supplier* y, por lo tanto, se encarga personalmente de su propia logística, elige de forma independiente sus proveedores y los componentes de sus productos. En concreto, la aplicación del modelo se centrará en tres modelos diferentes, fabricados en la planta de montaje que el proveedor de asientos tiene en Assenede (Bélgica) y que suministra según la filosofía *just in time* (JIT) al centro de fabricación de un fabricante de automóviles situado en Gent (Bélgica).

Según la filosofía JIT, el proveedor de asientos sigue un esquema de montaje bajo pedido. Es decir, espera a que el producto sea realmente requerido para montarlo, a

partir de una suficientemente amplia cantidad de componentes y materias primas. El mismo procedimiento se utiliza cuando los plazos de suministro de los proveedores de segundo nivel son largos. En este caso, lo importante es fijar el tamaño de inventario mínimo de componentes y materias primas que permita servir con un 100% de efectividad los asientos demandados por el fabricante de automóviles. En este contexto, la compra de materiales necesarios para la fabricación de los asientos se realiza atendiendo a la demanda fija y segmentada (generalmente, nunca más de 10 días), si los plazos de aprovisionamiento lo permiten. Esta información es cierta, en el sentido que las cantidades demandadas se montarán con toda seguridad, aunque no se puede garantizar el instante exacto.

## 2.1 La planificación y programación de la producción en fabricantes de automóviles

Diferentes autores como Mula et al. (2003) y Pérez-Perales et al. (2002) han estudiado el proceso de planificación y programación de la producción en fabricantes de automóviles (Figura V-1).

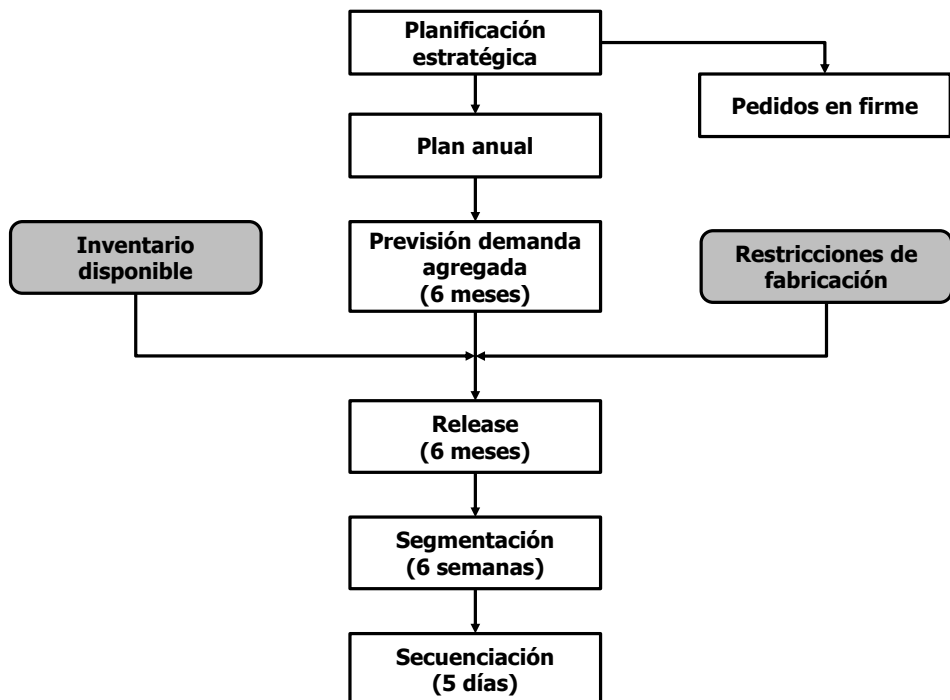


Figura V-1. Proceso de planificación y programación de la producción en un fabricante de automóviles.

FUENTE: Mula et al. (2003)

En primer lugar, el proceso comienza con la planificación estratégica. Esta implica a directivos de alto nivel y concierne a la adquisición de recursos, la introducción de nuevos productos, etc. La planificación anual se elabora a partir del presupuesto anual, estableciendo los niveles esperados de beneficio y, a partir de ellos, las cantidades a producir de cada modelo de automóvil. A partir del plan anual, el departamento de ventas y marketing desarrolla la previsión de la demanda agregada (por modelo, carrocería, motor y país) con un horizonte de la previsión de seis meses.

A partir de las demandas realizadas por el sistema financiero, y las previsiones realizadas por el departamento de ventas y marketing, atendiendo a las restricciones que imponen los distintos sistemas de producción, se establecen los planes a medio plazo. La previsión de la demanda agregada se explota convenientemente para dar lugar a los planes de producción y compras de las plantas productoras y los proveedores, ya sean directos o indirectos. El proceso de explosión varía según empresas pero se puede decir que es un proceso basado en porcentajes históricos de los diferentes módulos o submontajes.

Según Mula et al. (2003), una vez obtenida la previsión de la demanda agregada, a partir del inventario disponible, las restricciones de fabricación y los pedidos en firme se confecciona el *release*. El *release* asigna las cantidades de producción (por modelo, carrocería y motor) entre cada planta de montaje con un horizonte de previsión de seis meses y un período de previsión de un mes. Este documento (*release*) contiene información agregada y detallada y establece una previsión de la demanda a medio plazo de los módulos requeridos a suministrar por los proveedores. El programa de producción denominado *release* se envía electrónicamente a los proveedores. Estos planes son meramente tentativos, y se realizan por familias de productos. La calidad de las previsiones por este método es baja, debido, fundamentalmente, a la gran complejidad de los subconjuntos que fabrican los proveedores y al gran número de unidades distintas que se pueden fabricar.

A un nivel operativo, se trabaja con pedidos en firme para realizar los programas de producción. Estos se construyen asignando, en cada ocasión, las unidades demandadas por los concesionarios de automóviles a los centros de producción. En algunos fabricantes, el proceso de asignar los pedidos en firme a periodos de producción recibe el nombre de segmentación. El proceso de segmentación asigna fechas de entrega al montaje de coches con un horizonte de tiempo de seis semanas. Finalmente, se realiza el proceso de secuenciación, generando el denominado programa secuencial. Este programa indica el orden de montaje para los coches asignados en los cinco días segmentados. Este programa es el que se considera prioritario a lo largo de todo el proceso de producción. Un complejo sistema informático traza el paso de las distintas unidades a través de los diferentes procesos.

Los fabricantes de automóviles tratan de mejorar la consistencia de la información de la demanda a lo largo de la cadena de suministro usando sistemas de información



integrados para la producción y sistemas de intercambio electrónico de datos (EDI). En este contexto, la demanda se comunica a través de la cadena de suministro como programas de producción enviados electrónicamente a sus proveedores inmediatos. Los proveedores de primer nivel reciben diferente información de la demanda desde los fabricantes de automóviles:

- *Release*. Es un programa de producción a medio plazo para proveedores JIT y secuenciados. El release muestra la previsión para los próximos seis meses. Este programa se emite semanalmente. Muestra las piezas requeridas por semana.
- *Daily Call In (DCI)*. Es un programa de producción a corto plazo para proveedores JIT y secuenciados. El DCI muestra la previsión para los próximos diez días. El DCI muestra las piezas requeridas para cada día.
- *Predicted Sequence*. Indica a los proveedores secuenciados qué coche, incluyendo qué piezas, será producido. Esta información incluye todos los coches para los próximos seis días.
- *Late Warning*. Indica la secuencia diaria de producción hasta que el coche está en la línea de montaje. Cuando el vehículo está llegando en la línea de montaje, este mensaje se transmite a los proveedores secuenciados y el tiempo de entrega requerido es de unas pocas horas.

Los proveedores usan esta información para generar sus propios programas de producción y entonces enviarlos a los proveedores de segundo nivel.

## **2.2 Características de los proveedores de la planta de montaje de asientos**

El conjunto de proveedores de segundo nivel se encarga del suministro de componentes y materias primas que conforman la lista de materiales relacionadas con los componentes metálicos, electrónicos, plásticos, textiles y rellenos de los diferentes modelos de asientos. Todos los proveedores de segundo nivel reciben semanalmente información de las necesidades previstas de suministros, calculadas a partir del plan de producción del fabricante de automóviles y de la lista de materiales de cada asiento a fabricar. Asimismo, los volúmenes de producción de cada proveedor de segundo nivel se fijan y establecen de antemano con respecto a las necesidades de la planta de montaje de asientos. Sin embargo, a pesar de ello, la planta de montaje de asientos no dispone de las capacidades de producción reales de sus proveedores, relativas a cada periodo de producción.

Dichos proveedores se encuentran ubicados en ciudades de Alemania, Inglaterra, Suecia, Estonia, Rumania, Polonia, República Checa, Eslovenia y Francia. En fun-

ción de su situación geográfica respecto a la planta de montaje de asientos, y del volumen de componentes y materias primas necesarios en ésta, la planificación a medio-largo plazo del fabricante de asientos asigna el modo de transporte más convenientes para el aprovisionamiento desde cada proveedor. Para la planta de montaje de Assenede, los proveedores disponibles enviarán sus productos mediante camiones completos o modo *full-truckload*, o mediante rutas convencionales o envío *less-than-truckload*, dado que no existe un grupo de proveedores en las proximidades de la planta de producción de asientos para el establecimiento de rutas repetitivas *milk-run*. En la Figura V-2, se muestra la distribución geográfica de los proveedores de segundo nivel y la asignación del modo de envío de componentes y materias primas. Las etiquetas que aparecen junto a cada nodo corresponden a códigos de identificación unívocos utilizados para la identificación de los proveedores.

### 2.3 Características de la planta de montaje de asientos

La planta de montaje de asientos se sitúa en la localidad de Assenede (Bélgica) y pertenece a un grupo multinacional líder en el suministro de sistemas para el sector del automóvil.

El grupo es uno de los principales proveedores de asientos, sistemas interiores y baterías para automóviles y camiones ligeros. Los sistemas suministrados incluyen asientos, reposacabezas, puertas, paneles de instrumentación, componentes electrónicos y baterías. Los principales clientes del grupo son: AutoZone, Costco, DaimlerChrysler, Fiat, Ford, General Motors, Honda, Interstate Battery System of America, John Deere, Mazda, Mitsubishi, Nissan, NUMMI, Peugeot, Renault, Sears, Toyota, Volkswagen, Volvo y Wal-Mart, entre otros. El grupo está dividido en unidades de negocio centradas en el cliente (*Customer Focussed Business Units*) y dispone de 120 centros de producción de asientos en todo el mundo que son capaces de abastecer el equipamiento de más de 22 millones de vehículos al año.

La planta de montaje de asientos trabaja según la filosofía *just in time*, es decir, sólo se monta un asiento en respuesta a un mensaje electrónico (*Late Warning*) que se recibe cuando el coche deja la planta de pinturas y se dirige a la planta de montaje. Por tanto, todas las plantas JIT se encuentran localizadas lo más cerca posible de las plantas de montaje de los fabricantes de automóviles a los que suministra los asientos.

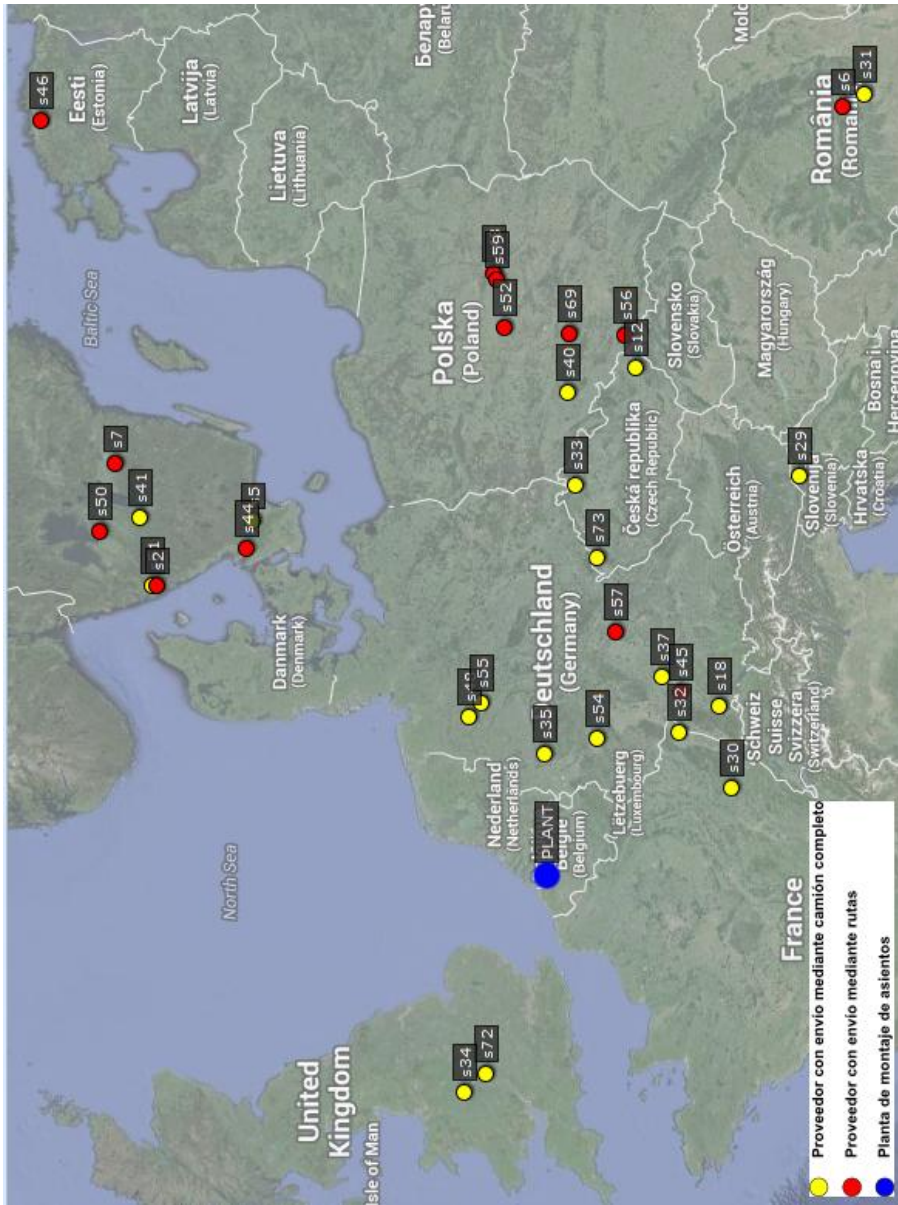


Figura V-2. Distribución geográfica de proveedores de materias primas y componentes de la planta de montaje de asientos

## 2.4 Proceso de planificación de la producción en la planta de montaje de asientos

La variedad de diseños montados en la planta de Assenede es muy amplia. Esto es una característica del sector, ya que cada vez se tiende más a la personalización en masa. Continuamente se van eliminando determinados modelos (obsoletos) que no tienen suficiente demanda o que son mejorados con lo que el número de modelos fabricados sufre constantes modificaciones.

Actualmente, la empresa utiliza un sistema de planificación de la producción integrado en un ERP desarrollado por la empresa alemana SAP. Este sistema recibe las entradas de lo producido, la planificación a largo (*release*) y corto plazo (*DCI*), las entradas de componentes, etc. Las salidas de este sistema son las órdenes de pedidos a proveedores, el stock status, los costes de materiales, etc. SAP está basado en un MRP II estándar, es decir, MRP + CRP. Sin embargo, la empresa únicamente utiliza el módulo MRP para el aprovisionamiento de materiales, ya que considera que no tiene problemas de capacidad. El taller de montaje de asientos es una planta flexible (*flexibleplant*) con posibilidad de recurrir a capacidad adicional de producción mediante horas extra de producción o mediante la producción en otras plantas del grupo, si fuera necesario.

La empresa de montaje de asientos recibe semanalmente el *release* con un horizonte de planificación de seis meses. Sin embargo, las previsiones de la demanda son raramente precisas. La precisión de las previsiones afecta al funcionamiento del sistema de producción. Subestimar estas imprecisiones de la demanda podría causar deficiencias de material que ocasionarían retrasos en el suministro. Por otro lado, sobreestimar la precisión de la demanda causaría excesos de material que llevarían a aumentos en los costes de mantenimiento de inventarios. Así pues, la empresa recibe el *DCI* o programa de producción con un horizonte de planificación de 10 días, actualizando su base de datos, y lanzando en ese momento la ejecución del MRP. Asimismo, también se recibe el *late warning* que indica el orden o secuencia del montaje de asientos requerido por el fabricante de automóviles. Esta información sirve de entrada para el proceso de secuenciación.

Se considera una única etapa de producción, es decir, todos los materiales son suministrados por los proveedores y el montaje final de los asientos se inicia después de recibir los pedidos en firme. Una estrategia de fabricación donde los materiales y submontajes se producen o adquieren a partir de previsiones de la demanda, mientras que el montaje final de los productos se retrasa hasta que se reciben las órdenes en firme de los clientes se denomina montaje bajo pedido (Fumero y Vercellis 1994).

El período de planificación considerado en la empresa de montaje de asientos es diario y se utiliza un horizonte de planificación de 6 semanas, coincidiendo con los segmentos determinados por el fabricante de automóviles.

La empresa de montaje de asientos ha optado por la filosofía JIT. Sin embargo, debido a la dificultad de para extender esta filosofía de producción a sus proveedores, sí que establece diferentes medidas, tales como los stocks de seguridad, para evitar roturas de stock de componentes y materias primas necesarios para el montaje de sus productos. Asimismo, también se utilizan tiempos de seguridad para algunos de los componentes suministrados por los proveedores. Los tiempos de suministro para los componentes y materiales que componen los asientos son la suma de:

- Tiempo de producción del proveedor. Es el tiempo requerido por el proveedor para producir un lote del producto suministrado.
- Tiempo de transporte. Es el tiempo requerido por el proveedor para transportar una unidad del producto suministrado a la planta de montaje de asientos.
- Tiempo de seguridad. Tiempo establecido (aunque mínimo) que se añade como medida de seguridad para evitar retrasos o roturas de stock.

Además, el proceso de planificación de la producción asume lo siguiente:

- Las cantidades a producir se determinan a partir del inventario existente y la capacidad disponible.
- Los pedidos en firme no pueden ser rechazados si son aceptados por el fabricante de asientos para automóviles.
- Si el sistema no puede producir completamente las cantidades demandadas por el fabricante de automóviles, se considera retraso de la demanda aunque con un gran coste de penalización, ya que el nivel de servicio exigido a un proveedor JIT es del 100%.
- Una vez que el fabricante de asientos envía las órdenes de compra a sus proveedores, éstos no pueden rechazarlas. Además, todos los materiales comprados son entregados según el programa de producción.
- Los tiempos de suministro para cada material se asumen constantes.

## **2.5 Proceso de planificación del transporte de aprovisionamiento en la planta de montaje de asientos**

La empresa, en función de los niveles de demanda proporcionados por el fabricante de automóviles, deberá planificar el transporte de tal forma que se garantice el nivel

de aprovisionamiento necesario para cumplir de la forma más eficiente con lo exigido por el cliente en sus líneas de montaje. El proceso de planificación del transporte de aprovisionamiento de materias primas y componentes se realiza a partir de las cantidades a pedir necesarias calculadas en la ejecución del MRP. Una vez obtenidas, un conjunto de planificadores, pertenecientes al departamento de logística de la empresa de montaje de asientos, los cuales tienen asignados unos determinados proveedores cada uno, calculan las necesidades netas a pedir a corto plazo a cada proveedor, en función de las restricciones logísticas y del modo de envío asociado a cada uno de los proveedores. Para ello, cada planificador utiliza una hoja de cálculo diferente por proveedor con los datos necesarios para acometer dicho cálculo. En todo caso, el código de la macro VBA es similar en todas las hojas de cálculo de los diferentes proveedores de camión completo y planificadores, únicamente se modifican los valores relativos al tiempo de cobertura que debe cumplir el inventario.

Los campos más destacados de ésta son:

- Stock al inicio del horizonte de planificación.
- Demanda diaria.
- Cantidad a pedir por camión: depende del número de camiones a recibir diariamente.
- Stock al final del periodo.
- Código identificativo de pieza.
- Descripción de pieza.
- Dimensiones de pieza.
- Unidad de Embalaje, que determinará las agrupaciones mínimas de piezas a pedir.

Según se describe en Peidro et al. (2010), Díaz-Madroño et al. (2012) y Mula et al. (2013), el problema de planificación de transporte de aprovisionamiento mediante camión completo se resuelve, actualmente, en la planta de montaje de asientos mediante un procedimiento heurístico ejecutado en la citada hoja de cálculo. A partir del uso de ésta, el personal responsable del aprovisionamiento calcula las necesidades a corto plazo intentando satisfacer la demanda del fabricante de automóviles, minimizar el nivel del inventario y mejorar la utilización de los recursos de transporte sin incurrir en retrasos en la demanda. Para el conjunto de proveedores existentes, un grupo de una decena de empleados utiliza este tipo de procedimiento para planificar el transporte de aprovisionamiento.

El procedimiento comienza con la obtención del inventario inicial de cada producto al principio del horizonte de planificación y la demanda diaria para cada referencia. Dado que no se permite el retraso en el cumplimiento de la demanda, si el inventario de alguno de los productos al final de un periodo es inferior a la demanda del periodo siguiente, el planificador ejecutará la macro VBA para calcular, de forma

automática, la inclusión de cargas en un nuevo camión para el periodo 1. La carga en los camiones se asigna en función del espacio disponible (13.6 metros en un camión completo) y del número de días que el inventario disponible puede cubrir la demanda de los periodos siguientes. De esta forma, el proceso de carga comienza con el cálculo de la cobertura de cada componente o materia prima del proveedor en cuestión para el periodo correspondiente. El cálculo de la cobertura se realiza según la disponibilidad de los productos de conformidad con la hoja de cálculo. Una vez seleccionado el ítem con menor cobertura, el procedimiento calcula el espacio ocupado por un lote del producto seleccionado. Seguidamente, se comprueba si hay suficiente espacio disponible en el camión para cargar el elemento seleccionado, finalizando el procedimiento de carga si no hay espacio disponible. Si hay suficiente espacio en el camión para cargar el lote del producto seleccionado, entonces se actualiza el valor de inventario de este producto en el período correspondiente, calculando su nueva cobertura y reiniciando el proceso de carga descrito para cargar el camión lo máximo posible mediante la incorporación de lotes de los productos con menos cobertura. Así pues, los vehículos se llenan con productos lote a lote en orden creciente de cobertura hasta completar su capacidad, actualizando el inventario y la cobertura después de cada lote añadido.

Una vez actualizados los valores de los niveles de inventario en función de las cantidades a pedir para el nuevo camión, y si el inventario de un determinado componente o materia prima está, una vez más, por debajo del stock de seguridad, entonces se repite este proceso añadiendo el número de camiones necesarios hasta que los valores de los niveles de inventario de cada ítem sean superiores al inventario de seguridad establecido. Posteriormente, ejecuta este proceso para todos los periodos hasta que se llega al final del horizonte de planificación. La Figura V-3 es una representación gráfica del procedimiento heurístico descrito.

Cada pedido a proveedores se genera a partir de las necesidades netas calculadas y se envía semanalmente en firme para un periodo dependiente del proveedor considerado. Asimismo, estas necesidades netas son incluidas en el sistema MRP como recepciones programadas.

La estructura de las primeras columnas de la hoja de datos, a partir de las cuales se calcularán las cantidades a pedir se describe a continuación:

- Columna *UB*: se corresponde con el número máximo de contenedores que caben en el almacén y se utiliza solamente para el formato condicional del color de la columna *stock*.
- Columna 2: esta columna contiene las dimensiones unitarias de cada pieza o componente, medidas en metros lineales. A partir de estos valores y del número de unidades a pedir podrá calcularse la ocupación total del camión.

- Columna *UE* (Unidad de Embalaje): la unidad de embalaje es el número máximo de piezas o componentes que caben en un contenedor. Por ello, las cantidades a pedir serán múltiplos enteros de la cifra que corresponda a la unidad de embalaje de cada pieza, para aprovechar al máximo el volumen del contenedor.
- Columna *4*: corresponde al número máximo de contenedores que caben en el almacén dentro de la lógica de relleno de un camión. Según la empresa, se suele asignar un valor muy alto para que no influya en los límites a la hora de ejecutar la macro VBA.
- Columna *descripción*: contiene una descripción breve sobre el tipo de pieza para facilitar la comprensión del planificador.
- Columna *Referencia*: se corresponde con el identificador único de la pieza o componente a lo largo de toda la cadena de suministro.
- Columna *StockERP*: muestra el inventario disponible de cada referencia obtenido a partir del fichero generado por el ERP, que es volcado manualmente por el planificador a partir la ejecución de la macro VBA. Representa, por tanto, el inventario al inicio del periodo de planificación.
- Columna *Cobertura*: el valor de cobertura indicado muestra el número de días que el inventario disponible puede cubrir la demanda diaria. Este valor es calculado a partir de la ejecución de la macro VBA.
- Columna *DIF*: se corresponde con la demanda retrasada por referencia. Estas cantidades son descontadas al *StockERP* para poder atender la demanda rápidamente.
- Columna *Stock*: se corresponde con el inventario total al inicio del periodo de planificación, una vez se ha descontado del *StockERP* la demanda retrasada. A partir de este valor obtenido y de los datos de demanda diaria puede comenzarse a calcular las necesidades netas y la planificación operativa del transporte. El formato por defecto es con fondo en verde, sin embargo si el valor de inventario es inferior al valor del porcentaje mínimo de la demanda en el próximo periodo la celda tendrá un fondo rojo. Por otro lado, en el caso de que el valor de inventario sea superior al producto de las columnas *UB* y *UE* el fondo de la celda se colorea en color azul.

A partir de esta última columna de Stock la estructura de la hoja se modifica, apareciendo para cada día las columnas de demanda diaria y el inventario al final de cada día (*Stock*). Las columnas inmediatamente anteriores a las columnas *Demanda*, denominadas *Pedir*, corresponden a las cantidades a pedir en cada camión. En la parte inferior de estas columnas, se calcula el espacio ocupado por las cantidades a pedir, coloreado en naranja, a partir de la ejecución de la macro VBA. Las columnas *Stock* se actualizan para las cantidades pedidas y según la demanda diaria, siendo el formato de celda el mismo que el descrito anteriormente. Esta estructura se repite hasta llegar al final del horizonte de planificación considerado.



Como se ha expuesto anteriormente, el proceso de cálculo de las cantidades a pedir a cada proveedor, se realiza, mayoritariamente, de forma automática por cada planificador a partir del uso de una hoja de cálculo con una macro VBA asociada. Para ello, en primer lugar, han de trasladarse los valores de demanda diaria a la citada hoja de cálculo y los inventarios disponibles de cada pieza a considerar. Una vez completadas estas actividades, y en función de las necesidades de piezas para cumplir con la demanda, se procede al cálculo de las cantidades que posibiliten un aprovechamiento máximo del transporte, respetando las unidades de embalaje para cada pieza.

La macro asociada a la hoja de cálculo se ejecuta mediante los tres botones visibles desde la misma. Los dos primeros, se utilizan para añadir y eliminar camiones con cantidades de piezas a pedir, mientras que el tercero permite la actualización automática del inventario inicial (*StockERP*).

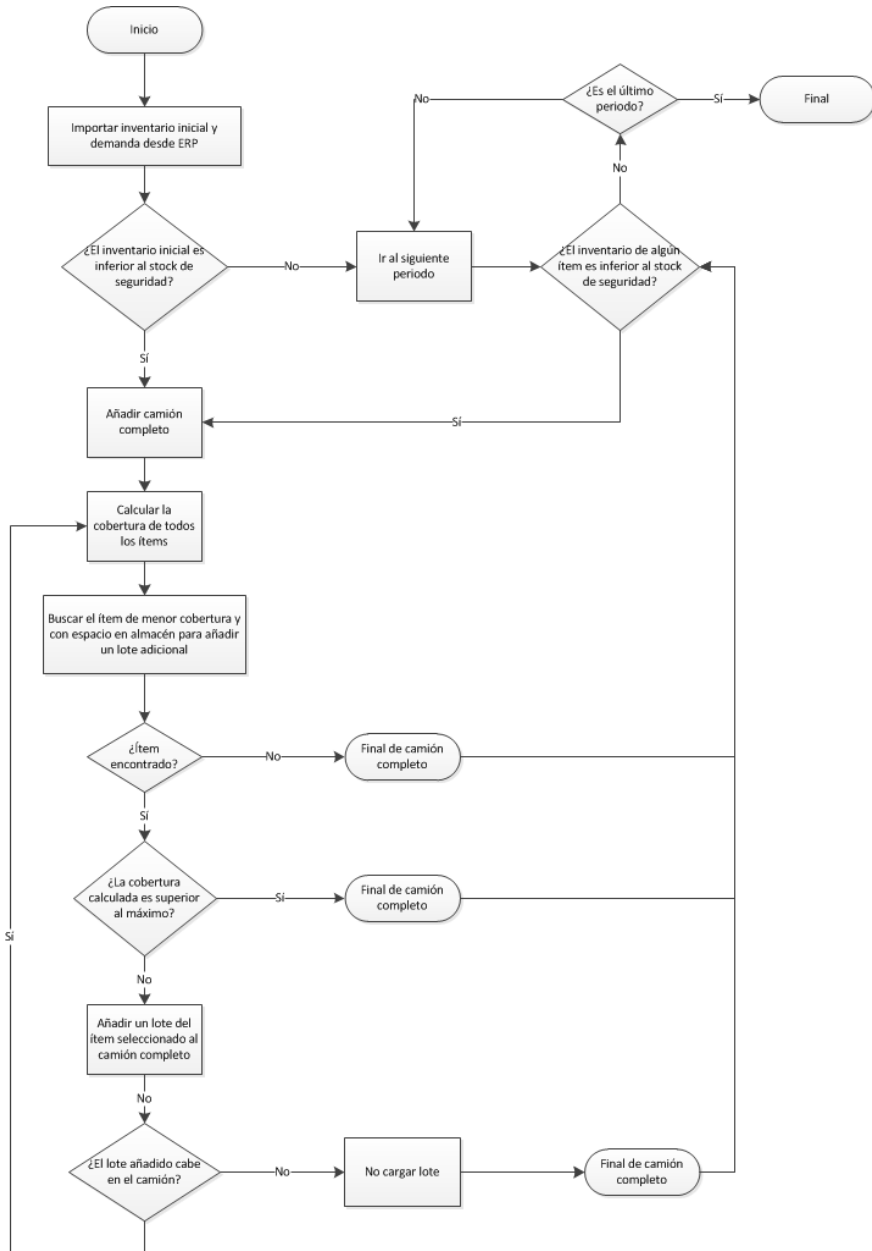


Figura V-3. Procedimiento heurístico para la planificación de transporte mediante camión completo.

FUENTE: Peidro et al. (2010)

### 3. Método de evaluación

En este apartado se describe un método de evaluación para la validación de modelos, sistemas y procedimientos para la planificación de la producción basado en el propuesto, originalmente, por Mula et al. (2006). En este caso, el método se ha adaptado para su aplicación a un modelo de planificación integrada de la producción y el transporte de aprovisionamiento. El objetivo de este método es que una empresa pueda utilizarlo para seleccionar el enfoque que considere más adecuado para su proceso de planificación de la producción y el transporte de componentes y materias primas. Se seguirá este método para validar los modelos propuestos en esta tesis.

El *método de evaluación* propuesto consiste en la evaluación del funcionamiento del modelo MRP IV para la planificación integrada de la producción y el transporte según un conjunto de medibles. A continuación, se enumeran la serie de medibles empleados por Mula et al. (2006):

- La eficiencia computacional de los modelos,
- el nivel de servicio,
- los niveles de inventario,
- los costes totales de la planificación, y
- el nerviosismo de la planificación.

Según Mula et al. (2006), cualquier otro parámetro característico del entorno de aplicación del método podría incorporarse como medible. En ese sentido, y de acuerdo con algunos de los medibles utilizados en la empresa de montaje de asientos en la que se aplica y valida el modelo MRP IV, se consideran, también, los siguientes indicadores relativos a la planificación del transporte:

- el total de distancia recorrida,
- distancia recorrida por camión,
- número de camiones utilizados,
- ocupación media de los camiones utilizados por modo de envío, y
- costes de transporte necesarios para la fabricación de una unidad de producto final.

De forma similar, algunos de los medibles aquí propuestos podrían no utilizarse si en el marco de aplicación no resultasen apropiados. En este caso, se ha optado por descartar los medibles relacionados con el nivel de servicio y el nerviosismo de la planificación debido a que la capacidad de transporte se supone ilimitada y la de-

manda se considera firme y, por lo tanto, los cambios en la planificación serán inexistentes. Asimismo, los niveles de inventario se evalúan con respecto al coste total de almacenamiento generado a lo largo de todo el horizonte de planificación, que se detalla en el apartado de costes totales. En este sentido, estos parámetros presentan interés para la empresa objeto de la aplicación. Cada uno de los medibles seleccionados se explica con detalle en los apartados siguientes.

### **3.1 Eficiencia computacional**

El parámetro de eficiencia computacional mide el esfuerzo computacional necesario para la resolución de cada uno de los modelos. Los medibles a utilizar son:

- el número de iteraciones necesarias por el solucionador utilizado para alcanzar la solución óptima,
- el número de variables del modelo,
- el número de variables enteras del modelo,
- el número de restricciones del modelo,
- el número de elementos no cero de la matriz de restricciones que contiene el modelo,
- la densidad de la matriz de restricciones que contiene el modelo, y
- el tiempo de CPU para obtener la solución del modelo.

### **3.2 Costes de planificación**

Los costes totales son la suma de todos los costes, que se generan en cada uno de los períodos del horizonte de planificación considerado, derivados de los planes de producción y transporte proporcionados por los modelos. Estos costes serán diferentes en función de los enfoques evaluados. En el caso particular del modelo propuesto en esta tesis, los costes totales considerados en la función objetivo son la suma de los costes de producción, los costes de compra de materias primas, los costes del mantenimiento de inventarios, los costes del retraso de la demanda, los costes de la capacidad ociosa y los costes de la capacidad extra de los recursos productivos y los costes de transporte.

### **3.3 Indicadores relativos a la planificación del transporte**

Con la finalidad de evaluar la planificación del transporte obtenida, se consideran los siguientes indicadores:

#### **3.3.1 Total de distancia recorrida**

Este indicador considera la totalidad de kilómetros recorridos por todos los camiones utilizados para el transporte de las materias primas y componentes necesarios para la fabricación de los productos finales demandados. Por tanto, se compone de la suma de las distancias recorridas por los camiones utilizados en envíos directos desde los proveedores a la planta de montaje y los camiones que pasan por los diferentes proveedores en función de las rutas de recogida planificadas.

#### **3.3.2 Distancia recorrida por camión**

Este medible representa la distancia media recorrida por cada camión utilizado para el aprovisionamiento de materias primas y componentes, tanto para envíos mediante camión completo como a través de rutas.

#### **3.3.3 Número de camiones utilizados**

Con el objetivo de dimensionar la flota necesaria de camiones para el aprovisionamiento de materias primas y componentes, el número total de camiones utilizados en el horizonte de planificación considerado representa un indicador conveniente para tal fin. Estará compuesto por el total de camiones utilizados para el envío directo desde proveedores y el total de camiones utilizados en rutas de recogida.

#### **3.3.4 Ocupación media de los camiones utilizados por modo de envío**

La ocupación media de los camiones utilizados, obtenida como el cociente entre la carga transportada y la capacidad de cada camión, aporta información sobre el rendimiento que se obtiene de cada vehículo utilizado. Este indicador es especialmente significativo para los camiones utilizados en rutas de recogida en varios proveedores, dado que en los envíos por camión completo se suelen llenar los camiones cerca del máximo de su capacidad.

### **3.3.5 Costes de transporte por unidad de producto final fabricado**

Este indicador se corresponde con el promedio de los costes de transporte generados para la fabricación de cada unidad de producto final. Es decir, se reparten los costes totales de transporte generados entre el conjunto de productos finales fabricados a lo largo de todo el horizonte de planificación.

## **4. Experimento computacional piloto**

Esta tesis ha propuesto un modelo de programación matemática para planificar de forma integrada la producción y el transporte de aprovisionamiento de materias primas y componentes, considerando diferentes modos de envío (camión completo, y rutas) en un sistema de producción MRP. Para validar este modelo, se aplica en una empresa dedicada al montaje de asientos para automóviles. Las características propias del sector del automóvil confirman la conveniencia de la aplicación de este modelo en empresas pertenecientes a este sector, principalmente, por el procedimiento habitual separado para el cálculo de los planes de producción, por un lado, y de transporte, por otro. La aplicación del modelo en una empresa real no sólo proporciona una percepción inicial del comportamiento del modelo propuesto sino que también permite establecer nuevas prácticas que modifiquen los procedimientos actuales basados en ocasiones en actividades manuales y basadas en la experiencia del personal de planificación de la empresa.

En esta sección se va a evaluar computacionalmente el modelo propuesto en el capítulo 4. El objetivo de esta experiencia computacional es evaluar el funcionamiento del modelo propuesto en esta tesis aplicando el método de evaluación establecido en el apartado anterior. Cabe destacar que el objetivo de esta experiencia computacional es analizar el comportamiento del modelo propuesto, estableciendo ciertas comparaciones entre los indicadores alcanzados en la metodología de planificación secuencial, y sin integración, llevada a cabo en la empresa, para desarrollar un marco de trabajo general.

### **4.1 Datos de partida**

A continuación se describen los datos necesarios para la ejecución del modelo analítico MRP IV.

Un estudio en profundidad del comportamiento del modelo propuesto en la empresa en cuestión, necesitaría de la realización de explosiones representativas para todos los productos finales, ante circunstancias reales de producción, y a lo largo de varios períodos de revisión. Sin embargo, en este caso, se considera suficiente la realización de un experimento computacional piloto sobre tres productos finales o piezas

de nivel 0, debido a que los productos complejos fabricados son asientos que comparten muchas piezas y componentes. Por ello, se ha seleccionado un grupo de tres asientos representativos que comparten diferentes piezas comunes.

Estos productos finales podrían representar cualquier asiento fabricado en un sistema MRP. Como tal, el producto recibe su demanda (requerimientos) del exterior o del mercado, en este caso, del fabricante de automóviles y, a su vez, requiere un suministro de piezas o materiales para su realización. La investigación de estos productos representativos permite generalizar su comportamiento a cualquier otro producto en el sistema.

Cada modelo de asiento o *Part Number* (PN) se codifica con un código único (1313, 8383 y 5555) aunque existan sólo pequeñas variaciones entre dos o más modelos.

El horizonte de planificación considerado se corresponde con un segmento de 6 semanas, dividido en 30 periodos diarios. La demanda del mercado de los productos finales considerados para cada período (diario) del horizonte de planificación proviene de los *DCI* emitidos por el fabricante de automóviles (Tabla V-1). El *DCI* es un programa de producción a corto plazo enviado por Volvo que especifica la demanda de piezas para los períodos diarios del horizonte de planificación considerado. El conjunto de *DCIs* seleccionados no presenta ninguna característica particular que lo pueda diferenciar de cualquier otro, por lo que puede considerarse representativo de la información que, sobre la demanda de los productos finales seleccionados, suministre el fabricante de automóviles.

La columna *daily call-in* de la Tabla V-1 es una numeración secuencial de los *DCI* considerados. A continuación, aparecen un conjunto de columnas que representan los períodos de planificación diarios para los que cada *DCI* especifica la demanda para los productos finales considerados. Por ejemplo, el *DCI* 1, indica que para el periodo 4, habrá un requerimiento del fabricante de automóviles del producto con referencia 1313 de 472 unidades, mientras que será de 169 y 490 unidades para los modelos 8383 y 5555, respectivamente.

En la planta de montaje de asiento bajo estudio, se utiliza una lista de materiales de dos niveles. En la parte superior o nivel 0 se encuentran los productos finales considerados (referencias 1313, 8383 y 5555), mientras que en el nivel inferior se encuentran las materias primas y componentes necesarios para el montaje de los productos finales. Debido a la representatividad de los productos seleccionados, se supone que cada proveedor sólo suministra como máximo un total de 7 productos genéricos diferentes (denominados desde *q1* a *q7*). Estos productos pueden ser, comunes o no, al conjunto de los 3 productos finales considerados. Así pues, para identificar, unívocamente, a cada uno de los ítems que componen cada producto final, se utiliza el binomio ( $qx, s$ ), donde  $s$  es el código de cada proveedor. Debido a esto, la lista de materiales indica la cantidad necesaria del producto hijo  $i$ , expresado

como  $(qx, s)$  para producir una unidad del producto padre  $j$ . En la Tabla V-2 se muestra la correspondencia de los productos genéricos y los productos finales de los que forman parte, mientras que la lista de materiales de los tres productos considerados se muestra, teniendo en cuenta la citada correspondencia, en la Tabla V-3.

**Tabla V-1.** Demanda diaria a partir de los DCI enviados por el fabricante de automóviles

		Periodo									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Daily call-in</i> 1	Ref. 1313	544	585	453	472	543	615	570	559	635	546
	Ref. 8383	179	194	171	169	197	182	175	190	163	184
	Ref. 5555	486	442	394	490	397	531	554	543	464	426

		Periodo									
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<i>Daily call-in</i> 2	Ref. 1313	529	484	619	491	555	568	585	443	531	445
	Ref. 8383	192	160	158	174	205	155	157	199	180	170
	Ref. 5555	580	566	574	566	501	583	503	561	391	449

		Periodo									
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
<i>Daily call-in</i> 3	Ref. 1313	611	616	484	638	537	492	436	548	530	613
	Ref. 8383	197	213	212	202	180	195	177	201	184	182
	Ref. 5555	508	459	478	433	493	474	522	546	563	504



**Tabla V-2.** Correspondencia entre productos genéricos y productos finales

<b>Producto genérico</b>	<b>Producto final</b>
<i>q1</i>	Ref. 8383
<i>q2</i>	Ref. 1313
<i>q3</i>	Ref. 5555
<i>q4</i>	Ref. 8383 y Ref. 1313
<i>q5</i>	Ref. 8383 y Ref. 5555
<i>q6</i>	Ref. 5555 y Ref. 1313
<i>q7</i>	Ref. 8383, Ref. 1313 y Ref. 5555

**Tabla V-3.** Lista de materiales de los productos finales considerados

<b>Producto final</b>	<b>Producto genérico</b>	<b>Proveedor</b>	<b><math>\alpha_{ij}</math></b>
1313	<i>q2</i>	2	0,0242
1313	<i>q2</i>	7	2,3241
1313	<i>q2</i>	30	3,9984
1313	<i>q2</i>	32	5,347
1313	<i>q2</i>	33	13,4835
1313	<i>q2</i>	37	0,9996
1313	<i>q2</i>	40	5,9976
1313	<i>q2</i>	41	6,9972
1313	<i>q2</i>	43	1,7744
1313	<i>q2</i>	44	6,3225
1313	<i>q2</i>	45	0,0242
1313	<i>q2</i>	46	2,9988
1313	<i>q2</i>	51	0,0242
1313	<i>q2</i>	55	0,9996
1313	<i>q2</i>	56	0,8566
1313	<i>q2</i>	57	0,0483
1313	<i>q2</i>	69	0,9996
1313	<i>q2</i>	73	3,5219

Producto final	Producto genérico	Proveedor	$\alpha_{ij}$
1313	<i>q4</i>	2	0,2407
1313	<i>q4</i>	7	4,6141
1313	<i>q4</i>	12	4,0673
1313	<i>q4</i>	18	3,998
1313	<i>q4</i>	32	3,9798
1313	<i>q4</i>	33	1,6698
1313	<i>q4</i>	35	0,0182
1313	<i>q4</i>	45	3,4837
1313	<i>q4</i>	51	1,9808
1313	<i>q4</i>	54	1,999
1313	<i>q6</i>	73	5,4244
1313	<i>q7</i>	2	0,5564
1313	<i>q7</i>	7	1,2178
1313	<i>q7</i>	12	7,0639
1313	<i>q7</i>	18	5,8825
1313	<i>q7</i>	43	1,3093
1313	<i>q7</i>	54	0,9944
1313	<i>q7</i>	57	1,7852
1313	<i>q7</i>	59	5,1466
5555	<i>q3</i>	6	1,0004
5555	<i>q3</i>	7	2,0009
5555	<i>q3</i>	12	2,3718
5555	<i>q3</i>	18	2,0009
5555	<i>q3</i>	29	6,6213
5555	<i>q3</i>	31	7,0031
5555	<i>q3</i>	32	7,0031
5555	<i>q3</i>	34	2,0009
5555	<i>q3</i>	43	2,1235
5555	<i>q3</i>	44	1,0855
5555	<i>q3</i>	45	2,0009
5555	<i>q3</i>	48	7,6217

MRP IV: Planificación de requerimientos de materiales cuarta generación

<b>Producto final</b>	<b>Producto genérico</b>	<b>Proveedor</b>	<b>aij</b>
5555	q3	52	2,0009
5555	q3	57	0,5068
5555	q3	72	1,0004
5555	q3	73	0,2052
5555	q6	73	5,4244
5555	q7	2	0,5564
5555	q7	7	1,2178
5555	q7	12	7,0639
5555	q7	18	5,8825
5555	q7	43	1,3093
5555	q7	54	0,9944
5555	q7	57	1,7852
5555	q7	59	5,1466
8383	q1	5	1,9984
8383	q1	7	1,9984
8383	q1	32	4,996
8383	q1	33	13,8715
8383	q1	35	9,9992
8383	q1	41	4,996
8383	q1	43	10,1377
8383	q1	45	0,7829
8383	q1	50	3,3815
8383	q1	73	0,8077
8383	q4	2	0,2407
8383	q4	7	4,6141
8383	q4	12	4,0673
8383	q4	18	3,998
8383	q4	32	3,9798
8383	q4	33	1,6698
8383	q4	35	0,0182
8383	q4	45	3,4837

Producto final	Producto genérico	Proveedor	$a_{ij}$
8383	<i>q4</i>	51	1,9808
8383	<i>q4</i>	54	1,999
8383	<i>q7</i>	2	0,5564
8383	<i>q7</i>	7	1,2178
8383	<i>q7</i>	12	7,0639
8383	<i>q7</i>	18	5,8825
8383	<i>q7</i>	43	1,3093
8383	<i>q7</i>	54	0,9944
8383	<i>q7</i>	57	1,7852
8383	<i>q7</i>	59	5,1466

Los costes utilizados para este problema de planificación de la producción y transporte son aproximados y se determinaron a partir de las consultas realizadas a la empresa objeto de la aplicación. Por motivos de confidencialidad, estos costes aparecen distorsionados aunque manteniendo la relación entre ellos. Los costes unitarios de producción de los productos 1313, 8383 y 5555, son 100€, 75€ y 63€ por unidad respectivamente. Los costes unitarios de adquisición (*cmp*) de los componentes que los forman se muestran en la Tabla V-4. Los costes unitarios del mantenimiento de inventarios (*ci*) se asumen de 6€ por día para los productos finales.

**Tabla V-4.** Costes de adquisición e inventario de componentes y materias primas

Producto genérico	Proveedor	<i>cmp</i> (€/unidad)	<i>ci</i> (€/unidad y día)
<i>q1</i>	5	11,5150	0,39812779
<i>q1</i>	7	16,3240	0,01287543
<i>q1</i>	32	7,1228	0,02480665
<i>q1</i>	33	35,5397	0,00054242
<i>q1</i>	35	3,0720	0,0287381
<i>q1</i>	41	5,2088	0,03861435
<i>q1</i>	43	4,7166	0,01858371
<i>q1</i>	45	0,8579	0,02634481
<i>q1</i>	50	3,7272	0,02101598
<i>q1</i>	73	19,7400	0,01017829

MRP IV: Planificación de requerimientos de materiales cuarta generación

<b>Producto genérico</b>	<b>Proveedor</b>	<b>cmp (€/unidad)</b>	<b>ci (€/unidad y día)</b>
q2	2	6,1307	0,00141981
q2	7	15,6586	0,82929825
q2	30	0,9625	0,01354516
q2	32	5,5716	0,0247242
q2	33	25,0598	0,00087184
q2	37	10,0777	0,00700061
q2	40	4,8399	0,01557879
q2	41	3,3023	0,00944541
q2	43	2,7199	0,07311833
q2	44	0,3048	0,07124384
q2	45	14,7033	0,01184527
q2	46	2,1167	0,09493947
q2	51	22,2954	0,02251294
q2	55	2,8535	0,00036352
q2	56	45,1574	0,0893163
q2	57	11,9723	0,05671113
q2	69	9,1764	0,00472945
q2	73	1,5670	0,00132202
q3	6	8,5800	0,00086669
q3	7	15,1360	0,02895325
q3	12	5,5673	0,00123773
q3	18	3,6382	0,01596169
q3	29	15,3680	0,0260004
q3	31	34,5435	0,01517066
q3	32	8,0646	0,12383482
q3	34	14,5345	0,06376606
q3	43	4,5988	0,01214179
q3	44	0,2332	0,02141185
q3	45	5,9264	0,0089925
q3	48	0,9078	0,0188212
q3	52	2,0497	0,53042535

Producto genérico	Proveedor	cmp (€/unidad)	ci (€/unidad y día)
q3	57	0,7800	0,06640505
q3	72	5,5351	0,00055504
q3	73	2,7513	0,22311417
q4	2	11,4720	0,00675108
q4	7	3,6930	0,28698602
q4	12	0,5089	0,00195487
q4	18	0,1499	0,00010369
q4	32	9,6744	0,04691044
q4	33	52,6888	0,02128975
q4	35	1,7486	0,12559159
q4	45	4,1282	0,00900577
q4	51	1,8846	0,0555828
q4	54	3,2650	0,01217701
q6	73	2,0537	0,0517667
q7	2	26,1969	0,02874546
q7	7	0,8400	0,9075013
q7	12	23,5528	0,00529502
q7	18	0,1650	0,00020807
q7	43	4,5920	0,03279556
q7	54	0,0384	0,00891884
q7	57	2,9521	0,07949992
q7	59	0,3177	0,00557988

Para una planta JIT suministradora de piezas y componentes para automóviles, los retrasos de la demanda no están permitidos aunque podrían llegar a ocurrir, con lo que se van a considerar unos costes suficientemente elevados de penalización del retraso de la demanda (*crd*) para cada producto final del orden de unas 2000 veces los costes de mantenimiento de inventarios, es decir, 12.000 € por unidad retrasada diariamente. Como se asume que todos los componentes comprados son entregados según el programa de producción y, por tanto, no existe retraso de la demanda, los costes del retraso de la demanda para los componentes son nulos.

El recurso productivo que va a restringir al sistema MRP es la línea de montaje. El horario diario de trabajo es de 8 horas por turno, 2 turnos al día y 5 días a la sema-

na. Por tanto, la capacidad disponible semanal para la producción de los productos finales considerados es de 16 horas diarias. La capacidad requerida para la fabricación de cada uno de ellos es de alrededor de 47,64 segundos/asiento (0,013235642 horas/asiento).

La empresa no utiliza horas extra aunque sí puede recurrir a la subcontratación externa del montaje de los asientos para automóviles en otras plantas del grupo en casos puntuales en los que sea estrictamente necesario. En este problema, la variable de decisión tiempo extra (*Tex*) hace referencia a horas de montaje a subcontratar externamente, más que a horas extraordinarias a realizar en la propia factoría. Por tanto, no se consideran límites de horas extra. Se asume que los costes de producción en tiempo extra (*ctex*) son de aproximadamente 1,2 veces los del tiempo regular, por tanto, el coste de 1 hora extra es de 120€. Por otro lado, los costes de la capacidad ociosa (*ctoc*) se consideran nulos.

En el caso de los componentes, la empresa no dispone de los datos ni de la capacidad requerida ni de la capacidad disponible de sus proveedores para producir cada uno de los componentes suministrados. Como ya se indicó anteriormente, la empresa únicamente realiza una explosión de materiales en su proceso de planificación de la producción sin realizar la planificación de la capacidad a medio plazo. No obstante, el estudio de las capacidades y restricciones de sus proveedores es una línea futura de investigación que podría llevar a la reducción de los tiempos de suministro considerados y, por tanto, de los costes a lo largo de la cadena de suministro.

Se considera un rendimiento del 100%, es decir, si entran a la línea de montaje 1000 asientos, salen 1000 asientos, por lo que no se consideran pérdidas por rechazos de calidad en la planificación de la producción a corto plazo. Al tratarse de una planta JIT, tampoco se consideran lotes de producción de productos finales, ni de pedido a proveedores.

Uno de los parámetros que se ha considerado en el modelo propuesto es el de las recepciones programadas (*RP*). El valor de *RP* concierne a las cantidades de productos (productos finales, componentes, materias primas y submontajes) con tiempos de suministro (*TS*) mayores que cero, que empezaron a producirse en un período anterior al del lanzamiento del MRP y que serán recepcionados en alguno de los períodos del horizonte de planificación abarcado en el lanzamiento del MRP. En el ejemplo de aplicación utilizado en esta tesis, se consideran las *RP* únicamente para los componentes, ya que el producto final ensamblado en la línea de montaje tiene un *TS* nulo.

Los planes de producción para los productos finales considerados (*DCI*) proporcionan la demanda (requerimientos brutos) para los componentes que se necesitan para su producción. Para determinar las recepciones programadas (*RP*) y el inventario existente (*INVTO*) para la primera explosión del MRP, se explosionará el modelo MRPDet (Mula et al., 2006) para el primer período y para las demandas insatisfe-

chas que puedan satisfacerse con una *RP*, se generará una *RP* del mismo valor; para las que no puedan ser satisfechas porque la suma de los *TS* de los componentes sea mayor que el número de períodos de anticipación, se generará un stock del mismo valor. El objetivo es que el modelo comience con acierto al 100% en los primeros períodos, pero con el stock mínimo, para observar como se comporta en los períodos restantes.

Se parte de que no existen retrasos de la demanda (inventarios negativos) de los productos finales al principio del horizonte de planificación.

Para el cálculo de la planificación de transporte, se parte de un coste de 2€ por kilómetro recorrido, tanto para el transporte de tipo camión completo, como para el transporte mediante rutas. Además, para ambos tipos de envío también se contempla un coste añadido de 100€ por cada parada realizada, relacionada con el tiempo de inactividad del camión durante el tiempo de carga en los proveedores o de descarga en la planta de montaje de asientos. Por otro lado, es una práctica común en los proveedores logísticos incluir costes fijos por el uso de vehículos, además de los costes de parada y por distancia recorrida. Según Desaulniers (2007), los costes fijos asociados a cada vehículo deben ser los suficientemente altos para evitar soluciones subóptimas. En ese aspecto, se han considerado unos costes fijos por uso de camión de 1500€, de acuerdo a algunas de las instancias propuestas en los experimentos computacionales llevados a cabo por Penna et al. (2013).

A partir de las localizaciones geográficas de cada proveedor, facilitadas por la empresa de montaje de asientos, se ha procedido al cálculo de las distancias por carretera entre cada uno de los proveedores y la planta de montaje de asientos. Para ello, se ha utilizado la herramienta API de Google Maps (Google, 2014), de forma que se han obtenido las distancias en kilómetros y los tiempos aproximados de viaje entre cada nodo de la red de transporte. Las distancias y los tiempos obtenidos pueden ser asimétricos, es decir, la distancia entre el nodo  $i$  y el nodo  $j$  puede ser diferente a la distancia a recorrer para ir del nodo  $j$  al nodo  $i$ . Dado que el modelo de programación matemática propuesto es de tiempo discreto, los tiempos de tránsito entre nodos han de expresarse como un múltiplo entero del periodo básico de planificación, en este caso, periodos diarios. A partir de esta premisa, de los resultados de tiempo de viaje obtenidos a través de la interacción con la plataforma de Google Maps y suponiendo una jornada laboral de 8 horas de conducción, de acuerdo con la normativa europea vigente, se expresan los tiempos de tránsito entre cada nodo redondeando el resultado obtenido al entero superior para aquellos tiempos superiores a un día de viaje, añadiendo un tiempo de seguridad adicional. A partir de estos tiempos de tránsito, se asignan los tiempos de suministro de cada proveedor, que coinciden con el tiempo de tránsito entre cada proveedor y la planta de montaje de asientos. Para aquellos tiempos de tránsito inferiores a un día, se realiza el redondeo a la inversa, suponiendo que en un mismo día se puede realizar el recorrido entre ambos nodos sin consumo de tiempo. La agrupación de aquellos nodos entre los cuales el



tiempo de tránsito se considera nulo da lugar a un conjunto de clústeres de proveedores que permiten el diseño de rutas que duran más de un periodo, y suponen el paso por uno o varios nodos dentro de cada clúster sin consumo de tiempo, de forma que sólo se considera el consumo de periodos entre tránsitos de nodos de clústeres diferentes. La agrupación de proveedores y la formación de clústeres se ha realizado de forma manual, con un criterio geográfico, tal y como se realiza por parte de los planificadores de la empresa de montaje de asientos. Una línea futura de investigación consistiría en el desarrollo de un algoritmo que permita la agrupación de proveedores para el diseño de rutas de transporte en función de una serie de criterios más amplios, y no solamente el geográfico.

La Figura V-4 muestra el grafo direccional obtenido. En él pueden distinguirse un total de 5 agrupaciones o clústeres de proveedores con conexiones direccionales entre ellos. Esto implica que, con el objetivo de reducir el tamaño del modelo de programación matemática, se han eliminado las conexiones que implicarían el recorrido de distancias adicionales como, por ejemplo, comenzar la ruta por un proveedor cercano y continuarla por un proveedor situado a más distancia de la planta de montaje de asientos. Todos los proveedores dentro de una misma agrupación están interconectados bidireccionalmente. De esta forma, se reduce el número de arcos posibles de 210 a 82. En la Figura V-4 se muestran las conexiones entre agrupaciones o clústeres mediante flechas que indican el sentido de los posibles caminos que los relacionan. Asimismo, cada enlace indica el tiempo de tránsito en periodos diarios necesarios para completar la ruta entre dos agrupaciones de proveedores.

Las distancias existentes entre cada proveedor, y entre cada proveedor y la planta de fabricación de asientos se muestra en la Tabla V-5, así como los tiempos de tránsito asociados expresados en periodos diarios. También, se muestran los datos relativos al nodo virtual, utilizado como inicio de las rutas abiertas, que no supone distancia alguna ni tiempo de tránsito hasta el primer proveedor de las mismas. Los tiempos de suministro o *lead time* por proveedor, obtenidos a partir de los tiempos de tránsito anteriores para los envíos por rutas, se muestran en la Tabla V-6, junto con el tipo de envío asignado a cada proveedor.

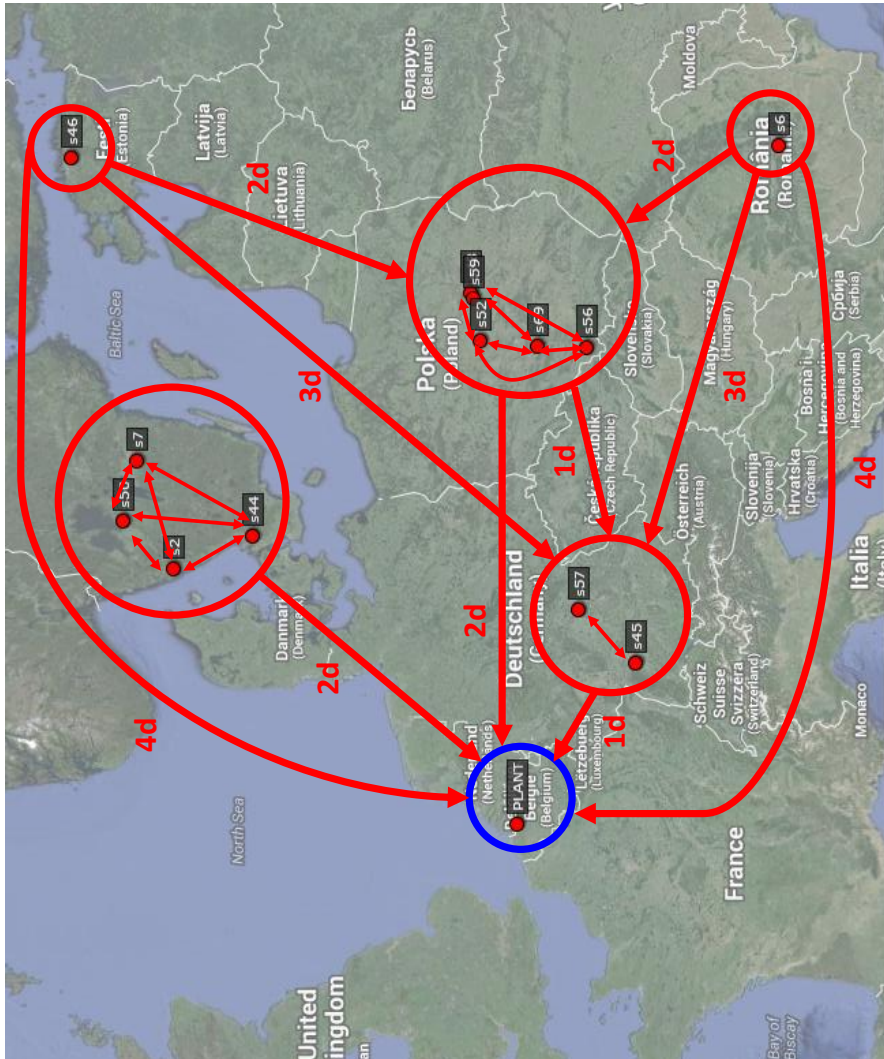


Figura V-4. Agrupaciones de proveedores, conexiones entre agrupaciones y tiempos de tránsito

**Tabla V-5.** Distancias y tiempos de tránsito entre proveedores y planta de montaje de asientos

<b>Nodo origen</b>	<b>Nodo destino</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Tiempo de tránsito (días)</b>
2	Planta	1233,92	2
2	7	275,56	0
2	44	194,55	0
2	50	151,93	0
6	Planta	2116,79	4
6	43	1183,40	2
6	45	1647,74	3
6	52	1219,11	2
6	56	991,99	2
6	57	2170,21	3
6	59	1257,88	2
6	69	1070,65	2
7	Planta	1373,04	2
7	2	274,28	0
7	44	324,76	0
7	50	209,65	0
43	Planta	1296,13	2
43	45	1158,02	1
43	52	120,51	0
43	56	337,28	0
43	57	1347,44	1
43	59	15,66	0
43	69	206,26	0
44	Planta	1056,99	2
44	2	193,01	0

<b>Nodo origen</b>	<b>Nodo destino</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Tiempo de tránsito (días)</b>
44	50	318,83	0
45	Planta	593,34	1
45	57	602,67	0
46	Planta	2292,23	4
46	43	1003,56	2
46	45	2154,13	3
46	52	1116,61	2
46	56	1342,37	2
46	57	2343,55	3
46	59	1018,46	2
46	69	1211,35	2
50	Planta	1367,24	2
50	2	152,21	0
50	44	318,96	0
52	Planta	1194,10	2
52	43	119,09	0
52	45	1056,00	1
52	56	283,18	0
52	57	1245,42	1
52	59	110,26	0
52	69	152,16	0
56	Planta	1290,32	2
56	43	334,82	0
56	45	920,74	1
56	52	280,09	0
56	57	1341,63	1

*MRP IV: Planificación de requerimientos de materiales cuarta generación*

---

<b>Nodo origen</b>	<b>Nodo destino</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Tiempo de tránsito (días)</b>
56	59	318,86	0
56	69	131,62	0
57	Planta	80,90	1
57	45	601,53	0
59	Planta	1285,85	2
59	43	15,65	0
59	45	1147,75	1
59	52	110,23	0
59	56	321,35	0
59	57	1337,17	1
59	69	190,33	0
69	Planta	1248,81	2
69	43	205,04	0
69	45	963,99	1
69	52	150,31	0
69	56	133,80	0
69	57	1300,13	1
69	59	189,07	0
Nodo virtual	2	0	0
Nodo virtual	6	0	0
Nodo virtual	7	0	0
Nodo virtual	43	0	0
Nodo virtual	44	0	0
Nodo virtual	45	0	0
Nodo virtual	46	0	0
Nodo virtual	50	0	0
Nodo virtual	52	0	0
Nodo virtual	56	0	0

<b>Nodo origen</b>	<b>Nodo destino</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Tiempo de tránsito (días)</b>
Nodo virtual	57	0	0
Nodo virtual	59	0	0
Nodo virtual	69	0	0

**Tabla V-6.** Tiempos de suministro de proveedores y tipo de envío asociado

<b>Proveedor</b>	<b>Tiempo de suministro (días)</b>	<b>Tipo de envío</b>
2	2	Rutas
5	3	Rutas
6	4	Camión completo
7	2	Rutas
12	3	Rutas
18	2	Camión completo
29	3	Camión completo
30	2	Camión completo
31	5	Camión completo
32	2	Camión completo
33	2	Camión completo
34	2	Camión completo
35	1	Camión completo
37	2	Camión completo
40	3	Camión completo
41	3	Camión completo
43	2	Camión completo
44	2	Rutas
45	1	Rutas

Proveedor	Tiempo de suministro (días)	Tipo de envío
46	4	Rutas
48	1	Rutas
50	2	Camión completo
51	3	Rutas
52	2	Camión completo
54	1	Rutas
55	1	Camión completo
56	2	Camión completo
57	1	Rutas
59	2	Rutas
69	2	Rutas
72	2	Rutas
73	2	Camión completo

## 4.2 Suposiciones

Para la ejecución del experimento computacional piloto se asumen las siguientes consideraciones que se detallan a continuación. Muchas de ellas ya se han expuesto en puntos anteriores y se muestran de forma resumida:

- La demanda del cliente se establece con relación a tres productos finales representativos del total de productos fabricados por la empresa de montaje de asientos
- Las variables de decisión  $P_{it}$ ,  $INVTP_{it}$  y  $Rd_{it}$  son enteras
- No se consideran lotes de producción ni lotes mínimos de transporte
- Si el sistema no puede producir completamente las cantidades demandadas por el fabricante de automóviles, se permiten las reprogramaciones de la

demanda retrasada para los productos finales, aunque con un gran coste de penalización.

- Solo se considera un único recurso productivo que restringe la producción de los productos finales. Este recurso productivo es la línea de montaje.
- No se consideran variaciones de producción por defectos de calidad o fallos de máquinas. Del mismo modo, no existen pérdidas, roturas ni extravíos en los distintos transportes que se realicen.
- El modelo MRP IV se lanza cada lunes cuando se actualizan los valores de demanda con un horizonte de diez días para cada uno de los productos finales a partir de la recepción del *DCI*. Estos valores de demanda se consideran firmes.
- Dado el esfuerzo computacional supuesto para el cálculo de los modelos se establece un tiempo máximo de cálculo de 15 minutos.
- Para reproducir el enfoque de planificación secuencial llevado a cabo en la empresa, y sin ningún tipo de integración, se realiza una ejecución del modelo MRPDet (Mula et al. 2006), para simular el proceso de planificación de la producción, y cuya explosión de lista de materiales actúa como entrada en un modelo de planificación de transporte de camión completo, similar a Díaz-Madroñero et al. (2012) y Peidro et al. (2010) y basado en la hoja de cálculo utilizada en la empresa, y un modelo de rutas. Estos modelos se lanzan igualmente para un horizonte de diez días.
- Las medidas de ejecución para cada lanzamiento son: costes unitarios de producción, costes unitarios de compra de materias primas y componentes, costes unitarios de mantenimiento de inventarios, costes por retraso de la demanda, costes de horas extra y costes de transporte. Los costes de la capacidad ociosa de los recursos productivos se consideran nulos. Los costes de retraso de la demanda se consideran sólo para los productos finales.

### 4.3 Mecanismo de cálculo

Los experimentos computacionales se han desarrollado utilizando el concepto de horizonte de planificación rodante (Baker, 1977). Si se considera un horizonte de planificación de 6 semanas (30 periodos diarios), correspondiente a un segmento de planificación del fabricante de automóviles, el problema que se obtiene es demasiado grande para poder ser resuelto mediante un solucionador comercial de programación entera mixta. Así pues, con la finalidad de poder resolver el problema para la totalidad de los periodos considerados se ha optado por el desarrollo de una heu-



rística de horizonte rodante. Este tipo de heurísticas han sido aplicadas tanto en problemas de planificación de la producción (Mohammadi, Fatemi Ghomi, Karimi, & Torabi, 2010; Ramezani, Saidi-Mehrabad, & Fattahi, 2013) como de planificación de transporte con horizontes de planificación extensos (Agra, Christiansen, Delgado, & Simonetti, 2014; Rakke et al., 2011). Las heurísticas de horizonte rodante se basan en dividir el horizonte de planificación en subhorizontes más pequeños, resolviendo repetidamente los modelos de programación matemática asociados a los subhorizontes de planificación obtenidos.

El mecanismo de horizonte rodante se muestra en la Figura V-5 y Figura V-6. En cada iteración  $k$  de la heurística, el subhorizonte se divide en dos partes: (i) una parte congelada, en la que se reciben mediante el transporte las cantidades planificadas en la iteración anterior para poder acometer la producción fijada en la iteración anterior sin roturas de inventario, y (ii) una parte en la que se calculan las cantidades a producir ( $P$ ) y las cantidades de materias primas y componentes y la planificación del transporte correspondiente ( $RT$ ), teniendo en cuenta el inventario disponible al final del último periodo de la primera mitad del subhorizonte de planificación en la iteración anterior ( $INVTP$  y  $INVTC$ ). Estas cantidades calculadas se congelan y pasan a considerarse cantidades a producir y recepciones programadas ( $RP$ ) en la primera mitad del subhorizonte en la siguiente iteración, respectivamente. El proceso se repite hasta que se cubre la totalidad del horizonte de planificación. En cada iteración, se resuelve el modelo de programación lineal entera mixta correspondiente, coincidiendo con la recepción de cada  $DCI$ .

Para reproducir el mecanismo de planificación de la producción y el transporte de aprovisionamiento llevado a cabo en la planta de montaje de asientos se han utilizado tres modelos de programación matemática, según se indica en la Figura V-7, similar al utilizado en Kuhn y Liske (2011). En primer lugar, para la planificación de la producción y el cálculo de las cantidades de materias primas y componentes a pedir, se ha utilizado una adaptación del modelo MRPDet propuesto por Mula et al. (2006). Las salidas obtenidas por este modelo, respecto a las cantidades a pedir a proveedores, actúan como entrada en los modelos de cálculo de camiones completos, similar a Díaz-Madroñero et al. (2012) y Peidro et al. (2010), y rutas, de forma que se planifica el transporte de forma separada a la información del sistema de producción. Estos modelos, a partir de las cantidades determinadas por MRPDet, calculan los envíos mediante camión completo y las rutas a seguir por los camiones, así como su orden de paso por los proveedores, suponiendo que sólo se cargarán las cantidades calculadas por el modelo MRPDet. Asimismo, la asignación del modo de envío correspondiente a cada proveedor es conocida de antemano, y se corresponde con la realizada, previamente, por la empresa de montaje de asientos. Al igual que en el caso de MRP IV, cuando es más ventajoso en costes, el modelo de rutas puede recurrir al uso de camiones completos.

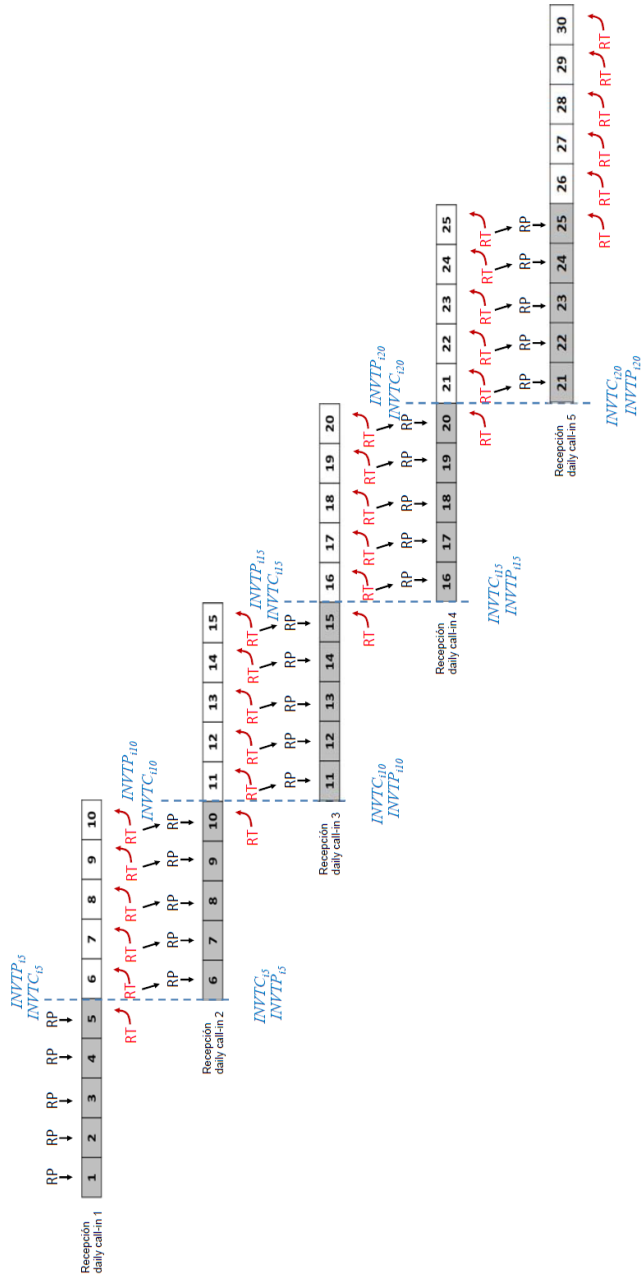


Figura V-5. Mecanismo de la heurística de horizonte rodante (I)

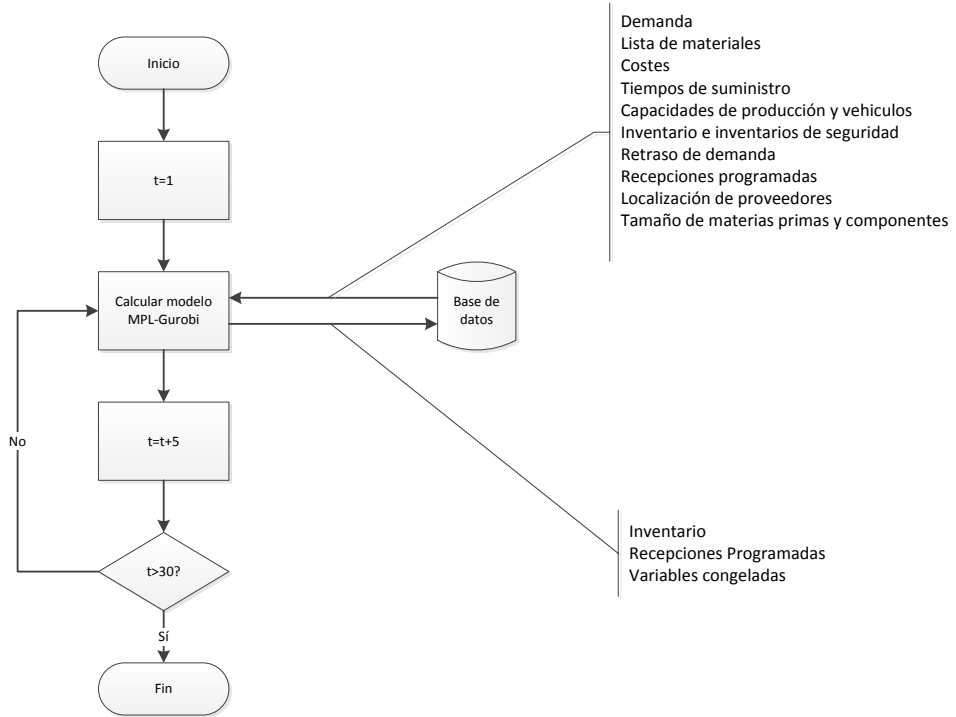


Figura V-6. Mecanismo de la heurística de horizonte rodante (II)

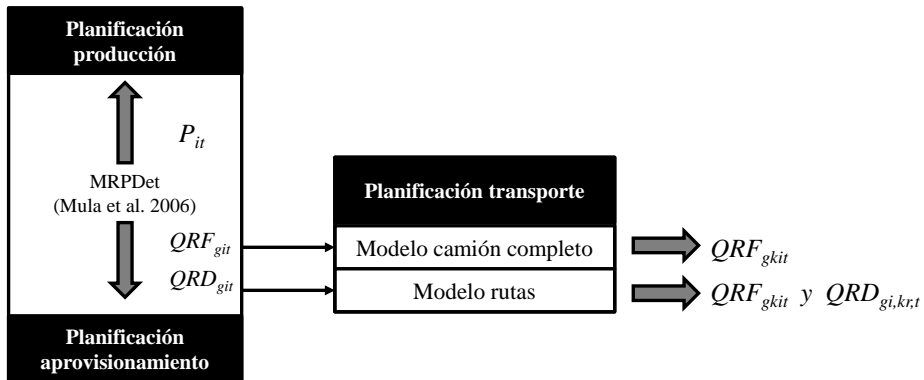


Figura V-7. Enfoque sin integración secuencial de planificación de la producción y el transporte

El modelo propuesto MRP IV, y los utilizados para compararlo con el enfoque de planificación secuencial llevado a cabo en la empresa de montaje de asientos, y sin integración, han adoptado las suposiciones consideradas en este problema ejemplo y se han implementado usando el lenguaje de modelado MPL (Maximal Software Incorporation, 2014). Su resolución se ha llevado a cabo a través del solucionador Gurobi (Gurobi Optimization Incorporation, 2014). Los modelos utilizados tanto para el enfoque integrado como para el enfoque secuencial se detallan en el apartado siguiente. Asimismo, los modelos correspondientes implementados con el lenguaje MPL se encuentran en el Anexo II de esta Tesis. Los ficheros de las soluciones se encuentran en el Anexo III.

Los experimentos se han realizado en un servidor con procesador Intel Xeon 2.93 GHz con dos procesadores y 48GB de memoria RAM.

#### **4.4 Modelos para la comparación del enfoque de planificación integrado y secuencial en la planta de montaje de asientos**

##### **4.4.1 Enfoque de planificación integrado: modelo MRP IV**

El modelo MRP IV utilizado para el proceso de validación se presenta a continuación. Respecto a la propuesta de modelo MRP IV, detallada en el capítulo IV, difiere en la eliminación de los parámetros, componentes y restricciones relacionados con el modo de transporte de rutas repetitivas o *milk-run*, debido a que en la cadena de suministro bajo estudio no existen proveedores de este tipo. Asimismo, tampoco se considera limitación en la capacidad de almacenamiento de productos. Por otro lado, según lo indicado en el apartado anterior, se han incluido costes fijos por uso de camión, tanto en el modo de envío mediante camión completo como mediante por rutas. Dada la similitud al modelo propuesto en el capítulo anterior, se remite a éste para la explicación detallada de la función objetivo y restricciones correspondientes.

##### Índices

<i>I,S</i>	<i>Conjunto de productos finales, componentes, submontajes y materias primas, proveedores, nodo planta y nodo virtual</i>
<i>TF</i>	<i>Conjunto de proveedores de camión completo</i>
<i>TR</i>	<i>Conjunto de proveedores de rutas</i>

$T$	Conjunto de periodos de tiempo
$J$	Conjunto de productos finales
$C$	Conjunto de componentes y materias primas
$R$	Conjunto de recursos productivos
$K$	Conjunto de camiones disponibles por periodo para envío completo
$L$	Conjunto de camiones disponibles en todo el horizonte de planificación para envío por rutas
$Q$	Conjunto de sets componentes de productos finales

Parámetros

$d_{it}$	Demanda de producto final $i$ en el periodo $t$
$ts_i$	Tiempo de suministro del proveedor $i$
$INVTP_{i0}$	Inventario inicial de producto final $i$ disponible en planta
$INVTC_{qi0}$	Inventario inicial del set $q$ del proveedor $i$ disponible en planta
$RP_{it}$	Recepciones programadas de producto final $i$ en periodo $t$
$RPC_{qit}$	Recepciones programadas del set $q$ del proveedor $i$ en el periodo $t$
$RD_{i0}$	Retraso inicial de demanda de producto final $i$
$\alpha_{jq_i}$	Cantidad necesaria del set $q$ del proveedor $i$ para producir una unidad del producto $j$
$CAP_{rt}$	Capacidad de producción del recurso $r$ en el periodo $t$
$AR_{ir}$	Tiempo necesario para fabricar el producto $i$ en el recurso $r$
$SS_{qi}$	Stock de seguridad del set $q$ del proveedor $i$
$tam_{qi}$	Tamaño de cada unidad del set $q$ del proveedor $i$ en metros lineales
$DistF_i$	Distancia a la planta desde el proveedor $i$
$DistR_{si}$	Distancia desde el proveedor $s$ al proveedor $i$
$TT_{si}$	Tiempo de tránsito desde el nodo $s$ al nodo $i$

$CAPTR$	Capacidad máxima de transporte por camión
$np$	Nodo correspondiente a la planta de producción
$nv$	Nodo virtual correspondiente al inicio de cada ruta
$cp_i$	Costes variables de producción por unidad de producto $i$
$cmp_{qi}$	Costes de compra del set $q$ del proveedor $i$
$ci_i$	Costes de inventario de producto final $i$
$ci_{qi}$	Costes de inventario del set $q$ del proveedor $i$
$crd_i$	Costes de retraso de demanda de producto $i$
$ctoc_r$	Costes de tiempo ocioso en el recurso $r$
$ctext_r$	Costes de tiempo extra en el recurso $r$
$ckm$	Coste por kilómetro recorrido
$cpar$	Coste por parada de recogida de productos en cada proveedor
$cfveh$	Coste fijo por uso de camión por ruta realizada

Variables de decisión

$P_{it}$	Cantidad a producir del producto $i$ en el periodo $t$
$QRF_{qikt}$	Cantidad a pedir del set $q$ al proveedor $i$ mediante camión completo en el camión $k$ en el periodo $t$
$QRD_{qilt}$	Cantidad a pedir del set $q$ al proveedor $i$ mediante rutas en el camión $kr$ en el periodo $t$
$INVTP_{it}$	Inventario de producto final $i$ al final del periodo $t$
$INVTC_{qit}$	Inventario del set $q$ del proveedor $i$ al final del periodo $t$
$RD_{it}$	Retraso de demanda del producto final $i$ en el periodo $t$
$TOC_{rt}$	Horas ociosas del recurso $r$ en el periodo $t$
$TEX_{rt}$	Horas extra del recurso $r$ en el periodo $t$
$TRF_{ikt}$	Espacio de camión ocupado por la cantidad $QRF$ para envío mediante camión completo en el camión $k$ en el periodo $t$

$TRD_{ilt}$	Espacio de camión ocupado por la cantidad $QRD$ para envío mediante rutas en el camión $kr$ en el periodo $t$
$Y_{ikt}$	1 si el camión $k$ viaja desde proveedor $i$ a la planta mediante envío por camión completo, 0 en caso contrario
$X_{ltsi}$	1 si el camión $kr$ sale desde el nodo $s$ hacia el nodo $i$ en el periodo $t$
$LX_{ltsi}$	1 si el camión $kr$ llega al nodo $i$ desde el nodo $s$ en el periodo $t$
$YR_{lst}$	1 si el camión $kr$ visita el nodo $s$ en el periodo $t$ , 0 en caso contrario
$YRD_{lit}$	1 si el valor de $TRD$ es mayor que 0, 0 en otro caso
$WR_{lst}$	Variable auxiliar utilizada en la restricción de eliminación de bucles de rutas

### Función objetivo

Minimizar costes totales

Minimizar

$$\begin{aligned}
 z = & \sum_{i \in J} \sum_t cp_i \cdot P_{it} + \sum_{i \in C} \sum_q \sum_k \sum_t cmp_{qi} \cdot QRF_{qikt} + \sum_{i \in C} \sum_q \sum_l \sum_t cmp_{qi} \cdot QRD_{qilt} + \\
 & + \sum_{i \in J} \sum_t ci_i \cdot INVTP_{it} + \sum_{i \in C} \sum_q \sum_t ci_{qi} \cdot INVTC_{qit} \\
 & + \sum_{i \in J} \sum_t crd_i \cdot RD_{it} + \sum_r \sum_t ctoc_r \cdot TOC_r + \sum_r \sum_t ctex_r \cdot TEX_r \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_t ckm \cdot DistF_i \cdot Y_{ikt} + \sum_l \sum_t \sum_s \sum_i ckm \cdot DistR_{si} \cdot X_{ltsi}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_i \sum_k \sum_t cpar \cdot Y_{ikt} + \sum_l \sum_t \sum_s \sum_{i=0} cpar \cdot LX_{ltsi} \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_t cfveh \cdot Y_{ikt} + \sum_l \sum_t \sum_s \sum_{i=0} cfveh \cdot LX_{ltsi}
 \end{aligned} \tag{V-1}$$

### Restricciones

$$\begin{aligned}
 INVTP_{i,t-1} + P_{i,t-ts_i} + RP_{it} - RD_{i,t-1} + RD_{it} - INVTP_{it} = d_{it} \\
 \forall i \in J, \forall t
 \end{aligned} \tag{V-2}$$

$$\begin{aligned}
 INVTC_{q,i,t-1} + \sum_k QRF_{qik,t-ts_i} + \sum_l QRD_{qil,t-ts_i} + \\
 + RPC_{qit} - INVTC_{qit} = \sum_j \alpha_{jq_i} \cdot P_{jt} \quad \forall i \in C, \forall q, \forall t
 \end{aligned} \tag{V-3}$$

$$\sum_{i \in J} P_{it} AR_{ir} + TOC_n - TEX_n = CAP_n \quad \forall r, \forall t \tag{V-4}$$

$$TRF_{ikt} = \sum_q tam_{qi} \cdot QRF_{qikt} \quad \forall i \in C \cap \{TF \cup TR\}, \forall k, \forall t \tag{V-5}$$

$$TRF_{ikt} \leq CAPTR \cdot Y_{ikt} \quad \forall i \in C \cap \{TF \cup TR\}, \forall k, \forall t \tag{V-6}$$

$$TRD_{ilt} = \sum_q tam_{qi} \cdot QRD_{qilt} \quad \forall i \in C \cap TR, \forall l, \forall t \tag{V-7}$$

$$\sum_l \sum_{i \in TR \cup nv} X_{l,np,i} = 0 \quad \forall t \tag{V-8}$$



$$\sum_t \sum_{s \in TR \cup np} X_{lts, nv} = 0 \quad \forall t \quad (\text{V-9})$$

$$\sum_t \sum_{i \in TR \cup np} X_{lts, nv, i} \leq 1 \quad \forall l \quad (\text{V-10})$$

$$\sum_t \sum_{s \in TR \cup nv} X_{lts, np} \leq 1 \quad \forall l \quad (\text{V-11})$$

$$\sum_l \sum_t \sum_{i \in TR \cup np} X_{lts, nv, i} \leq L \quad (\text{V-12})$$

$$\sum_l \sum_t \sum_{s \in TR \cup nv} X_{lts, np} \leq L \quad (\text{V-13})$$

$$\sum_{s \in TR \cup nv} LX_{ltsi} = YRD_{lit} \quad \forall i \in TR, \forall l, \forall t \quad (\text{V-14})$$

$$TRD_{ilt} \leq CAPTR \cdot YRD_{lit} \quad \forall i \in C \cap TR, \forall l, \forall t \quad (\text{V-15})$$

$$\sum_{i \in TR \cap C} \sum_t TRD_{ilt} \leq CAPTR \quad \forall l \quad (\text{V-16})$$

$$\sum_{i \in TR \cup np} X_{ltsi} = YR_{lst} \quad \forall s \in TR, \forall l, \forall t \quad (\text{V-17})$$

$$X_{ltsi} = LX_{l, t+TT_{si}, si} \quad \forall i \in TR \cup np, \forall s \in TR \cup nv, \forall l, \forall t \quad (\text{V-18})$$

$$\sum_{i \in TR \cup np} X_{ltsi} = \sum_{i \in TR \cup nv} LX_{ltsi} \quad \forall s \in TR \cup np, \forall l, \forall t \quad (\text{V-19})$$

$$WR_{lst} - WR_{l, t+TT_{si}} + (TR-1) \cdot LX_{l, t+TT_{si}, si} \leq TR-2 \quad \forall i, s \in TR, \forall l, \forall t \quad (\text{V-20})$$

$$INVTC_{qit} \geq SS_i \quad \forall i \in C, \forall q, \forall t \quad (V-21)$$

$$RD_{i,t-T} = 0 \quad \forall i \in J \quad (V-21)$$

$$TOC_{rt}, TEX_{rb}, TRF_{ikt}, TRD_{ilt}, WR_{lst} \geq 0 \quad \forall i, \forall s, \forall r, \forall k, \forall kr, \forall t \quad (V-22)$$

$$P_{ib}, INVTP_{ib}, INVTC_{qit}, Rd_{ib}, QRF_{qikt}, QRD_{qilt} \geq 0 \in Z \quad \forall i, \forall q, \forall r, \forall k, \forall l, \forall t \quad (V-23)$$

$$X_{ltsb}, LX_{ltsb}, YRD_{lit}, YR_{lst}, Y_{ikt} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall s, \forall k, \forall l, \forall t \quad (V-24)$$

#### 4.4.2 Enfoque de planificación secuencial: modelo de planificación de producción adaptado de Mula et al. (2006)

Para reproducir el procedimiento de cálculo de la planificación de la producción de forma secuencial se ha utilizado una adaptación del modelo MRPDet propuesto por Mula et al. (2006), en el que se desagregan las variables de decisión para diferenciar entre cantidades a producir de producto final ( $P_{it}$ ) y cantidades a pedir a proveedores de camión completo ( $QRF_{git}$ ) o rutas ( $QRD_{git}$ ). Se remite al capítulo IV para la explicación detallada de la función objetivo y restricciones indicadas a continuación.

#### Índices

*I* Conjunto de productos finales, componentes, submontajes y materias primas

$T$	Conjunto de periodos de tiempo
$C$	Conjunto de componentes y materias primas
$J$	Conjunto de productos finales
$R$	Conjunto de recursos productivos
$Q$	Conjunto de sets componentes de productos finales

Parámetros

$d_{it}$	Demanda de producto final $i$ en el periodo $t$
$ts_i$	Tiempo de suministro del proveedor $i$
$INVT_{i0}$	Inventario inicial de producto final $i$ disponible en planta
$INVC_{qi0}$	Inventario inicial del set $q$ del proveedor $i$ disponible en planta
$RP_{it}$	Recepciones programadas de producto final $i$ en periodo $t$
$RPC_{qit}$	Recepciones programadas del set $q$ del proveedor $i$ en el periodo $t$
$RD_{i0}$	Retraso inicial de demanda de producto final $i$
$\alpha_{jq_i}$	Cantidad necesaria del set $q$ del proveedor $i$ para producir una unidad del producto $j$
$CAP_{rt}$	Capacidad de producción del recurso $r$ en el periodo $t$
$AR_{ir}$	Tiempo necesario para fabricar el producto $i$ en el recurso $r$
$SS_{qi}$	Stock de seguridad del set $q$ del proveedor $i$
$cp_i$	Costes variables de producción por unidad de producto $i$
$cmp_{qi}$	Costes de compra del set $q$ del proveedor $i$
$ci_i$	Costes de inventario de producto final $i$
$ci_{qi}$	Costes de inventario del set $q$ del proveedor $i$
$crd_i$	Costes de retraso de demanda de producto $i$
$ctoc_r$	Costes de tiempo ocioso en el recurso $r$
$ctext_r$	Costes de tiempo extra en el recurso $r$

Variables de decisión

$P_{it}$	Cantidad a producir del producto $i$ en el periodo $t$
$QRF_{qit}$	Cantidad a pedir del set $q$ al proveedor $i$ mediante camión completo en el periodo $t$
$QRD_{qi,t}$	Cantidad a pedir del set $q$ al proveedor $i$ mediante rutas en el periodo $t$
$INVTP_{it}$	Inventario de producto final $i$ al final del periodo $t$
$INVTC_{qit}$	Inventario del set $q$ del proveedor $i$ al final del periodo $t$
$RD_{it}$	Retraso de demanda del producto final $i$ en el periodo $t$
$TOC_{rt}$	Horas ociosas del recurso $r$ en el periodo $t$
$TEX_{rt}$	Horas extra del recurso $r$ en el periodo $t$

Función objetivo

Minimizar costes totales

Minimizar

$$\begin{aligned}
 z = & \sum_{i \in J} \sum_t cp_i \cdot P_{it} + \sum_{i \in C} \sum_q \sum_k \sum_t cmp_{qi} \cdot QRF_{qikt} + \sum_{i \in C} \sum_q \sum_{kr} \sum_t cmp_{qi} \cdot QRD_{qi,kr,t} + \\
 & + \sum_{i \in J} \sum_t ci_i \cdot INVTP_{it} + \sum_{i \in C} \sum_q \sum_t ci_{qi} \cdot INVTC_{qit} \\
 & + \sum_{i \in J} \sum_t crd_i \cdot RD_{it} + \sum_r \sum_t ctoc_r \cdot TOC_{rt} + \sum_r \sum_t ctex_r \cdot TEX_{rt} \quad (V-25)
 \end{aligned}$$

Restricciones

$$INVTP_{i,t-1} + P_{i,t-ts_i} + RP_{it} - RD_{i,t-1} + RD_{it} - INVTP_{it} = d_{it} \quad \forall i \in J, \forall t \quad (V-26)$$

$$INVTC_{q,i,t-1} + \sum_k QRF_{qik,t-ts_i} + \sum_{kr} QRD_{qi,kr,t-ts_i} + RPC_{qit} - INVTC_{qit} = \sum_j \alpha_{jq_i} \cdot P_{jt} \quad \forall i \in C, \forall q, \forall t \quad (V-27)$$

$$\sum_{i \in J} P_{it} AR_{ir} + TOC_n - TEX_n = CAP_n \quad \forall r, \forall t \quad (V-28)$$

$$INVTC_{qit} \geq SS_i \quad \forall i \in C, \forall q, \forall t \quad (V-29)$$

$$RD_{i,t=T} = 0 \quad \forall i \in J \quad (V-30)$$

$$TOC_{rt}, TEX_{rt} \geq 0 \quad \forall r, \forall t \quad (V-31)$$

$$P_{ib}, INVTP_{ib}, INVTC_{qib}, Rd_{ib} \geq 0 \in Z \quad \forall i, \forall q, \forall t \quad (V-32)$$

#### 4.4.3 *Enfoque de planificación secuencial: modelo de planificación de transporte mediante camión completo adaptado de Díaz-Madroño et al. (2012) y Peidro et al. (2010).*

Para la planificación de los envíos directos desde los proveedores asignados al modo de envío mediante camión completo se utiliza una adaptación del modelo propuesto por Díaz-Madroño et al. (2012) y Peidro et al. (2010) de forma que se reproduzca un enfoque secuencial, planificando el transporte sin ningún tipo de información relativa a los niveles de producción e inventario, tan sólo las cantidades a pedir, provenientes de las salidas del modelo MRP anterior. El modelo correspondiente se detalla a continuación:

##### Índices

$I$	<i>Conjunto de componentes, submontajes y materias primas y proveedores</i>
$TF$	<i>Conjunto de proveedores de camión completo</i>
$T$	<i>Conjunto de periodos de tiempo</i>
$C$	<i>Conjunto de componentes y materias primas</i>
$K$	<i>Conjunto de camiones disponibles por periodo para envío completo</i>
$Q$	<i>Conjunto de sets componentes de productos finales</i>

##### Parámetros

$QRF(in)_{qit}$	<i>Cantidad a pedir del set <math>q</math> al proveedor <math>i</math> mediante camión completo en el periodo <math>t</math> (salida de MRP)</i>
$ts_i$	<i>Tiempo de suministro del proveedor <math>i</math></i>
$tam_{qi}$	<i>Tamaño de cada unidad del set <math>q</math> del proveedor <math>i</math> en metros lineales</i>
$DistF_i$	<i>Distancia a la planta desde el proveedor <math>i</math></i>
$CAPTR$	<i>Capacidad máxima de transporte por camión</i>
$cmp_{qi}$	<i>Costes de compra del set <math>q</math> del proveedor <math>i</math></i>
$ckm$	<i>Coste por kilómetro recorrido</i>

$cpar$	Coste por parada de recogida de productos en cada proveedor
$cfveh$	Coste fijo por uso de camión

Variables de decisión

$QRF(out)_{qikt}$	Cantidad a pedir del set $q$ al proveedor $i$ mediante camión completo en el camión $k$ en el periodo $t$
$TRF_{ikt}$	Espacio de camión ocupado por la cantidad $QRF$ para envío mediante camión completo en el camión $k$ en el periodo $t$
$Y_{ikt}$	1 si el camión $k$ viaja desde proveedor $i$ a la planta mediante envío por camión completo, 0 en caso contrario

Función objetivo

Minimizar costes totales

Minimizar

$$z = \sum_{i \in C} \sum_q \sum_k \sum_t cmp_{qi} \cdot QRF(out)_{qikt} + \sum_i \sum_k \sum_t ckm \cdot DistF_i \cdot Y_{ikt} + \sum_i \sum_k \sum_t cfveh \cdot Y_{ikt} \quad (V-33)$$

Restricciones

$$QRF(in)_{ikt} = \sum_k QRF(out)_{qikt} \quad \forall i, \forall k, \forall t \quad (V-34)$$

$$TRF_{ikt} = \sum_q tam_{qi} \cdot QRF(out)_{qikt} \quad \forall i \in C \cap TF, \forall k, \forall t \quad (V-35)$$

$$TRF_{ikt} \leq CAPTR \cdot Y_{ikt} \quad \forall i \in C \cap TF, \forall k, \forall t \quad (V-36)$$

$$TRF_{ikt} \geq 0 \quad \forall i, \forall k, \forall t \quad (V-37)$$

$$QRF(out)_{qikt} \geq 0 \in Z \quad \forall i, \forall q, \forall k, \forall t \quad (V-38)$$

$$Y_{ikt} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall k, \forall t \quad (V-39)$$

#### 4.4.4 Enfoque de planificación secuencial: modelo de planificación de transporte mediante rutas.

Para la planificación de los envíos desde los proveedores asignados al modo de envío mediante rutas se utilizan parte de las restricciones y parámetros utilizados en el modelo MRP IV, pero con el mismo tipo de enfoque secuencial de forma que no se disponga de ningún tipo de información relativa a los niveles de producción e inventario, tan sólo las cantidades a pedir, provenientes de las salidas del modelo MRP ejecutado en el paso anterior. Al igual que en el caso de MRP IV, cuando es más ventajoso en costes, el modelo de rutas puede recurrir al uso de camiones completos. El modelo correspondiente se detalla a continuación:

#### Índices

<i>I,S</i>	<i>Conjunto de componentes, submontajes y materias primas, proveedores, nodo planta y nodo virtual</i>
<i>TR</i>	<i>Conjunto de proveedores de rutas</i>
<i>T</i>	<i>Conjunto de periodos de tiempo</i>
<i>C</i>	<i>Conjunto de componentes y materias primas</i>
<i>K</i>	<i>Conjunto de camiones disponibles por periodo para envío completo</i>
<i>L</i>	<i>Conjunto de camiones disponibles en todo el horizonte de planificación para envío por rutas</i>



$Q$  Conjunto de sets componentes de productos finales

Parámetros

$QRD(in)_{qi,t}$	Cantidad a pedir del set $q$ al proveedor $i$ en el periodo $t$
$ts_i$	Tiempo de suministro del proveedor $i$
$tam_{qi}$	Tamaño de cada unidad del set $q$ del proveedor $i$ en metros lineales
$DistF_i$	Distancia a la planta desde el proveedor $i$
$DistR_{si}$	Distancia desde el proveedor $s$ al proveedor $i$
$TT_{si}$	Tiempo de tránsito desde el nodo $s$ al nodo $i$
$CAPTR$	Capacidad máxima de transporte por camión
$np$	Nodo correspondiente a la planta de producción
$nv$	Nodo virtual correspondiente al inicio de cada ruta
$cmp_{qi}$	Costes de compra del set $q$ del proveedor $i$
$ckm$	Coste por kilómetro recorrido
$cpar$	Coste por parada de recogida de productos en cada proveedor
$cfveh$	Coste fijo por uso de camión por ruta realizada

Variables de decisión

$QRF(out)_{qikt}$	Cantidad a pedir del set $q$ al proveedor $i$ mediante camión completo en el camión $k$ en el periodo $t$
$QRD(out)_{qilt}$	Cantidad a pedir del set $q$ al proveedor $i$ mediante rutas en el camión $kr$ en el periodo $t$
$TRF_{ikt}$	Espacio de camión ocupado por la cantidad $QRF$ para envío mediante camión completo en el camión $k$ en el periodo $t$
$TRD_{ilt}$	Espacio de camión ocupado por la cantidad $QRD$ para envío mediante rutas en el camión $kr$ en el periodo $t$
$Y_{ikt}$	1 si el camión $k$ viaja desde proveedor $i$ a la planta mediante envío por camión completo, 0 en caso contrario

$X_{ltsi}$	1 si el camión $kr$ sale desde el nodo $s$ hacia el nodo $i$ en el periodo $t$
$LX_{ltsi}$	1 si el camión $kr$ llega al nodo $i$ desde el nodo $s$ en el periodo $t$
$YR_{lst}$	1 si el camión $kr$ visita el nodo $s$ en el periodo $t$ , 0 en caso contrario
$YRD_{lit}$	1 si el valor de TRD es mayor que 0, 0 en otro caso
$WR_{lst}$	Variable auxiliar utilizada en la restricción de eliminación de bucles de rutas

### Función objetivo

Minimizar costes totales

Minimizar

$$\begin{aligned}
 z = & \sum_{i \in C} \sum_q \sum_k \sum_t cmp_{qi} \cdot QRF(out)_{qikt} + \sum_{i \in C} \sum_q \sum_l \sum_t cmp_{qi} \cdot QRD(out)_{qilt} + \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_t ckm \cdot DistF_i \cdot Y_{ikt} + \sum_l \sum_t \sum_s \sum_i ckm \cdot DistR_{si} \cdot X_{ltsi} \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_t cpar \cdot Y_{ikt} + \sum_l \sum_t \sum_s \sum_{i=0} cpar \cdot LX_{ltsi} \\
 & + \sum_i \sum_k \sum_t cfveh \cdot Y_{ikt} + \sum_l \sum_t \sum_s \sum_{i=0} cfveh \cdot LX_{ltsi}
 \end{aligned} \tag{V-39}$$

### Restricciones

$$QRD(in)_{qit} = \sum_k QRF(out)_{qikt} + \sum_l QRD(out)_{qilt}$$

$$\forall i \in C, \forall q, \forall t \quad (\text{V-40})$$

$$TRF_{ikt} = \sum_q tam_{qi} \cdot QRF(out)_{qikt} \quad \forall i \in C \cap TR, \forall k, \forall t \quad (\text{V-41})$$

$$TRF_{ikt} \leq CAPTR \cdot Y_{ikt} \quad \forall i \in C \cap TR, \forall k, \forall t \quad (\text{V-42})$$

$$TRD_{ilt} = \sum_q tam_{qi} \cdot QRD(out)_{qilt} \quad \forall i \in C \cap TR, \forall l, \forall t \quad (\text{V-43})$$

$$\sum_l \sum_{i \in TR \cup nv} X_{lt,np,i} = 0 \quad \forall t \quad (\text{V-44})$$

$$\sum_l \sum_{s \in TR \cup np} X_{lt,s,np} = 0 \quad \forall t \quad (\text{V-45})$$

$$\sum_t \sum_{i \in TR \cup np} X_{lt,np,i} \leq 1 \quad \forall l \quad (\text{V-46})$$

$$\sum_t \sum_{s \in TR \cup nv} X_{lt,s,np} \leq 1 \quad \forall l \quad (\text{V-47})$$

$$\sum_l \sum_t \sum_{i \in TR \cup np} X_{lt,np,i} \leq L \quad (\text{V-48})$$

$$\sum_l \sum_t \sum_{s \in TR \cup nv} X_{lt,s,np} \leq L \quad (\text{V-49})$$

$$\sum_{s \in TR \cup nv} LX_{ltsi} = YRD_{lit} \quad \forall i \in TR, \forall l, \forall t \quad (\text{V-50})$$

$$TRD_{ilt} \leq CAPTR \cdot YRD_{lit} \quad \forall i \in C \cap TR, \forall l, \forall t \quad (\text{V-51})$$

$$\sum_{i \in TR \cap C} \sum_t TRD_{ilt} \leq CAPTR \quad \forall l \quad (\text{V-52})$$

$$\sum_{i \in TR \cup np} X_{ltsi} = YR_{lst} \quad \forall s \in TR, \forall l, \forall t \quad (V-53)$$

$$X_{ltsi} = LX_{l,t+TT_{si},si} \quad \forall i \in TR \cup np, \forall s \in TR \cup nv, \forall l, \forall t \quad (V-54)$$

$$\sum_{i \in TR \cup np} X_{ltsi} = \sum_{i \in TR \cup nv} LX_{ltsi} \quad \forall s \in TR \cup np, \forall l, \forall t \quad (V-55)$$

$$WR_{lst} - WR_{li,t+TT_{si}} + (TR-1) \cdot LX_{l,t+TT_{si},si} \leq TR-2 \quad \forall i, s \in TR, \forall l, \forall t \quad (V-56)$$

$$TRF_{ikt}, TRD_{ilt}, WR_{lst} \geq 0 \quad \forall i, \forall s, \forall k, \forall l, \forall t \quad (V-57)$$

$$QRF(out)_{qikt}, QRD(out)_{qilt} \geq 0 \in Z \quad \forall i, \forall q, \forall k, \forall l, \forall t \quad (V-58)$$

$$X_{ltsi}, LX_{ltsi}, YRD_{lit}, YR_{lst}, Y_{ikt} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall s, \forall k, \forall l, \forall t \quad (V-59)$$

#### 4.5 Estructura de los datos de entrada y salida

En esta sección se muestra la estructura de datos utilizada para la realización de los experimentos computacionales y que se gestiona a través del gestor de bases de datos Microsoft Access 2010. En la Figura V-8 se muestra el esquema de la base de datos utilizada para el desarrollo del experimento computacional piloto. En ella pueden distinguirse un conjunto de tablas que disponen los diferentes datos de entrada comunes a cada una de las ejecuciones del modelo MRP IV.

La tabla *Items* recopila la información de cada uno de los productos finales, materiales y componentes considerados, así como de los proveedores que los suministran. Adicionalmente, esta tabla dispone de los costes unitarios de fabricación de

productos finales, el tiempo unitario de fabricación, el coste por unidad de demanda retrasada, el tipo de transporte asociado a cada proveedor, la distancia de éste a la planta de producción y el tiempo de suministro correspondiente. La tabla *Grupos* contiene los identificadores de cada uno de los productos genéricos ofrecidos por los proveedores. La tabla *ItemsGrupo* contempla la información correspondiente a cada conjunto producto genérico-proveedor ( $q,s$ ). Para cada uno de éstos, se detalla el tipo de transporte correspondiente, el coste unitario de compra, los costes de mantenimiento de inventarios, el inventario de seguridad, el inventario inicial en el primer periodo y el tamaño físico en metros lineales. Por otro lado, la tabla *Demanda* ofrece información sobre los valores de demanda de productos finales a lo largo del horizonte de planificación. Análogamente, la tabla *RProgramadas* contiene la información relativa a recepciones programadas esperadas para cada uno de los productos finales. La tabla *BOM* dispone de la lista de materiales de cada uno de los productos finales considerados y su correspondencia con cada conjunto producto genérico-proveedor. La tabla *Recursos* ofrece la información sobre los recursos productivos como, por ejemplo, la capacidad productiva en horas y los costes por uso de los mismos en tiempo extra y los costes de tiempo ocioso. La tabla *Distancias* contiene la matriz de distancias entre cada proveedor, y entre cada proveedor y la planta de producción, con el fin de planificar las rutas de transporte. Asimismo, contiene los tiempos de tránsito entre cada nodo en periodo diarios. La tabla *ParamCamion* contiene los parámetros relativos al transporte, tales como, la capacidad de los vehículos en metros lineales, los costes por kilómetro recorrido en modo camión completo y rutas, los costes de parada en camión completo y rutas, y los costes fijos por uso de vehículo.

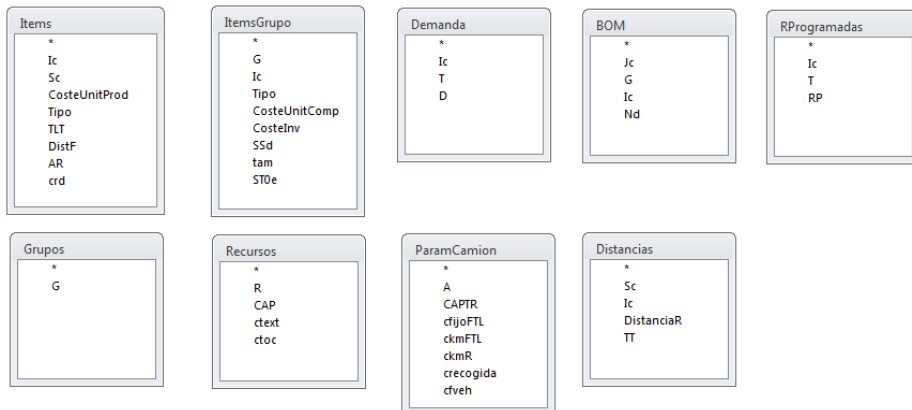


Figura V-8. Tablas empleadas para el almacenamiento de datos de entrada de los modelos

En la Tabla V-7 se resume la relación entre la información ofrecida por las tablas descritas anteriormente y los parámetros de entrada al modelo MRP IV.

**Tabla V-7.** Relación entre tablas y datos de entrada de los modelos

Parámetro	Tabla base de datos	Parámetro	Tabla base de datos
$d_{it}$	Demanda	$CAPTR$	ParamCamion
$ts_i$	Items	$cp_i$	Items
$RP_{it}$	RProgramadas	$cmp_{qi}$	ItemsGrupo
$\alpha_{jq_i}$	BOM	$ci_i$	Items
$CAP_{rt}$	Recursos	$ci_{qi}$	ItemsGrupo
$AR_{ir}$	Items	$crd_i$	Items
$SS_{qi}$	ItemsGrupo	$ctoc_r$	Recursos
$tam_{qi}$	ItemsGrupo	$ctext_r$	Recursos
$DistF_i$	Items	$ckm$	ParamCamion
$DistR_{si}$	Distancias	$cpar$	ParamCamion
$TT_{si}$	Distancias	$c\acute{f}veh$	ParamCamion

Asimismo, también pueden identificarse diferentes tablas que almacenan los datos de salida de cada una de las ejecuciones y, que a su vez, pueden servir como datos de entrada al modelo MRP IV ejecutado en la iteración siguiente, correspondiente al esquema de horizonte rodante detallado en la sección 4.3. Entre los valores de salida, los correspondientes a las cantidades a producir de cada producto final, los valores de inventario y las cantidades de materias primas y componentes que se esperan recibir en la primera mitad del subhorizonte de planificación siguiente, actúan como parámetros de entrada en la siguiente ejecución del modelo, tal y como se indica en la Figura V-9. Para tal efecto se definen las tablas  $Z\_MRPIV_x\_P$ ,  $Z\_MRPIV_x\_INVTP$ ,  $Z\_MRPIV_x\_INVTC$ ,  $Z\_MRPIV_x\_LQRF$  y  $Z\_MRPIV_x\_LQRD$ , donde  $x$  se corresponde con el número de la iteración según el esquema de horizonte rodante definido anteriormente. Las tablas  $Z\_MRPIV_x\_RD$ ,  $Z\_MRPIV_x\_TEX$  y  $Z\_MRPIV_x\_X$  almacenan los valores de las variables de decisión correspondientes a las cantidades de demanda retrasada, tiempo extra empleado y a la definición de las rutas de paso por los proveedores. La Figura V-10 muestra la estructura de las tablas utilizadas. Asimismo, pueden definirse tablas adicionales que almacenen los valores de salida de cada una de las variables de decisión utilizadas en el modelo

con el objetivo de facilitar el análisis posteriores a la ejecución. Las relaciones entre las distintas variables de decisión y las tablas correspondientes se muestran en la Tabla V-8.

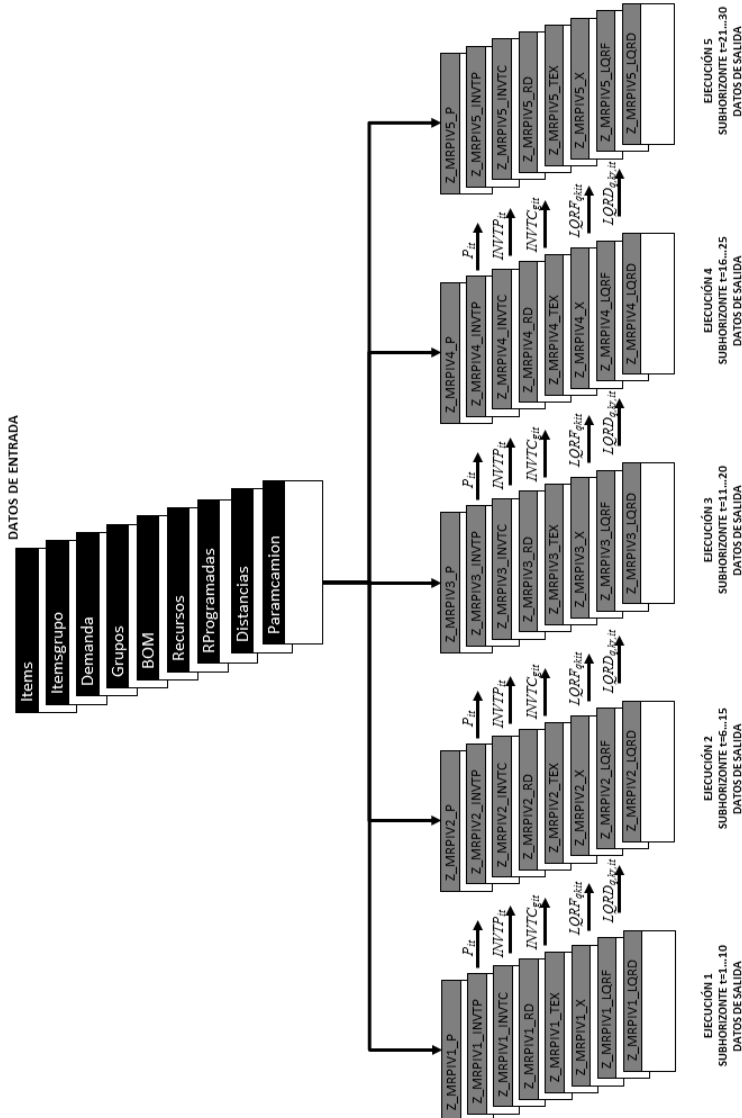


Figura V-9. Relación entre tablas de datos de entrada y de salida para la ejecución de MRP IV

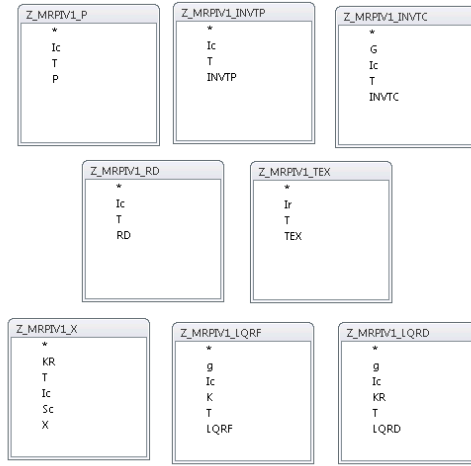


Figura V-10. Tablas empleadas para el almacenamiento de datos de entrada de los modelos

Tabla V-8. Relación entre tablas y datos de salida de los modelos

Variable	Tabla base de datos	Variable	Tabla base de datos
$P_{it}$	Z_MRPV1x_P	$Toc_{rt}$	Z_MRPV1x_TOC
$INVTP_{it}$	Z_MRPV1x_INVTP	$Tex_{rt}$	Z_MRPV1x_TEX
$INVTC_{qit}$	Z_MRPV1x_INVTC	$Y_{ikt}$	Z_MRPV1x_Completos
$Rd_{it}$	Z_MRPV1x_RD	$YRD_{kr,it}$	Z_MRPV1x_YRD
$QRF_{qikt}$	Z_MRPV1x_LQRF	$TRF_{ikt}$	Z_MRPV1x_TRF
$QRD_{qi,kr,t}$	Z_MRPV1x_LQRD	$TRD_{i,kr,t}$	Z_MRPV1x_TRD

Las variables  $QRF_{qikt}$  y  $QRD_{qi,kr,t}$  se almacenan en las tablas correspondientes deca-  
 ladas en el tiempo  $ts_i$  periodos con el objetivo de expresar el instante de llegada a la  
 planta de las cantidades a pedir y transportar.

Por otro lado, en el caso de los experimentos relacionados con el enfoque secuencial  
 sin integración, las tablas utilizadas en la base de datos presentan estructuras  
 similares a las utilizadas según el enfoque integrado, por lo que no se detallan en el  
 presente apartado.



## 4.6 Evaluación de los resultados

Se han medido y evaluado los siguientes aspectos tanto del modelo MRP IV con enfoque integrado de planificación de la producción y el transporte, como para el enfoque secuencial sin integración correspondiente a los modelos descritos en el apartado 4.4.2, apartado 4.4.3 y apartado 4.4.4, ejecutados según se detalla en la Figura V-7. Tanto para el enfoque integrado, como para el secuencial, el mecanismo de cálculo se basa en la heurística de horizonte rodante expuesta en la Figura V-5 y Figura V-6.

La evaluación de resultados se centra en los siguientes aspectos:

1. La eficiencia computacional.
2. Costes de planificación.
3. Total de distancia recorrida.
4. Distancia recorrida por camión.
5. Número de camiones utilizados.
6. Ocupación media de los camiones utilizados.
7. Costes de transporte por unidad de producto final fabricado.

### 4.6.1 Eficiencia computacional

Para comprobar la eficiencia computacional de los modelos propuestos, se han ejecutado cada uno de los mismos para el subhorizonte de planificación correspondiente hasta llegar al final del horizonte de 30 periodos.

Los resultados de estos lanzamientos generan unos ficheros de solución que se muestran en el Anexo III de esta tesis. Estos ficheros de solución proporcionan:

- Información del sistema: incluye diversas estadísticas del sistema y del problema: nombre del fichero, fecha y hora de ejecución, y el tiempo utilizado para el análisis del problema (*parsing time*).
- Información del solucionador: incluye diversas estadísticas sobre el proceso de optimización: nombre del solucionador usado, valor de la función objetivo, número de iteraciones, número de nodos para problemas de programación entera y el tiempo utilizado en el proceso de optimización (*solution time*).
- Información del modelo: incluye diversas estadísticas sobre el modelo: nombre del problema, número de restricciones, número de variables, número

ro de elementos no cero, densidad de la matriz y el número de variables enteras para problemas de programación entera.

- Información de la solución: incluye diversas estadísticas sobre el resultado de la solución: estado de la solución obtenida por el solucionador, el sentido, nombre y valor de la función objetivo.
- Valores de las Variables (*Activity*): incluye los valores de cada variable.
- Coste de Oportunidad (*Reduced Cost*): incluye los costes de oportunidad de cada variable.
- Valores de Holgura (*Slack Values*): incluye los valores de holgura/exceso de cada restricción.

Se analizan en este apartado los aspectos dados por el fichero de solución relacionados con la eficiencia computacional de los modelos, la información referente a la solución del problema se trata en los apartados siguientes.

La Tabla V-9 resume el esfuerzo computacional de cada uno de los modelos, tanto para el enfoque integrado como para el secuencial sin integración, para cada una de las ejecuciones. La columna *iteraciones* indica el número de iteraciones necesarias para alcanzar la solución óptima. También aparece el número de *variables*, variables enteras (*enteros*), *restricciones* y los *elementos no cero* de la matriz de restricciones que contiene el modelo, conjuntamente con la *densidad de la matriz*. Asimismo, se incluye tanto el tiempo de análisis (*parsing time*) como el tiempo de resolución (*solution time*) en segundos. Por último, se muestra el *gap* obtenido en la ejecución de cada modelo, obtenido como el porcentaje de desviación entre la solución obtenida y la mejor solución posible o límite inferior obtenido por el solucionador.

	Modelo	Iteraciones	Variables	Enteros	Restricciones	Elemento no cero	Densidad matriz (%)	Tiempo análisis (segundos)	Tiempo CPU (segundos)	Gap	
Enfoque iterativo	Ejec.1	MRPiv_1	155756	228670	69490	1534843	5451788	0.0016%	117.00	276.00	0.8809%
	Ejec.2	MRPiv_2	670035	228670	69490	1534858	5449853	0.0016%	116.00	901.00	1.0176%
	Ejec.3	MRPiv_3	722145	228670	69490	1534858	5449853	0.0016%	122.00	901.00	1.1328%
	Ejec.4	MRPiv_4	420210	228670	69490	1534858	5449853	0.0016%	120.00	901.00	1.1552%
	Ejec.5	MRPiv_5	374876	228670	69490	1534858	5449853	0.0016%	116.00	901.00	1.1011%
Enfoque secuencial	Ejec. 1	MRPDet1	728	2000	90	2109	4551	0.1800%	0.28	0.06	0.6532%
		FTL1	1424	126010	37030	74360	263310	0.0030%	1.65	5.96	0.4357%
	Ejec. 2	Rutas1	1501273	200975	72730	290290	1903640	0.0030%	80.00	901.00	5.3892%
		<b>TOTAL</b>	1503425	328985	109850	366759	2171501		81.93	907.02	
	Enfoque iterativo	Ejec.1	MRPDet2	32	2000	90	2109	4656	0.1100%	1.97	0.19
Ejec. 2		FTL2	1511	126010	37000	74360	263310	0.0030%	1.33	5.15	0.3094%
Ejec. 3		Rutas2	1096596	200975	72730	290290	1903640	0.0030%	89.00	900.00	5.9578%
		<b>TOTAL</b>	1098139	328985	109820	366759	2171606		92.30	905.34	
Enfoque secuencial		Ejec.1	MRPDet3	22	2000	90	2109	4656	0.1100%	0.66	0.05
	Ejec. 2	FTL3	1395	126010	37000	74360	263310	0.0030%	0.83	5.91	0.3501%
	Ejec. 3	Rutas3	1195270	200975	72730	290290	1903640	0.0030%	83.00	900.00	7.9671%
		<b>TOTAL</b>	1196687	328985	109820	366759	2171606		84.49	905.96	
	Enfoque iterativo	Ejec.1	MRPDet4	28	2000	90	2109	4656	0.1100%	0.61	0.01
Ejec. 2		FTL4	1230	126010	37000	74360	263310	0.0030%	1.62	7.11	0.3826%
Ejec. 3		Rutas4	1779764	200975	72730	290290	1903640	0.0030%	85.00	901.00	5.0991%
		<b>TOTAL</b>	1781022	328985	109820	366759	2171606		87.23	908.12	
Enfoque secuencial		Ejec.1	MRPDet5	30	2000	90	2109	4656	0.1100%	0.66	0.05
	Ejec. 2	FTL5	1372	126010	37000	74360	263310	0.0030%	1.32	6.31	0.6541%
	Ejec. 3	Rutas5	1135056	200975	72730	290290	1903640	0.0030%	82.00	900.00	6.4462%
		<b>TOTAL</b>	1136458	328985	109820	366759	2171606		83.98	906.36	

Tabla V-9. Eficiencia de los experimentos computacionales

Los resultados relativos al esfuerzo computacional de los modelos se han obtenido fijando un límite superior de tiempo de CPU para la resolución de 15 minutos (900 segundos), y un criterio de parada para un gap del 1%, de forma que alcanzado cualquiera de estos dos criterios el proceso de solución se detiene. Dado que los

modelos evaluados presentan la misma estructura y datos de entrada de idénticas dimensiones para cada una de las ejecuciones, los valores asociados al tamaño de cada uno de los modelos (variables, enteros y restricciones) son iguales para cada una de ellas. Sin embargo, los valores directamente relacionados con el proceso de solución y el esfuerzo computacional necesario, tales como el número de iteraciones, el tiempo de análisis y el tiempo de CPU, pueden presentar valores diferenciados, excepto cuando el modelo llega al límite de los 900 segundos en el proceso de solución.

En las celdas sombreadas en gris, se muestra la suma de los diferentes valores correspondientes a los modelos utilizados en el enfoque de solución secuencial sin integración. Como puede observarse, este último enfoque presenta valores totales significativamente superiores al modelo integrado MRP IV en lo relativo al número de variables y variables enteras, debido a la duplicidad de variables entre cada uno de los modelos. Por el contrario, el número de restricciones y elementos no cero es considerablemente superior en el enfoque integrado debido a la consideración simultánea de restricciones de inventarios, producción y transporte. Este hecho viene confirmado por un mayor tiempo de análisis necesario como etapa previa a la resolución. En general, los tiempos de CPU son similares para ambos enfoques, ya que los modelos MRPDet y de camión completo se resuelven fácilmente (0,19 segundos y 7,11 segundos, respectivamente), mientras que los modelos de rutas necesitan un tiempo de resolución de 900 segundos en todos los casos, debido a su carácter altamente combinatorio. Esto, a su vez, explica el elevado número de iteraciones necesarias para su resolución, según se observa en la columna correspondiente, y que están un orden de magnitud por encima del número de iteraciones necesarias para la resolución de los modelos integrados. Asimismo, la desviación del resultado obtenido respecto a la cota inferior del problema, también es superior en los modelos de rutas, llegando a un gap máximo de 7,9671% en la tercera ejecución y que, por tanto, determina la optimalidad de la solución global del enfoque secuencial, frente al gap máximo de 1,1552% del modelo integrado MRP IV obtenido en la cuarta ejecución. El mayor número de restricciones del modelo integrado hace que el universo de soluciones sea más reducido y, por lo tanto, el proceso de resolución sea más eficaz para hallar una solución más próxima al óptimo en el mismo tiempo de CPU. El tiempo total de CPU necesario para resolver el problema de planificación de la producción y transporte es de 3880 segundos (65 minutos) para el enfoque integrado, mientras que el enfoque secuencial emplea un total de 4532 segundos (76 minutos). Sin embargo, cabe destacar que a pesar de que estos tiempos de cálculo puedan parecer excesivos, este tipo de problemas tácticos no se ejecutan cada día y, por lo tanto, son tiempos de resolución admisibles (Boudia y Prins, 2009).

#### 4.6.2 Costes de planificación

La Tabla V-10 muestra los costes asociados a la planificación de la producción y el transporte realizada según los enfoques secuencial e integrado mediante el modelo MRP IV, calculados para 30 periodos, según el mecanismo de horizonte rodante expuesto en el apartado 4.3. El procedimiento de cálculo de costes se ilustra en la Figura V-11. Así pues, para el cómputo de los costes totales se consideran los costes de producción, inventario y tiempo extra para las primeras mitades de los subhorizontes de planificación en cada ejecución (excepto en la ejecución 5 en la que se consideran dichos costes para todos los periodos) y los costes de compra de materias primas y componentes y costes de transporte para la totalidad de periodos de cada una de las ejecuciones de los modelos. Para evaluar el ahorro relativo del enfoque integrado respecto del enfoque secuencial se emplea la siguiente fórmula propuesta por Kuhn y Liske (2011):

$$Ahorro = \frac{Coste_{secuencial} - Coste_{integrado}}{Coste_{secuencial}} \cdot 100\% \quad (V-60)$$

Los ahorros correspondientes a cada uno de los costes considerados se muestran en la Tabla V-10, tanto en cifras absolutas como en valores porcentuales, según la fórmula indicada en la ecuación V-60. Como puede observarse, el ahorro más significativo en cifras absolutas se corresponde con los costes de transporte, seguido de los costes de tiempo extra, mientras que los costes de inventario empeoran ligeramente, debido a que el enfoque secuencial ajusta exactamente los niveles de inventario a los inventarios de seguridad establecidos, debido a que las cantidades a pedir calculadas por el modelo MRPDet no son modificadas en la fase de planificación de transporte. En consecuencia, el aprovechamiento de los recursos de transporte empeora y, por lo tanto, son necesarios más camiones para el transporte de las cantidades solicitadas. Asimismo, el comportamiento típico de un modelo MRP, en el que se solicitan las cantidades a los proveedores en el último periodo posible necesario para proceder a la fabricación de los productos finales, hace que se puedan necesitar horas de tiempo extra de fabricación si existe una demanda superior a la capacidad de producción en dicho periodo. En este caso, esa es la razón por la cual los costes de producción en tiempo extra son superiores en el modelo secuencial que en el modelo integrado, el cual posibilita el adelanto de fabricación de producto final a periodos con menor nivel de demanda y, por lo tanto, la capacidad de fabricación disponible. Por otro lado, los costes de producción y de compra de materias primas permanecen invariables. Esto se debe a que son costes irrenunciables para el cumplimiento de la demanda tanto para el enfoque secuencial como para el integrado y,

por lo tanto, podrían considerarse como costes fijos para tal fin en el horizonte de planificación considerado. En este sentido, y considerando el carácter fijo de los costes de producción y de materia prima, se sugiere que el ahorro relativo obtenido por el enfoque integrado debería calcularse excluyendo estos costes del total, de forma análoga a los costes considerados en Chandra y Fisher (1994), Bard y Nananukul (2009), Bard y Nananukul (2010), Boudia y Prins (2009) y Kuhn y Liske (2011), entre otros, en cuyos modelos tan sólo aparecen costes variables en sus funciones objetivo. En este sentido, el ahorro relativo del modelo integrado respecto del enfoque secuencial, calculado excluyendo los costes fijos, es de un 15.45%, siendo de un 2.84% sin excluirlos. A pesar de todo, la cifra de ahorro absoluto es de más de un millón de euros, por lo que puede considerarse un ahorro significativo, especialmente en sucesivos periodos a lo largo de un año. Asimismo, el enfoque integrado al menos garantiza los resultados obtenidos por el enfoque secuencial, y por lo tanto, nunca incrementará los resultados respecto al primero tal y como se ha mostrado en Kuhn y Liske (2011).

**Tabla V-10.** Comparación de costes entre enfoque integrado y secuencial y ahorros correspondientes

	<b>Enfoque integrado MRP IV</b>	<b>Enfoque Secuencial</b>	<b>Ahorro (€)</b>	<b>Ahorro (%)</b>
Coste total producción	3.092.089 €	3.092.089 €	0 €	0.00%
Coste total compra materias primas	26.670.720 €	26.670.720 €	0 €	0.00%
Coste total tiempo extra	95.966 €	155.623 €	59.657 €	38,33%
Coste total inventario	1.957.386 €	1.908.635 €	-48.751 €	-2,55%
Coste total transporte	3.586.108 €	4.609.722 €	1.023.614 €	22,14%
<b>TOTAL</b>	<b>35.402.268 €</b>	<b>36.436.788 €</b>	<b>1.034.520 €</b>	<b>15,45%*</b>

\*excluyendo los costes fijos (producción y compra de materias primas)

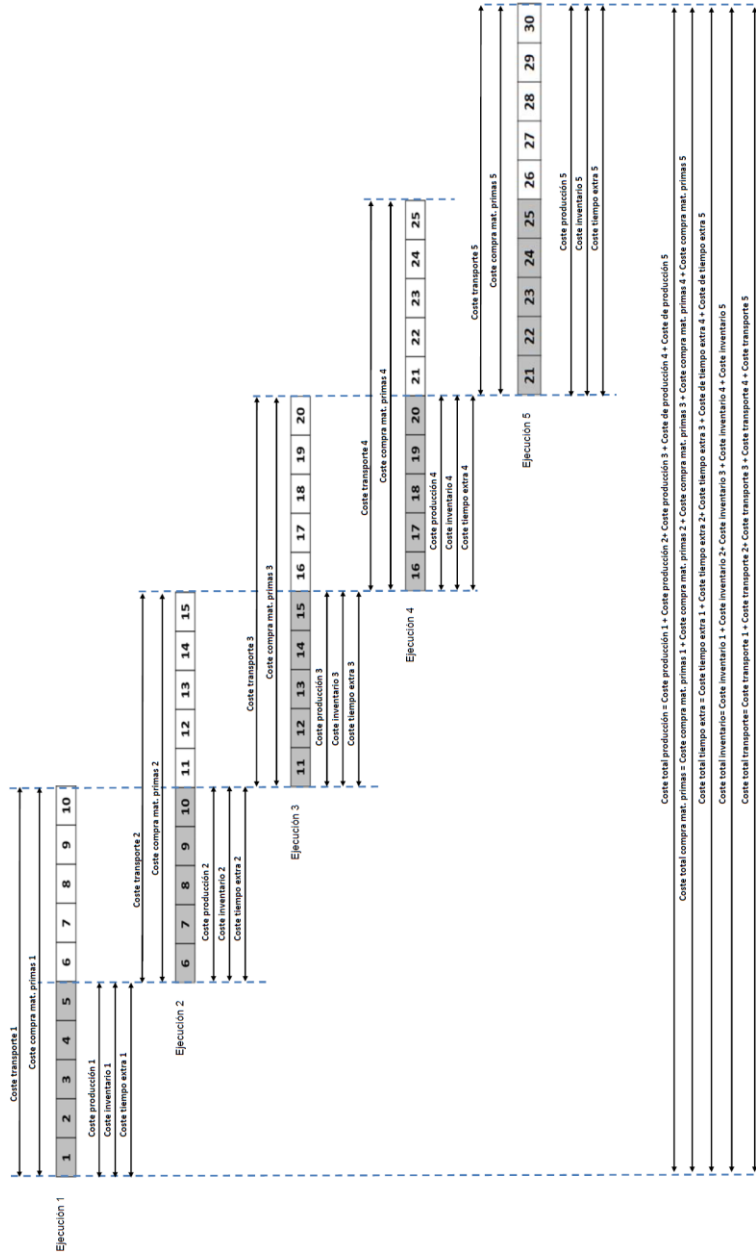


Figura V-11. Procedimiento de cálculo de costes para el horizonte de planificación de 30 periodos

### 4.6.3 Indicadores relativos a la planificación del transporte

La Tabla V-11 muestra los valores relativos a los indicadores de planificación del transporte obtenidos mediante el uso del enfoque integrado MRP IV, y a través del enfoque secuencial sin integración. Estos indicadores se describen en el apartado 3.3 de este capítulo y se definen teniendo en cuenta los medibles empleados en la empresa de montaje de asientos para valorar su planificación de transporte.

**Tabla V-11.** Comparación de indicadores de transporte entre enfoque integrado y enfoque secuencial

	Enfoque integrado MRP IV	Enfoque Secuencial	Mejora (%)
Total de kilómetros recorridos	960.154	1.254.754	23.48%
Kilómetros recorridos por camión	925,00	969,67	4.61%
Número de camiones completos	1.020	1.236	17.48%
Número de camiones rutas	18	58	68.97%
Ocupación media de camiones completos	94,54%	75,14%	19.40%
Ocupación media de camiones rutas	99,89%	92,20%	7.69%
Coste de transporte por unidad de producto final	97,57 €	125,31 €	22.14%

Como puede observarse en la Tabla V-11, los indicadores ofrecidos por el enfoque integrado mejoran notablemente el enfoque secuencial. En primer lugar, el total de kilómetros recorridos se reduce casi en trescientos mil kilómetros, lo que equivale a un 23.48%. Esto se debe, fundamentalmente, a la reducción del número de camiones utilizados en el enfoque integrado respecto al enfoque secuencial, de forma que la suma de las distancias recorridas por cada uno de éstos disminuye. Sin embargo, la media de kilómetros recorridos por camión, a pesar de ser también más favorable en el caso del enfoque integrado, no obtiene una mejora porcentual tan sustancial como el indicador de total de distancia recorrida. En este caso, la mejora es de 44,67 kilómetros por camión, lo que equivale a un 4.61%. Esta reducción porcentual se debe a la reducción en el número de camiones utilizados por el enfoque integrado respecto al enfoque secuencial. Concretamente, el enfoque integrado utiliza 216 camiones completos y 30 camiones de rutas menos que el enfoque secuencial sin integración para el total de los 30 periodos considerados en el horizonte de planificación. La proporción de camiones completos respecto a camiones de rutas es ligeramente superior en el enfoque integrado que en el enfoque secuencial, ya que la posibilidad de planificar la producción, el inventario y el transporte de forma simultánea permite aprovechar las ventajas en costes que ofrece el envío mediante



camiones completos respecto a los envíos por rutas. Asimismo, la ocupación de los camiones completos mejora, significativamente, en el caso del enfoque integrado respecto al secuencial, obteniendo una ocupación media cercana al 95% de la capacidad que ofrecen los camiones, por un 75.14% que obtiene el enfoque secuencial. Las ventajas de la planificación integrada también se reflejan en los valores de ocupación obtenidos para los camiones de rutas, llegando a un 99.89% de la capacidad disponible por un 92.20% del enfoque secuencial. En definitiva, el enfoque integrado obtiene mejores resultados respecto al enfoque secuencial sin integración en distancia total recorrida, en distancia promedio recorrida por vehículo, en número de camiones utilizados y en ocupación de los mismos. Todo ello se refleja en una mejora de los costes de transporte totales, según se ha indicado en el apartado 4.6.2. A su vez, esto implica una reducción en el coste de transporte unitario a incurrir en cada unidad de producto final fabricado. Este indicador se obtiene dividiendo el total de los costes de transporte obtenidos por el total de unidades fabricadas en el horizonte de planificación. En este caso, la reducción es de 27,14€ lo que supone una mejora de un 22.14%.

## **5. Conclusiones**

Este capítulo ha evaluado el modelo matemático propuesto en esta tesis para la planificación integrada de la producción y el transporte de aprovisionamiento respecto a tres modelos de programación matemática que reproducen un enfoque de planificación secuencial sin integración. Los modelos se han aplicado en una empresa del sector del automóvil dedicada al montaje de asientos para automóviles.

Para la comparación de los modelos considerados se ha establecido un método de evaluación basado en un conjunto de parámetros medibles tales como la eficiencia computacional, los costes de planificación e indicadores relativos a la planificación del transporte, tales como: distancia total recorrida, promedio de distancia recorrida por camión, número total de camiones utilizados, ocupación media de los camiones utilizados por modo de envío y costes de transporte por unidad de producto final fabricado.

De forma general, el enfoque de planificación integrado ha sido capaz de incrementar la satisfacción de conjunto sin ocasionar un crecimiento explosivo del esfuerzo computacional. Presentadas las conclusiones del estudio a la empresa, los planificadores han manifestado su interés en el nuevo modelo integrado ya que, además de obtener una planificación más favorable, ofrece la posibilidad de tener consolidada toda la información de producción, inventario y transporte en la misma base de datos. Asimismo, otra mejora muy valorada ha sido la posibilidad de automatizar los cálculos sin necesidad de utilizar sistemas diferentes de información diferentes, ni trasladar información desde el ERP a hojas de cálculo con el consiguiente riesgo

de pérdida de información. Adicionalmente, el personal de planificación dedicado a estas tareas en la actualidad podría destinarse a la evaluación y el análisis de las soluciones obtenidas o bien trasladarse a otros departamentos y reasignarse a otras funciones dentro de la empresa.

Hay que reconocer que la experiencia computacional ha sido positiva en tanto en cuanto ha permitido ir depurando aspectos que se habían definido, y al intentar validarlos se han encontrado dificultades que han conducido a un replanteamiento o ajuste de los modelos propuestos (aunque siempre bajo la perspectiva de que no se trataba de resolver una situación puntual, sino de desarrollar un marco de trabajo general).

Como conclusión de esta investigación, se derivan los siguientes méritos del modelo MRP IV:

- El modelo MRP IV, a pesar su carácter combinatorio, y para el problema utilizado para su validación, ofrece una solución de calidad significativa (considerando su desviación respecto a la cota inferior del problema o *gap*), en un tiempo admisible para este tipo de problemas de planificación.
- El enfoque integrado de solución del modelo MRP IV obtiene un total de costes de planificación menor que el enfoque secuencial sin integración, mejorando especialmente en cuanto a costes de producción en tiempo extra y costes de transporte. Esto se debe a que el enfoque integrado ofrece un mejor aprovechamiento de las capacidades existentes (tiempo de producción y camiones disponibles) ya que ajusta las mismas a lo largo del horizonte de planificación, reduciendo el número de horas extras empleadas y aumentando la ocupación de los camiones utilizados para el transporte.
- La reducción del número de camiones utilizados, así como de la distancia recorrida, implica una tasa menor de emisiones de CO<sub>2</sub> y del resto de gases y partículas asociadas al uso de motores de combustión, con el consiguiente beneficio ecológico.
- La gestión de vehículos en los muelles de descarga y entrada de materias primas y componentes puede facilitarse debido a la reducción del número de camiones necesarios para efectuar el aprovisionamiento.
- Permite evitar planificaciones realizadas en hojas de cálculo, resultados subóptimos debidos a replanificaciones manuales y basados en juicios personales y la experiencia de los planificadores en la empresa de montaje de asientos.

A pesar del conjunto de ventajas asociadas, es necesario señalar algunas de las limitaciones del modelo MRP IV:

- En el caso de problemas con un mayor número de proveedores y mayor número de productos y componentes, debido a la existencia de multitud de variables enteras y binarias, podría resultar necesario el uso de metaheurísticas que faciliten la obtención de soluciones en tiempos aceptables.
- La definición de tiempos de tránsito entre nodos y tiempos de suministro mediante múltiplos enteros del periodo de planificación básico como medida para garantizar su modelado y resolución mediante programación matemática puede introducir ciertas inexactitudes en los resultados. En este sentido, la expresión de estos tiempos en otras unidades de tiempo inferiores, como horas o minutos, podría dar lugar a planificaciones mucho más ajustadas con el riesgo de un mayor esfuerzo computacional necesario.
- Según el entorno de aplicación en la empresa de montaje de asientos, sólo se ha considerado la limitación de capacidad de producción. Sin embargo, otras limitaciones, como por ejemplo, la disponibilidad de camiones o del espacio en el almacén resultarían interesantes de incorporar al modelo MRP IV para su comparación con el enfoque secuencial en el contexto descrito.
- La asignación de proveedores al tipo de transporte considerado se determina previamente a la ejecución del modelo, según la planificación a medio plazo utilizada en la empresa. Sin embargo, la posibilidad de asignar dinámicamente el modo de transporte a cada proveedor en cada ejecución del modelo, en función de la cantidad de materias primas y componentes a transportar, no ha sido considerada.

## 6. Referencias

- Agra, A., Christiansen, M., Delgado, A., Simonetti, L. (2014). Hybrid heuristics for a short sea inventory routing problem. *European Journal of Operational Research*, 236, 924–935.
- Baker, K. R. (1977). an Experimental Study of the Effectiveness of Rolling Schedules in Production Planning. *Decision Sciences*, 8, 19–27.

- Bard, J. F., Nananukul, N. (2009). The integrated production-inventory-distribution-routing problem. *Journal of Scheduling*, 12(3), 257–280.
- Bard, J. F., Nananukul, N. (2010). A branch-and-price algorithm for an integrated production and inventory routing problem. *Computers and Operations Research*, 37(12), 2202–2217.
- Boudia, M., Prins, C. (2009). A memetic algorithm with dynamic population management for an integrated production-distribution problem. *European Journal of Operational Research*, 195(3), 703–715.
- Chandra, P., Fisher, M. L. (1994). Coordination of production and distribution planning. *European Journal of Operational Research*, 72(3), 503–517. b
- Desaulniers, G. (2007). Managing large fixed costs in vehicle routing and crew scheduling problems solved by column generation. *Computers & Operations Research*, 34(4), 1221–1239.
- Díaz-Madroño, M., Peidro, D., Mula, J. (2012). Planificación operativa del transporte en una cadena de suministro mediante un enfoque interactivo de programación lineal fuzzy multiobjetivo. *Dirección Y Organización*, (46), 31–44.
- Fumero, F., Vercellis, C. (1994). Capacity analysis in repetitive assemble-to-order manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*.
- Google. (2014). *API de Google Maps — Google Developers*.  
<https://developers.google.com/maps/?hl=es>
- Gurobi Optimization Incorporation. (2014). Gurobi 5.6.2.
- Kuhn, H., Liske, T. (2011). Simultaneous supply and production planning. *International Journal of Production Research*, 49(13), 3795–3813.
- Maximal Software Incorporation. (2014). MPL Modeling System Release 4.2n.
- Mohammadi, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., Karimi, B., Torabi, S. A. (2010). Rolling-horizon and fix-and-relax heuristics for the multi-product multi-level capacitated lotsizing problem with sequence-dependent setups. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21, 501–510.
- Mula, J., Campuzano-Bolarin, F., Díaz-Madroño, M., Carpio, K. M. (2013). A system dynamics model for the supply chain procurement transport problem: comparing

- spreadsheets, fuzzy programming and simulation approaches. *International Journal of Production Research*, 51(13), 4087–4104.
- Mula, J., Poler, R., García, J. P. (2006). MRP with flexible constraints: A fuzzy mathematical programming approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(1), 74–97.
- Mula, J., Poler, R., García, J. P., Ortiz, A. (2003). Supply planning and demand behaviour in an automobile industry supply chain. In *International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'03), Porto (Portugal)*.
- Peidro, D., Díaz-Madroñero, M., Mula, J. (2010). An interactive fuzzy multi-objective approach for operational transport planning in an automobile supply chain. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 7(2), 283–294.
- Penna, P. H. V., Subramanian, A., Ochi, L. S. (2013). An Iterated Local Search heuristic for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem. *Journal of Heuristics*, 19(2), 201–232.
- Pérez Perales, D., Lario Esteban, F. C., García Sabater, J. P. (2002). La Planificación - Programación de la Producción en el Contexto de S-Files, en el Sector del Automóvil. *II Congreso de Ingeniería de La Organización: Vigo, 5 Y 6 de Septiembre de 2002*.
- Rakke, J. G., Stålhane, M., Moe, C. R., Christiansen, M., Andersson, H., Fagerholt, K., Norstad, I. (2011). A rolling horizon heuristic for creating a liquefied natural gas annual delivery program. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19, 896–911.
- Ramezani, R., Saidi-Mehrabad, M., Fattahi, P. (2013). MIP formulation and heuristics for multi-stage capacitated lot-sizing and scheduling problem with availability constraints. *Journal of Manufacturing Systems*, 32, 392–401.

CAPÍTULO VI  
**CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**



---

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

---

1. Introducción.....	VI-2
2. Líneas futuras de investigación.....	VI-4
3. Referencias.....	VI-8



## 1. Introducción

En esta tesis doctoral se ha abordado la problemática de la planificación integrada de la producción y el transporte de aprovisionamiento en un entorno de producción MRP. Con el objetivo de dar solución a este problema se ha propuesto un modelo de programación matemática multi-producto, multi-periodo, con restricciones de capacidad productiva y que considera diferentes modos de transporte desde los proveedores de materias primas y componentes hasta la planta de producción.

En primer lugar, en el capítulo 2, se ha desarrollado una revisión bibliográfica sobre modelos de planificación de la producción de tiempo discreto a nivel táctico (Díaz-Madroñero et al., 2014). Para analizar los 250 artículos seleccionados se ha propuesto una taxonomía basada en los siguientes aspectos: tipo de problema, objetivo, número de productos, tipo de periodo de tiempo, naturaleza de la demanda, restricciones de capacidad, extensiones, enfoque de modelado, enfoque de solución, herramienta de desarrollo, aplicación, limitaciones y ventajas. Tras el proceso de análisis puede concluirse que, a pesar de que los sistemas de producción MRP están ampliamente extendidos en la industria y en contribuciones científicas previas, entre los artículos seleccionados existen pocos trabajos centrados en éstos. Entre ellos, la mayoría que consideran la existencia de materias primas y componentes se centran en el desarrollo de algoritmos de resolución eficientes para extensiones típicas de modelos básicos de *lot-sizing*, tales como demanda diferida, *setups*, etc, a pesar de que presentan notables limitaciones, especialmente, para reproducir entornos de fabricación realistas. Asimismo, la mayoría de las propuestas analizadas sólo han sido contrastadas con datos generados artificialmente, siendo menos frecuente la validación con datos reales de empresas industriales, y mucho más minoritaria la implementación e incorporación de los modelos propuestos en los sistemas de planificación de estas empresas. Este hecho confirma la lejanía entre el mundo de la investigación académica y la industria y se fundamenta, principalmente, en la dificultad de aplicar modelos y enfoques de solución avanzados basados en investigación operativa y lenguajes de programación en pymes. Por otro lado, la no consideración de la importancia del transporte relacionada con el cumplimiento de los planes de producción en las cadenas de suministro actuales, caracterizadas por la deslocalización de proveedores (Pavlínek, 2012), ha sido detectada como una de las limitaciones principales de los artículos revisados. En este sentido, el desarrollo de este capítulo ha servido para confirmar la necesidad de modelos de planificación de la producción y el transporte de aprovisionamiento que consideren diferentes tipos de modos de transporte, tales como camión completo, rutas y rutas repetitivas o *milk-run*, tal y como ya se apuntó en Mula et al. (2010).

En el capítulo 3 se ha profundizado en el problema de la planificación integrada de la producción y las rutas de transporte mediante una revisión bibliográfica adicional. A pesar de que existen numerosas revisiones bibliográficas en el ámbito de la

planificación simultánea de la producción y el transporte, la mayoría de ellas simplifican el modelo de transporte y sólo considera los envíos directos o cargas de camión completo como estrategia de transporte ignorando el modo de distribución basado en rutas. En este capítulo se propone una taxonomía de clasificación basada en los siguientes criterios: aspectos de producción, aspectos de inventario, aspectos de rutas de transporte, aspectos del modelado de la estructura función objetivo y enfoque de solución. Tras el proceso de revisión, destaca que las contribuciones analizadas presentan modelos mono-objetivo y con características de producción y transporte de carácter simplista. En este sentido, las validaciones en entornos industriales reales no son comunes ya que los autores se centran, principalmente, en el desarrollo de métodos de solución eficientes que se validan con datos generados artificialmente. Asimismo, la consideración de la incertidumbre y de aspectos medioambientales y de sostenibilidad también podrían destacar por su posible impacto en entornos reales de aplicación industrial. Como limitación principal de los modelos analizados, al igual que en el capítulo anterior, puede confirmarse la necesidad de modelos que integren diferentes modos de transporte, tanto para corta como para larga distancia, y que se centren en la planificación del transporte de aprovisionamiento y su sincronización con los procesos de producción, siendo éste el objetivo principal de esta tesis doctoral.

En el capítulo 4 se ha propuesto un modelo denominado MRP IV que ha tratado de ser lo más genérico posible para tratar de resolver el problema de la planificación integrada de la producción y el transporte de aprovisionamiento en un entorno de fabricación multi-producto, multiperíodo y con restricciones de capacidad. Los tipos de envío considerados corresponden con el transporte mediante camiones completos o *full-truckload*, rutas o envíos *less-than-truckload* y rutas repetitivas *milk-run*. Adicionalmente, en el capítulo 4 se presentan diferentes modelos que han servido como referentes para el desarrollo de MRP IV, así como la descripción de la problemática abordada, identificando posibles entradas, salidas, enfoques de modelado y de solución, reflejada en un modelo conceptual (Díaz-Madroño et al., 2012).

Finalmente, en la presente tesis se ha pretendido mostrar la aplicación del modelo propuesto en un caso real. El capítulo 5 presenta la aplicación del modelo MRP IV en un entorno de fabricación real perteneciente al sector del automóvil. En primer lugar, se presenta una breve descripción de la cadena de suministro de estudio centrada en las características de la planta de montaje de asientos y sus proveedores correspondientes, así como de los procesos de planificación de la producción y el transporte llevados a cabo en ésta. En el capítulo 5 se ha establecido un método de evaluación basado en la eficiencia computacional, costes totales de planificación y diferentes indicadores relativos a la planificación del transporte. Este método de evaluación se ha aplicado en la comparación de

la planificación obtenida por MRP IV de forma integrada respecto a la planificación obtenida de forma secuencial sin ningún tipo de integración, de forma similar a la propuesta de Kuhn y Liske (2011). De forma general, el enfoque de planificación integrado ha sido capaz de incrementar la satisfacción de conjunto sin ocasionar un crecimiento explosivo del esfuerzo computacional. Asimismo, se obtiene una planificación con costes totales más reducidos y ofrece la posibilidad de tener consolidada toda la información de producción, inventario y transporte en la misma base de datos.

La experiencia computacional de los modelos propuestos demuestra la utilidad, que ha sido percibida por la empresa objeto de la aplicación, para modelar y resolver los problemas de planificación integrada de la producción y el transporte de aprovisionamiento de forma automática, sin necesidad de recurrir a la experiencia y juicios personales de los planificadores, con el consiguiente cambio organizacional.

El modelo propuesto podría utilizarse en las empresas de dos formas:

- como el núcleo de un nuevo y más apropiado sistema MRP para planificar la producción de una empresa industrial en un entorno de toma de decisiones con múltiples proveedores situados en la proximidad o deslocalizados en otros países.
- como un banco de pruebas para comparar las soluciones obtenidas por el modelo de optimización propuesto con las soluciones dadas por los sistemas de planificación de la producción y el transporte integrados en los ERP comerciales utilizados por las empresas, como SAP utilizado por la empresa objeto de la aplicación.

El análisis de las circunstancias de producción y de transporte de una empresa del sector del automóvil abre, además, un número importante de líneas de investigación. Éstas están vinculadas de un modo u otro con el problema planteado inicialmente aunque escapan al ámbito, necesariamente reducido de esta tesis. Estas líneas de investigación futuras se presentan en el siguiente apartado.

## **2. Líneas futuras de investigación**

Aparte de las aportaciones realizadas en esta tesis doctoral, se abren nuevas vías de trabajo que pueden representar líneas de investigación en el futuro. En este apartado se realiza una breve descripción de las más importantes.

En una cadena de suministro de la industria del automóvil los planes de producción a medio plazo presentan una variabilidad inevitable (entre un 25% y un 35%) según Mula et al. (2003). Esta inestabilidad puede traducirse en el consiguiente nerviosismo a lo largo de toda la cadena de suministro y la propagación del efecto *bullwhip* aguas arriba. La magnitud de este efecto puede resultar determinante en el rendimiento económico de la cadena de suministro en entornos actuales caracterizados por una demanda de productos diversa, inestable, de bajo volumen y con ciclos de vida cada vez más cortos. En consecuencia, la ampliación del modelo propuesto con aspectos relativos a la personalización en masa de los productos finales fabricados o su concepción como un sistema *demand-driven* puede resultar de interés, así como su aplicación en otros sectores industriales con las mismas características.

En este contexto de inestabilidad de la demanda, el diseño de la red de aprovisionamiento implica decisiones de carácter estratégico que pueden tener un alto impacto en las decisiones relativas a los niveles decisionales táctico y operativo (Crainic y Laporte 1997). En particular, pueden implicar decisiones relativas a la localización de plantas productivas, inventarios y rutas de transporte que pueden afectar al coste total del sistema de producción y transporte, así como a la calidad del servicio al cliente. En este sentido, el modelo propuesto podría ampliarse para considerar decisiones de localización o apertura, teniendo en cuenta las posibles rutas de transporte entre nodos (Escobar et al., 2014; Martínez-Salazar et al., 2014). Asimismo, otra posible línea futura de interés consistiría en diseñar un procedimiento de clusterización de proveedores (Dondo y Cerdá 2007) para rediseñar la red de aprovisionamiento en función de posibles cambios en la demanda, así como de las decisiones de producción, inventario y transporte (Nananukul, 2013).

En el ámbito de la planificación de las rutas de transporte, la mayoría de contribuciones científicas se han centrado tradicionalmente en la resolución de modelos teóricos simplificados. Sin embargo, recientemente el desarrollo de nuevos algoritmos y de las prestaciones de los equipos de computación ha supuesto el estudio de nuevas variantes de modelos de transporte más próximos a problemas reales a pesar de la complejidad asociada. Este nuevo conjunto de problemas se denominan frecuentemente, modelos enriquecidos de planificación de rutas de vehículos o *rich routing problems* (Lahyani et al., 2014; Schmid et al., 2013). En este sentido, el enriquecimiento de la parte relativa a las decisiones de transporte del modelo MRP IV puede considerarse como una línea futura para mejorar su aplicabilidad en entornos reales. Entre las ampliaciones más interesantes podrían destacar: (1) la planificación de rutas limitadas en distancia recorrida o tiempo empleado (*distance constrained o time constrained routing problems*) en función de la legislación vigente en relación al descanso de los conductores y el diseño de rutas con nodos intermedios de parada de descanso entre periodos (Berbotto et al., 2011); (2) la posibilidad de dividir las cantidades a recoger en cada proveedor, de forma que puedan transportarse en diferentes vehículos, en diferentes rutas, y cada proveedor pueda visitarse

por más de un vehículo en cada periodo, al igual que en el *split delivery VRP* (Archetti y Speranza 2012); (3) la inclusión de ventanas de tiempo para las visitas a los proveedores, así como ventanas de tiempo para la descarga en la planta de montaje de forma que se pueda mejorar la operación en los muelles de descarga y entrada de materias primas y componentes; y (4) la consideración de otros modos de transporte como el marítimo o el *cross-docking* (Boysen y Fliedner 2010).

Por otro lado, los aspectos relacionados con la sostenibilidad y la responsabilidad social corporativa se ha convertido en los últimos años en una línea atractiva de investigación con relevante aplicación práctica. La responsabilidad social corporativa se traduce como el impacto de las actividades corporativas sobre distintos grupos incluyendo la protección del entorno y medio ambiente, derechos humanos, seguridad del puesto de trabajo, condiciones adecuadas para los empleados, etc. (Carter y Jennings 2002). La integración de los aspectos de sociales y del entorno junto con las consideraciones económicas han ido ganando relevancia en el ámbito de la gestión de la cadena de suministro (Carter y Rogers 2008; Seuring 2013; Brandenburg et al. 2014) y la gestión de operaciones (Drake y Spinler 2013) y por lo tanto también dentro de la problemática asociada a la planificación de la producción y transporte. Sin embargo, los modelos sostenibles mencionados anteriormente cuando consideran las decisiones de transporte contemplan envíos directos o mediante camión completo obviando el modo de transporte *less-than-load* y por consiguiente la problemática asociada a las rutas de transporte. A pesar de la existencia en la literatura científica de modelos y herramientas para la planificación de rutas de transporte (Lin et al., 2014) y de la producción (Chaabane et al., 2012) teniendo en cuenta criterios medioambientales, no existen contribuciones que integren ambos tipos de decisiones, lo que puede considerarse como una línea de investigación prometedora ya que la responsabilidad social puede convertirse en una fuente de oportunidades, innovación y ventaja competitiva en el entorno actual.

En el proceso de toma de decisiones mediante la aplicación de métodos y modelos matemáticos de optimización en diversos campos de la actividad humana, como por ejemplo un modelo de planificación integrada de la producción y el transporte, no siempre se dispone de toda la información necesaria. Es por ello, que la incertidumbre es uno de los factores principales que influyen en la eficacia de las decisiones que puede tomarse mediante la aplicación de estos modelos. La incertidumbre, tradicionalmente, ha sido tratada empleando técnicas estocásticas basadas en distribuciones de probabilidad derivadas del análisis de casos pasados. Sin embargo, en ocasiones los datos históricos o no existen o no son fiables debido, por ejemplo, a las turbulencias del mercado. Además, la reducción de los ciclos de vida y el aumento de las expectativas de los clientes han hecho a las cadenas de suministro, sobre todo de productos innovadores, muy difíciles de manejar. En este contexto la recopilación de estadísticas (requerida por los modelos estocásticos) es cada vez menos fiable. Por esa razón, las técnicas estocásticas pueden no ser las más adecua-

das para el tratamiento de ciertas incertidumbres aplicadas en el entorno de aplicación de MRP IV. La teoría de los conjuntos difusos y la teoría de la posibilidad emergen como alternativas viables para el manejo de la incertidumbre en los modelos de producción, inventario y rutas dentro de una cadena de suministro, puesto que han sido ampliamente utilizadas y aplicadas con éxito en muchas áreas diferentes. Estas teorías se han utilizado para construir sistemas que son difíciles de definir con precisión, intentando manejar la vaguedad, la imprecisión y la no especificidad inherente en la formulación humana de preferencias, restricciones y objetivos, sin la necesidad de la recopilación de estadísticas. Por esta razón, representan una herramienta atractiva de ayuda a la investigación en el desarrollo de modelos para la planificación de la producción y el transporte bajo incertidumbre, especialmente, cuando la dinámica del entorno limita la especificación de objetivos, restricciones y parámetros.

Por otro lado, una extensión posible a los modelos propuestos es considerar una función objetivo no lineal. La programación no lineal tiene ventajas sobre la programación lineal, ya que puede considerar factores tales como economías de escala que la programación lineal tiende a ignorar ya que considera los costes lineales independientes del volumen de producción o de la distancia. Asimismo, el modelo de programación matemática propuesto en esta tesis doctoral ha sido evaluado teniendo en cuenta múltiples criterios, solamente se ha definido un afunción objetivo consistente en la minimización de los costes totales de planificación. Una línea de trabajo consistiría en adaptar el modelo propuesto incorporando en su formulación, como objetivos múltiples, los diferentes criterios de evaluación.

La opción de utilizar modelos monolíticos de programación matemática supone obtener una planificación integrada global con resultados óptimos. En ese sentido, se evita la suboptimización de resultados derivada de planificaciones aisladas obtenidas de forma independiente entre los diversos eslabones de la cadena de suministro. Asimismo, otra de las ventajas de los modelos monolíticos respecto de otros métodos de planificación desintegrados es una gestión más eficiente, aunque más compleja, de los datos, evitando trasvases de información entre los diferentes planificadores que pueden inducir a errores o defectos. Sin embargo, los modelos monolíticos, como el modelo MRP IV propuesto en esta tesis doctoral, pueden requerir de un esfuerzo computacional considerable ante tamaños de problemas significativos a la hora de su validación. Por esta razón, la utilización de otros métodos de optimización que obtengan aproximaciones válidas y permitan a su vez, incluir funciones no lineales y múltiples objetivos, puede resultar una línea de trabajo interesante. En este sentido, puede resultar provechoso la aplicación de distintas técnicas basadas en metaheurísticas, algoritmos evolutivos y bioinspirados, así como las matheurísticas, que permiten la interoperación de metaheurísticas y técnicas de programación matemática.

Por último, un análisis empírico complementario a la experiencia computacional realizada en esta tesis, sería la realización de una batería de experimentos con el objetivo de lanzar el modelo propuesto bajo diferentes escenarios (diferentes estructuras de producto, variabilidades de la demanda, estructuras de costes, localización de proveedores, etc.). De esta forma se podría dimensionar el número de variables y restricciones en función de los principales parámetros del problema y determinar el tamaño de problemas que podrían resolverse con el mismo. Asimismo se podría inferir de forma empírica las ventajas de la integración de la planificación de la producción y el transporte, de forma general para diferentes entornos de aplicación.

### 3. Referencias

- Archetti, C., Speranza, M. G. (2012). Vehicle routing problems with split deliveries. *International Transactions in Operational Research*, 19(1-2), 3–22.
- Berbotto, L., García, S., Nogales, F. J. (2011). *A vehicle routing model with split delivery and stop nodes*. UC3M Working papers. Statistics and Econometrics 11-06, URI: <http://hdl.handle.net/10016/11026>
- Boysen, N., Fliedner, M. (2010). Cross dock scheduling: Classification, literature review and research agenda. *Omega*, 38(6), 413–422.
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299–312.
- Carter, C. R., Jennings, M. M. (2002). Social responsibility and supply chain relationships. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 38(1), 37–52.
- Carter, C. R., Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360–387.
- Chaabane, A., Ramudhin, A., Paquet, M. (2012). Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 37–49.
- Crainic, T. G., Laporte, G. (1997). Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 97(3), 409–438.

- Díaz-Madroñero, M., Mula, J., Peidro, D. (2012). A Conceptual Model for MRP IV. In J. Hernández, P. Zarate, F. Dargam, B. Delibašić, S. Liu, & R. Ribeiro (Eds.), *Decision Support Systems – Collaborative Models and Approaches in Real Environments* (Vol. 121, pp. 14–25). Springer Berlin Heidelberg.
- Díaz-Madroñero, M., Mula, J., Peidro, D. (2014). A review of discrete-time optimization models for tactical production planning. *International Journal of Production Research*, 52(17), 5171–5205.
- Dondo, R., Cerdá, J. (2007). A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 176, 1478–1507.
- Drake, D., Spinler, S. (2013). *Sustainable Operations Management: An Enduring Stream or a Passing Fancy?* Rochester, NY.
- Escobar, J. W., Linfati, R., Baldoquin, M. G., Toth, P. (2014). A Granular Variable Tabu Neighborhood Search for the capacitated location-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 67, 344–356.
- Kuhn, H., Liske, T. (2011). Simultaneous supply and production planning. *International Journal of Production Research*, 49(13), 3795–3813.
- Lahyani, R., Khemakhem, M., Semet, F. (2014). Rich Vehicle Routing Problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research* (en prensa).
- Lin, C., Choy, K. L. L., Ho, G. T. S. T. S., Chung, S. H. H., Lam, H. Y. Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41, 1118–1138.
- Martínez-Salazar, I. A., Molina, J., Ángel-Bello, F., Gómez, T., Caballero, R. (2014). Solving a bi-objective Transportation Location Routing Problem by metaheuristic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 234(1), 25–36.
- Mula, J., Peidro, D., Díaz-Madroñero, M., Vicens, E. (2010). Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204(3), 377–390.
- Mula, J., Poler, R., García, J. P., Ortiz, A. (2003). Supply planning and demand behaviour in an automobile industry supply chain. In *International Conference on*



*Industrial Engineering and Production Management (IEPM'03), Porto (Portugal).*

- Nananukul, N. (2013). Clustering model and algorithm for production inventory and distribution problem. *Applied Mathematical Modelling*, 37(24), 9846–9857.
- Pavlínek, P. (2012). The Internationalization of Corporate R&D and the Automotive Industry R&D of East-Central Europe. *Economic Geography*, 88(3), 279–310.
- Schmid, V., Doerner, K. F., Laporte, G. (2013). Rich routing problems arising in supply chain management. *European Journal of Operational Research*.
- Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, 54(4), 1513–1520.

ANEXO I

**EXTENDED TABLES FROM REVIEW OF DISCRETE-TIME  
OPTIMIZATION MODELS FOR TACTICAL PRODUCTION  
PLANNING**

---



---

ANEXO I

EXTENDED TABLES FROM REVIEW OF DISCRETE-TIME OPTI-  
MIZATION MODELS FOR TACTICAL PRODUCTION PLAN-  
NING

---

Accesible en: <http://goo.gl/FTQsGV>

ANEXO II

**IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS  
PROPUESTOS EN MPL**

---



---

ANEXO II

IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS PROPUESTOS EN MPL

---

Accesible en: <http://goo.gl/v3s6Iq>

ANEXO III

**FICHEROS SOLUCIÓN**

---





---

ANEXO III  
FICHEROS SOLUCIÓN

---

Accesible en: <http://goo.gl/ZbYVyN>

ANEXO IV

**PRODUCCIÓN CIENTÍFICA RELACIONADA**



**Díaz-Madroño, M.**, Mula, J., & Peidro, D. (2014). A review of discrete-time optimization models for tactical production planning. *International Journal of Production Research*, 52(17), 5171–5205.

**Díaz-Madroño, M.**, Peidro, D., & Mula, J. (2014). A review of tactical optimization models for integrated production and transport routing planning decisions. *Annals of Operations Research*. (en revisión).

**Díaz-Madroño, M.**, Peidro, D., & Mula, J. (2014). A fuzzy optimization approach for procurement transport operational planning in an automobile supply chain. *Applied Mathematical Modelling*. (en prensa)

Peidro, D., **Díaz-Madroño, M.**, Mula, J., Navalón, A. (2014). A tabu search approach for production and sustainable routing planning decisions for inbound logistics in an automotive supply chain. *Lecture Notes in Management and Industrial Engineering* (en prensa). Springer Berlin Heidelberg.

Mula, J., Campuzano-Bolarin, F., **Díaz-Madroño, M.**, & Carpio, K. M. (2013). A system dynamics model for the supply chain procurement transport problem: comparing spreadsheets, fuzzy programming and simulation approaches. *International Journal of Production Research*, 51(13), 4087–4104.

**Díaz-Madroño, M.**, Mula, J., & Peidro, D. (2012). A Conceptual Model for MRP IV. In J. Hernández, P. Zarate, F. Dargam, B. Delibašić, S. Liu, & R. Ribeiro (Eds.), *Decision Support Systems – Collaborative Models and Approaches in Real Environments* (Vol. 121, pp. 14–25). Springer Berlin Heidelberg.

Mula, J., **Díaz-Madroño, M.**, & Peidro, D. (2012). A Conceptual Model for Integrating Transport Planning: MRP IV. In J. Frick & B. T. Laugen (Eds.), *Advances in Production Management Systems. Value Networks: Innovation, Technologies, and Management* (pp. 54–65). Springer Berlin Heidelberg.

**Díaz-Madroño, M.**, Peidro, D., & Mula, J. (2012). Planificación operativa del transporte en una cadena de suministro mediante un enfoque interactivo de programación lineal fuzzy multiobjetivo. *Dirección Y Organización*, (46), 31–44.

**Díaz-Madroño, M.**, Peidro, D., Mula, J., & Ferriols, F. J. (2010). Enfoques de programación matemática fuzzy multiobjetivo para la planificación operativa del transporte en una cadena de suministro del sector del automóvil. *Revista de Métodos Cuantitativos Para La Economía Y La Empresa*, 9, 44–68.

Mula, J., Peidro, D., **Díaz-Madroño, M.**, & Vicens, E. (2010). Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204(3), 377–390.

Mula, J., Peidro, D., **Díaz-Madroño, M.**, & Hernández, J. E. (2010). Modelos para la planificación centralizada de la producción y el transporte en la cadena de suministro: una revisión. *Innovar. Revista de Ciencias Administrativas Y Sociales*, 20(37), 179–194.

Peidro, D., **Díaz-Madroño, M.**, & Mula, J. (2010). An interactive fuzzy multi-objective approach for operational transport planning in an automobile supply chain. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 7(2), 283–294.

Peidro, D., **Díaz-Madroño, M.**, & Mula, J. (2009). Operational transport planning in an automobile supply chain: an interactive fuzzy multi-objective approach. In *Proceedings of the 8th {WSEAS} International Conference on Computational intelligence, man-machine systems and cybernetics* (pp. 121–127). Stevens Point, Wisconsin, USA: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS).

Esta tesis doctoral se acabó de imprimir  
en el servicio de reprografía de  
la Escuela Politécnica Superior de Alcoy,  
antigua Escuela Industrial,  
el día 4 de diciembre de 2014,  
festividad de Santa Bárbara,  
en el 186º año de su fundación

LAUS + DEO