

Universidad de Huelva

**Departamento de Economía Financiera, Contabilidad y
Dirección de Operaciones**



**Una aproximación teórica a la posible inconsistencia de
los planes de carga obtenidos mediante la Planificación
de Necesidades de Capacidad (CRP) : propuesta de un
modelo alternativo**

**Memoria para optar al grado de doctora
presentada por:**

Inmaculada Rabadán Martín

Fecha de lectura: 28 de junio de 2010

Bajo la dirección del doctor:

Santiago García González

Huelva, 2010



**UNA APROXIMACIÓN TEÓRICA A LA
POSIBLE INCONSISTENCIA DE LOS
PLANES DE CARGA OBTENIDOS
MEDIANTE LA PLANIFICACIÓN DE
NECESIDADES DE CAPACIDAD (CRP):
PROPUESTA DE UN MODELO
ALTERNATIVO**



Departamento de Economía Financiera, Contabilidad
y Dirección de Operaciones

**Una aproximación teórica a la posible
inconsistencia de los planes de carga
obtenidos mediante la Planificación de
Necesidades de Capacidad (CRP):
Propuesta de un modelo alternativo**

Tesis Doctoral presentada por
Inmaculada Rabadán Martín

Director: Santiago García González

Huelva 2010

A mi familia

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. D. Santiago García González, por su apoyo, colaboración y dedicación a la realización de este trabajo.

A mis compañeros del Departamento de Economía Financiera, Contabilidad y Dirección de Operaciones, que de alguna u otra manera me han ayudado en este proyecto. En especial a mi compañera y amiga la Dra. Dña. Ana Gessa Perera por su inestimable apoyo laboral y moral en las épocas más difíciles.

A mi compañero, amigo y esposo, por toda su paciencia y ayuda prestada al escucharme y ayudarme a salir de los atolladeros en los que me he ido encontrando durante el desarrollo de esta tesis.

Naturalmente, a mis padres, por ofrecerme todo su cariño y apoyo para facilitarme el trabajo de investigación que tienen ahora en sus manos.

Y por último, a mi hijo Daniel, por las sonrisas que me ofrece cuando me ve, después de estar muchas horas trabajando.



PARTE I. JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN: JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA

1.1. A MODO DE INTRODUCCIÓN: OPORTUNIDAD Y JUSTIFICACIÓN DEL TEMA ELEGIDO	23
1.2. LA PLANIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD A CORTO PLAZO EN ENTORNOS MRP/ERP: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTADO DE LA CUESTIÓN	26
1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	37
1.4. METODOLOGÍA	43
1.5. ESTRUCTURA DEL TRABAJO	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

PARTE II. UNA INTRODUCCIÓN A LA PLANIFICACIÓN DE NECESIDADES DE CAPACIDAD (CRP)

CAPÍTULO 2. LA PLANIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD A CORTO PLAZO: LA TÉCNICA CRP

2.1. INTRODUCCIÓN: LA GESTIÓN DE LA CAPACIDAD EN EL CONTEXTO DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN	53
2.1.1 Planificación Estratégica o a largo plazo	55
2.1.2. Planificación táctica o a medio plazo	58
2.1.3. Programación Maestra	59
2.1.4. Planificación de Materiales	59
2.1.5. Ejecución y Control.....	60
2.2. FILOSOFÍAS DE LA PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN EN ENTORNOS DE FABRICACIÓN DISCRETA.....	60
2.3. TÉCNICAS DE PLANIFICACIÓN DE CAPACIDAD A MEDIO Y CORTO PLAZO	63
2.4. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA CRP (PLANIFICACIÓN DE NECESIDADES DE CAPACIDAD)	67
2.4.1 Técnicas de carga finita e infinita	67
2.4.2. Información necesaria para la aplicación de la técnica CRP.....	69
2.4.2.1. Pedidos planificados y en proceso.....	70
2.4.2.2. Datos sobre los Centros de Trabajo.....	72
2.4.2.3. Información sobre rutas y operaciones que las componen.....	73
2.4.2.4. Otros datos necesarios para conocer el tiempo de suministro ...	74
2.4.3. Desarrollo de la Planificación de Capacidad mediante CRP	77
2.4.3.1. Elaboración del Plan de Carga	80
2.4.3.1.1. Cálculo del valor de la carga	81

2.4.3.1.2. Asignación de la carga a los distintos periodos. Programación hacia delante y hacia atrás	82
2.4.3.2. Cálculo del Plan de Capacidad.....	85
2.4.4. Ajustes de la carga y/o capacidad para hacer factible el Plan de Materiales	86
2.4.5. Salidas del CRP	89
2.4.6. Ventajas de la aplicación de la técnica CRP	90
2.4.7. Inconvenientes de la técnica CRP.....	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	100

PARTE III. ANÁLISIS DE LA EFICACIA Y UTILIZACIÓN DE CRP

CAPÍTULO 3. LA INFLUENCIA DE LA ALEATORIEDAD DEL TIEMPO DE SUMINISTRO SOBRE EL PLAN DE CARGA

3.1. INTRODUCCIÓN	107
3.2. EL TIEMPO DE SUMINISTRO INTERNO.....	108
3.3. INCIDENCIA DE LAS TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL TRABAJO EN LA ALEATORIEDAD DEL TIEMPO.....	111
3.3.1. La estimación.....	112
3.3.2. Los estándares predeterminados de tiempos.....	113
3.3.3. Tiempos estándar o datos normalizados	114
3.3.4. Estudio de tiempos.....	115
3.3.5. Muestreo de trabajo	117
3.3.6. Vigencia y uso de los tiempos tipo	117
3.4. ESTIMACIÓN DE LOS TIEMPOS DE ESPERA A TRAVÉS DE LA TEORÍA DE COLAS.....	119
3.4.1. Parámetros fundamentales de una cola de espera	120

3.4.1.1. Tamaño de la población	121
3.4.1.2. Pauta de llegada de las unidades	121
3.4.1.3. Conducta de la población	123
3.4.1.4. Longitud máxima que puede alcanzar la línea de espera	123
3.4.1.5. Número de canales o servidores	124
3.4.1.6. Número de fases necesarias para acabar el producto	124
3.4.1.7. Disciplina de cola o criterio de entrada en el canal	125
3.4.1.8. Pauta de salida o de servicio de los productos.....	127
3.4.2. El tiempo de cola medio.....	130
3.5. LOS ELEMENTOS DEL TIEMPO DE SUMINISTRO Y SU ALEATORIEDAD	133
3.5.1. El tiempo de confección del pedido	133
3.5.2. El tiempo de desplazamiento	134
3.5.3. El tiempo de cola.....	137
3.5.4. El tiempo de carga.....	139
3.5.4.1. El tiempo de ejecución	141
3.5.4.2. El tiempo de preparación.....	142
3.5.4.2.1 Efecto del criterio de fabricación por orden de llegada sobre el tiempo de preparación.....	146
3.5.4.2.2. Efecto de la regla de minimización del tiempo de preparación.....	147
3.5.4.3. El tiempo de carga de un lote	149
3.5.5. El tiempo de espera	151
3.5.6. El tiempo de inspección	152
3.6. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE SUMINISTRO PLANIFICADO EN UNIVERSOS ALEATORIOS.....	154
3.7. CONCLUSIONES: FUENTES DE ALEATORIEDAD DEL TIEMPO DE SUMINISTRO Y EL PLAN DE CARGA	159
REFERENCIAS BIBLIOGRFICAS	169
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	173

CAPÍTULO 4. EFICIENCIA DE LOS PLANES ELABORADOS MEDIANTE LA TÉCNICA CRP

4.1. INTRODUCCIÓN	177
4.2. LAS DESVIACIONES DEL PLAN DE CARGA.....	178
4.2.1. El valor de la carga asignada a un periodo	180
4.2.1.1. Carga de una operación asignada totalmente a un periodo	181
4.2.1.2. Carga de una operación distribuida entre varios periodos	182
4.2.2. Asignación de la carga de una operación.....	184
4.2.2.1. Carga de las operaciones asignada totalmente a un periodo	184
4.2.2.2. Carga de una operación distribuida entre varios periodos	191
4.2.3. Probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga.....	197
4.3. LAS DESVIACIONES DEL PLAN DE CAPACIDAD CRP	209
4.4. LA PROBABILIDAD DE CUMPLIMIENTO DE LA PLANIFICACIÓN REALIZADA A TRAVÉS DE CRP	212
4.5. CONCLUSIONES	222
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	227
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	229

PARTE IV. PROPUESTA DE UNA TÉCNICA ALTERNATIVA DE PLANIFICACIÓN DE CAPACIDAD A CORTO PLAZO

CAPÍTULO 5. PLANTEAMIENTO DE UNA TÉCNICA ALTERNATIVA A LA PLANIFICACIÓN DE NECESIDADES DE CAPACIDAD (CRP)

5.1. INTRODUCCIÓN	235
5.2. ELABORACIÓN DEL PLAN DE CARGA MEDIANTE EL MODELO ALTERNATIVO.....	236
5.2.1. La carga de una operación	242
5.2.2. Asignación de la carga de una operación.....	245

5.2.3. Desarrollo del Plan de Carga.....	249
5.3. EL PLAN DE CAPACIDAD	250
5.4. DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA TÉCNICA DE PLANIFICACIÓN DE CAPACIDAD PROPUESTA	252
5.4.1. Entradas requeridas por el programa.....	254
5.4.2. Salidas ofrecidas por el programa	259
5.4.2.1. Salidas fundamentales	259
5.4.2.2. Herramientas de análisis ofrecidas por el programa.....	261
5.4.2.2.1. Análisis de las desviaciones de capacidad.....	261
5.4.2.2.2. Análisis de la exactitud de los tiempos de suministro planificados	265
5.4.2.2.3. Análisis de la evolución de las variables más relevantes.....	265
5.4.2.2.4. Análisis de los valores extremos y tendencias de los tiempos de carga y entrada en los Centros de Trabajo	268
5.5. COMPARACIÓN DE LA MECÁNICA Y UTILIZACIÓN DE CRP, CON LAS DEL MODELO ALTERNATIVO PROPUESTO	272
5.5.1. Datos comunes a las dos técnicas.....	275
5.5.2. Datos para CRP	279
5.5.2.1. Tiempo de preparación de los Centros de Trabajo	279
5.5.2.2. Información sobre las rutas y las operaciones que las componen: tiempos de ejecución	284
5.5.2.3. Tiempo de confección de pedido.....	287
5.5.2.4. Tiempo de desplazamiento de materiales.....	288
5.5.2.5. Tiempo de desplazamiento de los lotes	290
5.5.2.6. Tiempo de cola	292
5.5.2.7. Tiempo de espera.....	296
5.5.2.8. Tiempo de inspección de los lotes.....	298
5.5.2.9. A modo de resumen.....	300

5.5.3. Datos para el modelo alternativo propuesto	302
5.5.4. Cálculo de la carga con CRP	309
5.5.5. Cálculo de la carga con el modelo alternativo propuesto	317
5.5.6. Planificación de Capacidad a corto plazo	323
5.5.6.1. Elaboración del Plan de Carga	323
5.5.6.2. Determinación de la capacidad disponible.....	329
5.5.6.3. Desviaciones de la capacidad necesaria frente a la disponible.	329
5.6. CUMPLIMIENTO DE LA PLANIFICACIÓN ELABORADA MEDIANTE EL MODELO ALTERNATIVO PROPUESTO	338
5.6.1. Las desviaciones del Plan de Carga.....	339
5.6.1.1. El valor de la carga asignada a un periodo.....	340
5.6.1.2. Asignación de la carga a un periodo	341
5.6.1.3. Probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga para un lote	347
5.6.2. Las desviaciones del Plan de Capacidad.....	352
5.6.3. Probabilidad de cumplimiento de la planificación elaborada	353
5.7. CUMPLIMIENTO DE LA FECHA DE ENTREGA.....	365
5.8. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL MODELO PROPUESTO	368
5.8.1. Ventajas del modelo propuesto en comparación con CRP	368
5.8.2. Limitaciones del modelo propuesto	376
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	379
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....	382

PARTE V. CONCLUSIONES

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES, LIMITACIONES DEL TRABAJO Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN	385
6.2. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	399
6.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	402

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	405

ANEXOS

ANEXO 1. GUÍA BREVE DE INSTALACIÓN Y MANUAL DE USUARIO

A1.1. INSTALACIÓN DEL PROGRAMA	409
A1.1.1. Requisitos del sistema	409
A1.1.2. Instalación desde el CD-ROM	409
A1.2. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA	410
A1.2.1. Introducir o cambiar datos del proceso productivo	411
A1.2.1.1. Los Centros de Trabajo	413
A1.2.1.2. Las operaciones	414
A1.2.1.3. La planificación temporal	416
A1.2.2. Introducir información de las operaciones de los lotes en proceso ...	417
A1.2.2.1. La entrada de un lote	418
A1.2.2.2. La ejecución de una operación a un lote.....	420
A1.2.2.3. La finalización de una operación a un lote	421
A1.2.3. Planificación de capacidad y tiempo de suministro	422
A1.2.3.1. Plan de Materiales	423
A1.2.3.2. Elaborar Plan de Carga	424
A1.2.3.3. Tiempos de suministro planificados	428
A1.2.3.4. Exactitud de las planificaciones	429
A1.2.3.4.1. Carga real frente a planificada.....	430
A1.2.3.4.2. Tiempo de suministro real frente a planificado	433
A1.2.3.4.3. Análisis de tendencias	435
A1.2.3.4.4. Análisis de valores extremos y tendencias en las entradas y tiempos de carga.....	437

ANEXO 2. UN EJEMPLO SENCILLO DE LA MECÁNICA DE CRP

A2.1. INTRODUCCIÓN.....	445
A2.2. DATOS NECESARIOS PARA LOS CÁLCULOS.....	446
A2.2.1. Pedidos u órdenes planificados y en proceso.....	447
A2.2.2. Datos sobre los Centros de Trabajo	447
A2.2.2.1. Factor de eficiencia	448
A2.2.2.2. Factor de utilización.....	451
A2.2.2.3. Otros datos sobre los Centros de Trabajo	453
A2.2.3. Información sobre las rutas y las operaciones que las componen: tiempos de ejecución.....	454
A2.2.4. Otros datos necesarios para conocer el tiempo de suministro	455
A2.3. ELABORACIÓN DEL PLAN DE CARGA.....	456
A2.3.1. Cálculo del valor de la carga.....	456
A2.3.2. Asignación de la carga	457
A2.3.3. Determinación del Plan de Carga	465
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	468
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	469

ANEXO 3. NOMENCLATURA EMPLEADA.....471**ANEXO 4. DESARROLLO DE LA PROBABILIDAD DE CUMPLIMIENTO
DEL EJEMPLO UTILIZADO EN EL APARTADO 4.4.....481****ANEXO 5. SIMULACIÓN DE LA REDUCCIÓN EN EL NÚMERO DE
VARIABLES ALEATORIAS**

A.5.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA MÁXIMA REDUCCIÓN EN EL NÚMERO DE VARIABLES.....	488
A.5.2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA MÍNIMA REDUCCIÓN EN EL NÚMERO DE VARIABLES.....	502

ANEXO 6. BIBLIOGRAFÍA GENERAL.....	517

ANEXO 7. CD-ROM CON PROGRAMA INFORMÁTICO	

PARTE I

JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS,
METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN: JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA

1.1. A MODO DE INTRODUCCIÓN

El problema de la Capacidad es un aspecto de la Dirección de Operaciones que, sin duda, afecta en gran medida a la actividad productiva de cualquier empresa, condicionando, tanto al sistema de Planificación y Control de la Producción, como al desarrollo cotidiano de las operaciones y sus costes. No es pues de extrañar la preocupación que representa el desarrollo de una adecuada Gestión de la Capacidad, cuya problemática sigue siendo tratada por todos los autores del Área y que, en buena medida, presenta todavía bastantes lagunas que resolver.

Una de las situaciones donde la Gestión de la Capacidad cobra especial importancia, es la de las empresas que desarrollan su actividad en configuraciones productivas por lotes. En ellas, un hecho diferenciador está en que *“se utilizan las mismas instalaciones para la obtención de múltiples productos”* (Domínguez y

otros, 1995b, p. 143). Esto conlleva que un Centro de Trabajo¹ puede ser utilizado para realizar varias operaciones a distintos artículos. Si la operación que se va a realizar a continuación es distinta de la anterior, suele ser necesario ajustar dicho Centro, denominándose tiempo de preparación al dedicado a esta tarea, que será, junto con el de ejecución de la operación, determinante para establecer la carga generada por los diferentes lotes en los distintos Centros de Trabajo y, con ello, para la determinación de los Planes de Capacidad.

En las configuraciones productivas por lotes, principalmente en el caso de las configuraciones *job-shop*², suelen emplearse, entre otros, los sistemas MRP/ERP ya tan popularizados (Orlicky, 1975; Thompson, 1983; Adams y Cox, 1985; Foley, 1988; Hung y Chien, 2000; Muscatello, Small y Chen, 2003; Bendoly y Schoenherr, 2005; Crandall, 2006). Entre los distintos módulos que componen estos sistemas se encuentra la Planificación de Necesidades de Capacidad (*Capacity Requirements Planning* –CRP–), en la cual se centra el presente trabajo.

El ámbito en el que se pueden obtener mayores beneficios de la aplicación de la técnica CRP, según varios autores³, es el mismo que el del MRP, es decir, empresas manufactureras con configuraciones productivas *job-shop* que disponen de listas de materiales muy largas y multitud de Centros de Trabajo que planificar⁴. No obstante “*CRP puede ser usado con éxito en los cuatro entornos⁵ aunque su fortaleza se encuentra en entornos con productos estandarizados complejos o productos complejos en función del cliente construidos con componentes estándar*” (Jonsson y Mattsson, p. 882).

¹ Con el término Centro de Trabajo nos referimos a cualquier unidad productiva identificable; en función del caso, podrá incluir una máquina, un conjunto de ellas, un taller, un conjunto de talleres o, incluso, una instalación completa. Su entidad dependerá del detalle requerido en el nivel de planificación.

² “*En este tipo de configuraciones se producen lotes más o menos pequeños de una amplia variedad de productos de poca o nula estandarización (son a medida o con muchas opciones personalizadas), empleando equipos de escasa especialización*” (Domínguez y otros, 1995a, p. 143).

³ Véase, por ejemplo, Oden, Langenwalter y Lucier (1993, p. 179), Landvater (1993, pp. 167-168), Domínguez y otros (1995b, p. 155) o Bicheno y Elliot (1997, p. 439).

⁴ Para algunas empresas puede ser suficiente utilizar alguna técnica de planificación *Rough-cut* (como pueden ser la Planificación de Capacidad usando Factores Agregados o CPOF, las Listas de Capacidad o los Perfiles de Recursos, que se analizarán en el Apartado 2.3.), sin embargo, cuando se dispone de multitud de Centros de Trabajo, mucha variedad de ítems y muchos niveles en la lista de materiales, suele ser adecuado utilizar adicionalmente CRP para la planificación de la capacidad.

⁵ Los cuales se pueden equiparar a las configuraciones productivas por proyectos, en línea y *job-shop*, en batch y continua (ver Apartado 2.1.1.).

A pesar de que en su día, empezó considerándose como una importante herramienta para planificar la carga derivada de la ejecución del Plan de Materiales (Ploosl y Wight, 1973; Belt, 1976; Wight, 1981), la realidad es que, aunque sigue formando parte de los actuales sistemas ERP en uso (Classen y Malstrom, 1982; Schmitt, Berry y Vollmann, 1984; Krepchin, 1989; Wallace y Kremzar, 2001) e incluso se ha incorporado a sistemas Justo a Tiempo (*Just In Time –JIT–*)⁶ (Lee, 1993; Houghton y Potougal, 1995), su aplicación tiene unos bajos niveles de satisfacción (Burcher, 1992; Jonsson y Mattsson, 2002; Jonsson y Mattsson, 2003).

Como podremos observar detalladamente en el Apartado 1.2., si acudimos a los diferentes estudios realizados sobre la materia⁷, podemos comprobar como se argumentan muy diversas razones para justificar la baja utilización de CRP, tales como la cantidad de datos requeridos, las dificultades para estimar valores de los mismos que tengan una alta probabilidad de ocurrencia, la volatilidad de las estimaciones realizadas, la cantidad de recursos que requiere, etc. (ver Apartado 2.4.7.) Por todo ello, Ploosl ya afirmó en 1988, que el uso de CRP conlleva *“enormes desperdicios de tiempo, dinero y esfuerzo humano con resultados altamente cuestionables”*⁸.

La consecuencia es que, desde hace tiempo, parecen haberse asumido como “inevitables” o “aceptables” las limitaciones de la técnica CRP y los escasos resultados de su uso, con una alta dosis de conformismo. Sólo esto puede justificar que en los últimos años no hayan sido muchos los trabajos (ver Apartado 1.2.), dedicados a corregir los inconvenientes de esta técnica de cara a mejorar sus resultados, derivándose los estudios de la Planificación a Corto Plazo de la Capacidad hacia las propuestas de desarrollo de software alternativo⁹, que pueda aplicarse en entornos donde se utilice MRP, y que permita a la empresa obtener

⁶ Estos sistemas están diseñados para alcanzar un alto volumen de producción, empleando para ello un inventario mínimo que llega al puesto de trabajo justo a tiempo. La empresa pionera en la aplicación de esta filosofía de fabricación fue Toyota, siendo el sector del automóvil en el que, actualmente alcanza un mayor grado de implantación la filosofía JIT.

⁷ Ver, por ejemplo: Classen y Malstrom (1982), Berry, Schmitt y Vollmann (1982), Schmitt, Berry y Vollmann (1984), Cheng (1986), Bernard (1990), Burcher (1992), Ptak (1997) o Jonsson y Mattsson (2002).

⁸ Ploosl (1988, p. 495).

⁹ Entre otras propuestas para la gestión de capacidad a corto plazo, se encuentran, por ejemplo: la Programación por Objetivos (Fisk, 1979), Algoritmos Heurísticos (Harl y Ritzman, 1985), Programación Lineal (Cheng, 1986; Maes, McClain y Van Wassenhove, 1991), técnicas de simulación (Lankford, 1990; Thompson, 1993; Sarmiento y Jardim, 1998; Musselman, O' Reilly y Duket, 2002), sistemas expertos (Jayaraman y Srivastava, 1996), etc.

una mayor eficiencia que la aplicación del tradicional MRP II¹⁰. Sin embargo, ninguna de ellas ha tenido excesiva difusión práctica, manteniéndose una difusión cada vez mayor del uso del software ERP, que sigue incorporando un módulo CRP en la inmensa mayoría de los casos.

1.2. LA PLANIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD A CORTO PLAZO EN ENTORNOS MRP/ERP: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

El término “*Capacity Requirements Planning (CRP)*” fue utilizado por primera vez por Wight, según él mismo describe antes de definirlo en 1973¹¹, aunque durante un tiempo se le dieron otros nombres¹². Desde su incorporación a los primeros Sistemas MRP de Bucle Cerrado (*MRP Closed Loop*) a principios de los 70 (Orlicky, 1975, p. 244), ha sido uno de los módulos incluidos tanto en el antiguo software MRP II (*Manufacturing Resource Planning*) como en el actual ERP (*Enterprise Resource Planning*), e incluso en sistemas híbridos MRP-JIT (Lee, 1993; Houghton y Portougal, 1995).

Se puede definir como “una técnica que planifica las necesidades de capacidad de los pedidos planificados emitidos por MRP, bajo la consideración de la disponibilidad ilimitada de capacidad” (Domínguez y otros 1995b, p. 164). Según el diccionario APICS, el CRP es “la función de establecer, medir y ajustar los límites o niveles de capacidad [...] el proceso de determinar cuántos recursos humanos y máquinas son requeridos para acometer las tareas de producción. El CRP recibe las órdenes de fabricación en curso y las planificadas en el sistema MRP, y las convierte en horas de trabajo para cada Centro de Trabajo y periodo”¹³. En este sentido, para aquellas industrias en las que una eficiente

¹⁰ Véase Lankford (1990, p. 42) o Plenert (1999, p. 98).

¹¹ “Dado que yo he ideado el término, permítanme que lo defina. CRP usa exactamente la misma lógica que la Asignación de Carga Finita con una pequeña diferencia. Además de determinar las cargas de los pedidos emitidos, también determina la de los pedidos planificados MRP” (Plossl y Wight, 1973, p. 47).

¹² Tales como “asignación de cargas a máquinas a capacidad infinita usando los pedidos planificados y emitidos” (*Machine Loading to Infinite Capacity Using Planned Orders and Released Orders*) (Belt, 1976, p. 9) o “capacidad frente a carga” (*Load vs. Capacity*) (Wemmerlöv, 1980, p. 85).

¹³ APICS Dictionary, en Fogarty, Blackstone y Hoffmann (1991, p. 430).

utilización de los Centros de Trabajo incide en gran medida en la mejora de su productividad, la aplicación del sistema CRP fue muy importante¹⁴.

Desde la creación del término CRP distintos autores han analizado esta técnica definiendo sus características, determinando las ventajas e inconvenientes que conlleva y averiguando la aplicabilidad y utilización en las empresas. En este apartado intentaremos reflejar la evolución de los estudios realizados en relación a la Planificación de Capacidad a corto plazo, centrándonos en los trabajos que hacen referencia a CRP, para lo cual analizaremos cronológicamente las principales aportaciones que se han ido haciendo a este tema.

Gran parte de los estudios realizados se centran en la comparación entre técnicas de capacidad finita e infinita, intentando determinar la más conveniente. En este sentido, las técnicas finitas asignan la carga en función de la secuencia de prioridades, reasignando los lotes a otros periodos cuando se completa la capacidad disponible mientras que las técnicas infinitas no comprueban si existe capacidad disponible antes de asignar las cargas originadas por los lotes incluidos en el Plan de Materiales. Así, CRP está basado en los principios de carga infinita, ya que *“la capacidad requerida es asignada a los Centros de Trabajo independientemente de si la capacidad está disponible”* (Wemmerlöv, 1984, p. 36).

Dentro de ese tipo de estudios se puede englobar el primero de los trabajos en los que se utiliza el término CRP, en el que Plossl y Wight (1973) consideran que si bien las técnicas finitas nos dicen si los lotes se terminarán a tiempo y si es necesario cambiar el Programa Maestro de Producción, CRP nos muestra dónde excede la carga a la capacidad y qué lotes del Programa Maestro de Producción necesitan ser cambiados, sin necesidad de los cálculos sofisticados que precisan las técnicas finitas.

Tres años más tarde, Belt se plantea que, si bien el *“CRP es un método de planificación generalmente aceptado”* (Belt, 1976, p. 9), la necesidad de integrar la Planificación de Capacidad a corto plazo con el control de capacidad, se podría alcanzar mediante la utilización de la técnica Input/Output, no sólo en el control de la capacidad, sino también en la determinación de la factibilidad del Plan de Materiales, resultado de la planificación MRP. El autor realiza las primeras críticas a CRP, ya que considera que esta técnica tan sólo compara la capacidad disponible con la necesaria para determinar cuándo existen sobrecargas o subcargas, lo cual podría generar decisiones erróneas por parte del planificador. En este sentido, Belt considera que sería más exacto reconocer las posibles sobrecargas o subcargas a través de las desviaciones que se producen en los tamaños planificados de las colas

¹⁴ Manji (1990, p. 56).

de espera, procedimiento que sigue la técnica Input/Output, cuya aplicación sería más simple que la utilización de técnicas de capacidad finita.

En aras a determinar qué tipo de técnica de Planificación de Capacidad es la más conveniente en configuraciones *job-shop*, Adam y Surkis (1977) comparan las técnicas de capacidad finita, infinita y dinámicas¹⁵. Utilizan para ello la simulación, analizando el retraso y desarrollo de la planificación elaborada por cada técnica, así como el coste que conlleva el uso de las mismas, medido en relación al tiempo de ordenador requerido. De este estudio se puede extraer que, aunque la técnica de Planificación de Capacidad con mejores resultados sería la Técnica Dinámica, muy pocas empresas la aplican¹⁶. Por otro lado, comparando el comportamiento de las técnicas finitas e infinitas, de la simulación realizada en este trabajo, se puede concluir que las primeras consiguen un menor nivel de retraso de los pedidos y la reducción de los lotes adelantados, a costa de precisar de mayores requerimientos informáticos.

El trabajo de Belt (1976), en el que se apoya la utilización del análisis Input/Output, es criticado por Wemmerlöv (1980), el cual discrepa del método científico seguido por el primero para llegar a esa conclusión. En este sentido, considera que la diferencia de criterio utilizado en CRP y en el Control Input/Output para determinar si se origina sobrecarga o subcarga, impide la adecuada comparación de los resultados, dado que esto sería como si quisiéramos comparar “*dos termómetros, uno graduado en Fahrenheit y el otro en centígrados, y acusáramos al primero de no ser capaz de indicar la verdadera temperatura en centígrados*” (Wemmerlöv, 1980, p. 86). Para demostrar esto realiza la conversión de la Planificación de Capacidad obtenida mediante CRP en el ejemplo utilizado por Belt, en un informe Input/Output, observándose resultados similares a los obtenidos directamente por este último procedimiento, dejando de manifiesto que no existe una superioridad de una técnica respecto a la otra, siendo más conveniente el uso combinado de ambas.

Classen y Malstrom (1982) establecen que, para CRP, son necesarios datos relativos a cantidades, secuencias de operaciones y tiempos estándar para planificar adecuadamente la capacidad. Estos autores son los primeros en referirse a las dificultades que conlleva CRP, determinando dos tipos de problemas: la cantidad de datos detallados requeridos y las dificultades matemáticas que conlleva

¹⁵ Las técnicas dinámicas tienen en cuenta la congestión que el lote va a encontrar en cada Centro de Trabajo y el tiempo que tardará en llegar a cada uno de ellos. Para más información véase Reiter (1966) y Holstein (1968).

¹⁶ De un estudio publicado en 1974, realizado a 2.000 compañías en Estados Unidos, sólo 2 empresas utilizaban la técnica de capacidad dinámica (Adam y Surkis, 1977, p. 1015).

la evaluación de todas las posibles combinaciones de temporización y tamaños de lotes, así como la volatilidad de los datos. La alternativa propuesta en este trabajo, se basa en la utilización de CRP como una guía de planificación de las sobrecargas y la utilización de la simulación para analizar el efecto de los cambios en los datos utilizados.

El mismo año, Berry, Schmitt y Vollmann (1982), analizan las características de CRP comparándolas con el grupo de técnicas *Rough-Cut*¹⁷, constatando que, a diferencia de estas técnicas, CRP utiliza la información procedente del proceso de explosión MRP, incluye la reducción de necesidades a causa de los inventarios de productos y componentes, considera únicamente la capacidad necesaria para finalizar los lotes en curso de fabricación y tiene en cuenta otras fuentes de demanda que puedan ser requeridas por MRP (como puede ser la demanda independiente de los productos). Todo ello conlleva que la principal diferencia con las técnicas *Rough-Cut*, se encuentre en la determinación de los niveles de capacidad necesaria. De este trabajo se desprende que, aunque de las cuatro técnicas analizadas en él, CRP es la que ofrece una información más exacta, para ello requiere mucho esfuerzo de computación, por lo que resulta más complicado hacer simulaciones ante cambios en las variables utilizadas para la planificación de la capacidad.

En el otro extremo se encuentra el trabajo de Thompson (1983), en el que, además de la definición y función de CRP¹⁸, se explican las ventajas teóricas que podrían conseguirse mediante la utilización de esta técnica en entornos de fabricación repetitiva¹⁹. Considera que las mejoras que cabrían esperar serían la mejora de la capacidad para controlar el tiempo de suministro e inventarios, la consideración de todos los Centros de Trabajo que están definidos en los informes de carga, y la mejor comunicación entre marketing y fabricación, reduciendo los niveles de inventario, existencias y costes de sobredimensionamiento.

¹⁷ Técnicas que se utilizan para comprobar la factibilidad del Programa Maestro de Producción. En concreto en el trabajo de Berry, Schmitt y Vollmann (1982) incluyen dentro de este grupo las técnicas de Planificación de Capacidad usando Factores Agregados o CPOF, Lista de Capacidad y Perfiles de Recursos.

¹⁸ “CRP desarrolla la función de establecer, medir y ajustar unos niveles de capacidad que sean consistentes con el plan de producción. CRP es el proceso de determinar la cantidad de necesidades de mano de obra y máquinas para conseguir el nivel de producción planificado” (Thompson, 1983, p. 7).

¹⁹ Siguiendo la nomenclatura utilizada en el Apartado 2.1.1., este tipo de fabricación podría asimilarse a las configuraciones productivas en línea.

Por otro lado, Harl (1983) se centra en el hecho de que CRP no resuelve los problemas de capacidad que reflejan los Planes de Carga y Capacidad que elabora. Por ello presenta varias alternativas heurísticas que permiten identificar los desajustes de capacidad automáticamente y modificar los pedidos planificados, lo cual “*se presenta como un primer paso hacia un procedimiento realista de Planificación de Capacidad finita*” (Harl, 1983, p. 34).

Con el desarrollo de los sistemas JIT, Goddard (1984), se plantea la necesidad de incluir en éstos el control en planta (*shop floor control*). Además, en este trabajo se identifican las entradas necesarias para desarrollar CRP, definiendo como tales la Planificación de Materiales, las rutas, las reglas de asignación y las características de los Centros de Trabajo. En este artículo, también se establece como diferencia entre CRP y la técnica Input/Output, el hecho de que el primero mira hacia delante en su planificación y la segunda hacia atrás, comparando qué ha pasado con qué se esperaba que pasara. En este trabajo Goddard resalta la necesidad de disponer de datos realistas para poder disponer de un sistema efectivo de control de planta (dentro del que engloba CRP), indicando que sólo cuando la empresa dispusiera de pocos Centros de Trabajo, sería posible realizar una Planificación de Capacidad confiable que compense la falta de exactitud de los datos. Años después, diferentes autores seguían incidiendo en la importancia de la exactitud de la información que utiliza CRP (ver, por ejemplo, Bernard, 1990 o Burcher, 1992), cuestión que, como veremos más adelante, sigue sometida a debate en nuestros días (ver, por ejemplo, Jonsson y Mattsson, 2002 y 2003).

Schmitt, Berry y Vollmann (1984), comparando CRP con otras técnicas de Planificación de Capacidad, afirman que el procedimiento CRP requiere de datos adicionales y un esfuerzo de cálculo, que plantea algunas cuestiones sobre si ese esfuerzo está justificado con la mejora de resultados. Para analizar ésta y otras cuestiones utilizan en este artículo un modelo de simulación, observando el efecto en la planificación realizada por las técnicas de Planificación de Capacidad usando Factores Agregados o CPOF, Lista de Capacidad, Perfiles de Recursos y CRP. En concreto, los autores estudian el efecto que tendrían las variaciones del Programa Maestro de Producción y de los tiempos estándar, estimados para el desarrollo de la Planificación de Capacidad, sobre los retrasos y las desviaciones de capacidad. El resultado de este experimento refleja que, cuando hay variabilidad en el Programa Maestro de Producción, manteniéndose constantes los tiempos estándar, en Perfiles de Recursos y CRP las desviaciones de capacidad se incrementan y disminuyen las pérdidas de fechas de entrega (*missed due dates*), lo cual se debe más a la temporización de las cargas que a la complejidad de los procedimientos seguidos por estas técnicas. Sin embargo, cuando existe variación en los tiempos estimados, el resultado obtenido con CRP se diferencia del conseguido por las técnicas *Rough-Cut*, observándose mejoras en las pérdidas de fecha de entrega y un incremento de las desviaciones de capacidad a causa de la frecuencia con la que CRP actualiza su

planificación. El trabajo concluye diciendo que el uso de ordenadores para la aplicación de CRP, se convierte en esencial debido a la gran cantidad de datos que maneja, siendo conveniente el uso de esta técnica para hacer ajustes en los horarios de trabajo y la subcontratación, una vez que se ha hecho los cambios necesarios en el Programa Maestro de Producción, a través de alguna técnica *Rough-Cut*.

Cuando la Planificación de Capacidad realizada con CRP presenta desviaciones inevitables entre carga y capacidad, el planificador tiene al menos tres opciones: no tomar ninguna acción correctora y permitir que se generen las colas de espera, compensar los periodos con sobrecarga con los de subcarga o cambiar partes de la Planificación de Materiales. Según Harl y Ritzman (1985), esta última opción es la más complicada de implementar, recurriéndose a la prueba y error. Estos autores plantean un algoritmo que se encarga de esa tarea, integrando MRP y CRP, basándose en el hecho de que la elección de los tamaños de lote y la Planificación de Capacidad, deberían hacerse simultáneamente más que secuencialmente. El experimento presentado refleja que, con un incremento del 4,3% del uso de tiempo necesario medio de ordenador, se conseguía una mejora media en el servicio al cliente del 32%.

En un trabajo de Goddard (1986) se incluye CRP dentro de los tres enfoques probados en la Planificación de Capacidad, junto con la Planificación de Necesidades de Recursos (RRP) y la planificación *Rough-Cut*, si bien considera que para cerrar el bucle en el proceso de Planificación y Control de la Producción, también es necesario incluir el control Input/Output. También se establece en este artículo que, para realizar la Planificación de Capacidad, CRP utiliza tres elementos: “Centros de Trabajo seleccionados, rutas (operaciones, secuencias y estándares de tiempo de ejecución y preparación) y reglas de prioridad” (Goddard, 1986, p. 25). Además, este autor considera que CRP es un proceso compartido con el departamento de planificación y la planta de producción, ya que ésta debe aceptar la planificación realizada por éste e informar de los cambios que puedan afectar al plan elaborado por CRP. En este sentido, determina que la función de CRP no es sólo realizar una Planificación de Capacidad, sino que establece una serie de pasos que van más allá. En concreto, la secuencia que debe seguir CRP es la siguiente:

1. Predicción, con la que se determinan los Centros de Trabajo en los que existen desviaciones tolerables entre capacidad disponible y necesaria.
2. Ajuste, para reasignar los trabajos y corregir las sobrecargas o subcargas que se encuentren fuera del margen de tolerancia.
3. Búsqueda de alternativas, junto con el personal de fábrica, cuando el planificador no consigue corregir los problemas potenciales.

4. Aceptación, por parte de los representantes del departamento de fabricación, de la Planificación de Capacidad, haciéndose responsables de su ejecución.
5. Mantenimiento del plan a lo largo del tiempo, responsabilidad de las áreas de planificación y fabricación.

En este trabajo además, se afirma que CRP es considerado formalmente una técnica de capacidad infinita, siendo teóricamente más conveniente la utilización de técnicas finitas. El problema está en elegir la mejor técnica finita, ya que todavía un ordenador “*no conoce la diferencia entre un buen o mal plan*” (Goddard, 1986, p. 25) y el hecho de que estas técnicas ofrezcan un resultado nivelado no da la oportunidad de analizar las fuentes de las desviaciones y tomar decisiones encaminadas a evitar esos problemas en un futuro.

Según Connor (1986), la técnica CRP, sin el beneficio de las simulaciones, sería de poca ayuda ya que, como técnica infinita de capacidad, asume que “*lo que no se haga hoy tendrá que ser hecho mañana*” (Connor, 1986, p. 21). Por otro lado, esta autora también analiza el hecho de que, aunque la planificación hacia atrás es la más usada para planificar la capacidad, también se podría utilizar la planificación hacia delante para la asignación de las cargas, si se quiere averiguar cuándo finalizaría un lote de empezarse en una fecha determinada.

En el trabajo “*CRP: quién lo necesita y por qué*”, de Smolin (1986), se analiza ampliamente esta técnica identificando los siguientes pasos para implementarla:

1. Definir los Centros de Trabajo.
2. Crear una ruta de fabricación para cada ítem.
3. Calcular la carga necesaria en cada Centro de Trabajo usando los pedidos en proceso y los planificados, junto con la información de rutas y Centros de Trabajo.
4. Presentar los resultados en un formato claro y comprensible.

Para este autor, los beneficios que puede aportar la implantación de CRP son los siguientes:

1. La visión de las sobrecargas coyunturales, lo que permite la reasignación de las cargas.

2. El reflejo de las sobrecargas crónicas, identificando Centros donde es necesario aumentar las máquinas o el personal.
3. La documentación de la infrautilización de los Centros con objeto de justificar recortes de capacidad.
4. La planificación de vacaciones y tareas de mantenimiento en los periodos de baja carga.
5. La capacidad de simulación.

Mediante la aplicación de la programación lineal estocástica, Cheng (1986) intenta resolver el problema de la aleatoriedad de las variables que se utilizan para determinar la Planificación de Capacidad a corto plazo. Este procedimiento conlleva el desarrollo de una técnica de capacidad finita, que considera más adecuada que CRP, ya que el hecho de que éste no tenga en cuenta la capacidad de los Centros a la hora de planificar lo haría “*no factible desde el punto de vista de la capacidad*” (Cheng, 1986, p. 443).

También Plossl (1988) cuestiona la validez de CRP, ya que considera que requiere demasiada información, “*desperdicia enormes cantidades de tiempo, dinero y esfuerzo humano para obtener resultados altamente cuestionables*” (Plossl, 1988, p. 495).

El primer trabajo donde se detalla todo el proceso de cálculo que sigue CRP, es en el libro “*Capacity Management*” (Blackstone, 1989), donde se utiliza un ejemplo en el que se aclara todo el procedimiento seguido para realizar la Planificación de Capacidad. Tras este desarrollo, Blackstone opina que “*CRP incluye el uso iterativo de la carga infinita con modificaciones en la distribución en cada iteración, lo cual es mejor que el uso de técnicas finitas o infinitas solas*” (Blackstone, 1989, p. 109)

En 1992 se publica el primer estudio sobre la implantación de técnicas de capacidad (Burcher, 1992), en el que se reflejan los resultados de una encuesta realizadas a 349 empresas manufactureras del Reino Unido. Según este trabajo, la Planificación Detallada de Capacidad, en concreto el nivel de utilización de CRP en las empresas es bajo, debido a varias razones que, ordenadas por el porcentaje de respuestas, son:

1. El CRP no está implementado totalmente (27,8 %).
2. Los tiempos y rutas utilizados no son exactos o suelen variar (21,4 %).

3. Volumen alto de trabajo no planificado (14,3 %).
4. No consideran necesaria su aplicación debido a que tienen rutas simples, aplican JIT, por el flujo productivo, etc. (10,3 %).
5. Necesidad de datos referentes a los factores de utilización y eficiencia de los Centros (8,7 %).
6. Consideran que con la Planificación de Capacidad Aproximada (principalmente a través de técnicas *Rough-cut*) tienen suficiente (7,9 %).
7. Por la necesidad de conocimientos y habilidades de los usuarios (6,3 %).
8. Creen que el esfuerzo de implementación es mayor que el beneficio (5,6 %).

De lo que se puede extraer que, si se toman sólo las empresas que no tienen implementado CRP²⁰, pero que en principio lo considerarían adecuado para la planificación de su capacidad²¹, podríamos observar que el 30 % argumentan como principal problema de su aplicación la necesidad de conocer con exactitud los datos requeridos por esta técnica (tiempos, rutas, eficiencia y utilidad de los Centros). En el mismo sentido, Bernard afirma que *“la Planificación de Necesidades de Capacidad puede ser una herramienta muy efectiva para aquellas compañías que la necesiten, pero sólo si la lógica es correcta, se aplica de forma efectiva y la información en la que se basa es exacta y actualizada”* (Bernard, 1990, p. 40)²².

Del estudio de Burcher, se desprende que CRP es empleado en el 52 % de las empresas encuestadas, no obstante sólo el 36,4 % del total de compañías estudiadas cree que funciona con éxito. Las razones argumentadas para su baja utilización son variadas (anteriormente enumeradas), pero en su mayoría están relacionadas directamente con la pobre exactitud de los tiempos y rutas utilizados, alta cantidad de trabajo no planificado, necesidad de datos de planta, utilización y eficiencia, necesidad de conocimiento y habilidades de los usuarios o incluso, el

²⁰ Ya lo tenían implementado un 27,8 %, aunque no completamente.

²¹ Excluimos el 18,2 % de empresas que no aplican CRP, ya sea porque no lo consideran adecuado para su proceso productivo o porque consideran suficiente la Planificación Aproximada de Capacidad.

²² En el mismo sentido se expresa Lankford (1990, p. 40).

hecho de que algunas empresas consideran que el esfuerzo es mayor que el beneficio.

Bakke y Hellberg (1993) también analizaron las técnicas de capacidad a medio y corto plazo mediante cuestionarios. Su estudio abarcó 50 empresas en 6 países europeos y llegaron a la conclusión de que la mayoría de estas compañías utilizaban CPOF y Listas de Capacidad, mientras que Perfiles de Recursos y CRP eran las técnicas que se utilizaban en menor medida. Además, en este trabajo se determina que, ni la capacidad ni la carga, son conocidas con exactitud, lo que conlleva errores en la planificación.

Junto con el trabajo de Blackstone (1989), el otro manual que analiza ampliamente el proceso de desarrollo de CRP es publicado por Oden, Langenwaller y Lucier en 1993 y lleva por título "*Handbook of Material & Capacity Requirement Planning*". En este trabajo los autores consideran que, a principios de los 90, la mayoría de las empresas no utilizaban CRP, lo que se debía a que no lo necesitaban porque sus productos y procesos eran lo suficientemente simples, como para poder utilizar la experiencia o las técnicas *Rough-Cut*. Según Oden, Langenwaller y Lucier, los principales problemas que presenta CRP son:

- La utilización de tiempos de suministro fijos, ya que asume tiempos de cola y de desplazamiento constantes, por lo que sería más conveniente "*el uso de CRP como un dispositivo de Planificación de Capacidad más que como una herramienta de programación*" (Oden, Langenwaller y Lucier, 1993, p. 406).
- La consideración de que existe capacidad ilimitada, lo que puede causar algunos problemas, si bien consideran que las técnicas de capacidad finita, que solucionarían ese problema, deberían utilizarse tras la aplicación de CRP y como complemento de éste.
- El uso casi exclusivo de la planificación hacia atrás de las cargas, lo cual se puede complementar con la utilización de la programación hacia delante.

En 2002, Jonsson y Mattsson publican el otro gran estudio que, junto con el de Burcher (1992), se han realizado sobre la aplicación y uso de CRP, en este caso sobre 84 empresas suecas. De acuerdo a este trabajo "*CRP fue el método más común pero también el que tuvo una mayor proporción de usuarios insatisfechos, en todos los entornos de planificación*" (Jonsson y Mattsson, 2002, p. 89). Como resultado de las encuestas, los autores afirman que el 81% de las compañías utilizan CRP, lo cual se podría explicar por el hecho de que éste se incluye dentro

de los paquetes ERP. Además, esta técnica se estaba aplicando a todas las compañías encuestadas con producción adaptada al cliente y por el 32% de las empresas con producción repetitiva. Por otro lado, en este trabajo también se constata que, si bien el cálculo de los tiempos de ejecución y preparación, para CRP, se calculan a partir de alguna técnica de Medición del Trabajo, los tiempos de cola y transporte se suelen estimar de forma intuitiva.

El trabajo anterior fue complementado por Jonsson y Mattsson con otra publicación en el año 2003, en la que se reflejan otros resultados de la misma encuesta. En este artículo los autores se centran en el análisis de la aplicación y uso de las técnicas de capacidad en los diferentes entornos de producción. Así, según se desprende de las encuestas, CRP se aplica en todas las configuraciones productivas, si bien, la mayor proporción de usuarios satisfechos (entre un 30 y 40%) se encuentra en los entornos de fabricación por lotes (ver Tabla 1.1.).

Mét. de Planificación	Proyectos	Línea/Job-shop	Batch	Continua
CPOF	67	30	40	100
Listas de capacidad	-	25	33	0
Perfiles de recursos	40	25	0	0
CRP	10	29	40	0

Tabla 1.1. Porcentaje de empresas suecas satisfechas con el método de Planificación de Capacidad implantado, en relación al tipo de configuración productiva.

Fuente: Adaptado de Jonsson y Mattsson (2003, p. 891).

En este sentido, Chen, Fan y Chen (2009), presentan, en uno de los últimos artículos publicados sobre CRP, la aplicación práctica de esta técnica sobre un caso real, en el que el resultado es satisfactorio para la empresa, ya que se consigue equilibrar la carga durante varios días en distintos equipos y para diferentes niveles de demanda.

Por otro lado, muchos de los libros dedicados a la Dirección de la Producción y Operaciones²³ incluyen la definición y características de CRP en el capítulo dedicado a MRP o en el que se centra en la Planificación de Capacidad, situándolo dentro del sistema de Planificación y Control de la Empresa. Otros

²³ Monks (1988), Adam y Ebert (1991), Landvater (1993), Vollmann, Berry y Whybark (1993), Fernández y Vázquez (1994), Aquilano, Chase y Davis (1995), Burman (1995), Gibson, Greenhalgh y Kerr (1995), Williams (1995), Melnyk y Denzler (1996), Narasimhan, McLeavey y Billington (1996), Toomey (1996), Greene (1997), Noori y Randford (1997), Correll y Edson (1998), Nahmias (1999).

libros, sin embargo, le dan un tratamiento más extenso, explicando todo el procedimiento de cálculo utilizando para ello un ejemplo ilustrativo²⁴.

Agrupando toda la información obtenida de los trabajos analizados, hemos observado que CRP no ha cambiado prácticamente desde su definición en 1973 (Plossl y Wight, 1973), si bien pocos años después ya se publicaban trabajos en los que se cuestionaba si el esfuerzo que suponía su puesta en práctica merecía la pena. En este sentido, se han publicado muchos estudios desarrollando técnicas de capacidad finita que sustituyen a CRP²⁵. Sin embargo, dado que estas técnicas distribuyen la carga en los periodos en los que queda capacidad disponible, no nos permiten obtener información valiosa sobre el origen y comportamiento de las sobrecargas o subcargas.

1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Si bien muchos de los estudios citados en el apartado anterior, defienden las ventajas teóricas de tener implementado CRP, se puede apreciar que realmente se refieren a la necesidad de disponer de una técnica de planificación a capacidad infinita, mas que al hecho de que ésta sea CRP, habida cuenta de que siempre acaban destacando la dificultad de obtener un resultado fiable con dicha técnica, debido a la gran cantidad de inconvenientes descritos.

Constatada en el estudio bibliográfico realizado, la conveniencia de desarrollar una nueva técnica para la Planificación a Capacidad infinita, la cuestión siguiente a responder que debíamos plantearnos es si, para desarrollar esa nueva técnica, era necesario abandonar la filosofía original de MRP II y, con ella, la de CRP, derivándose hacia otras metodologías para la Planificación de la Capacidad. A este respecto, debemos recordar que CRP, junto con otras técnicas de Planificación de la Capacidad a medio y muy corto plazo, fueron los elementos que permitieron cerrar el bucle (de ahí la denominación *MRP Closed Loop*²⁶) allá por los años setenta, para lograr un sistema integrado de gestión, como fue MRP II, base fundamental de los actuales sistemas ERP. No podemos olvidar que CRP es

²⁴ Fogarty, Blackstone y Hoffmann (1991), Lunn y Neff (1992), Scout (1994), Domínguez y otros (1995b), Finch y Luebke (1995), Russell y Taylor (1995), Ptak (1997).

²⁵ Cheng (1986), McCarthy y Barber (1990), Taal y Wortmann (1997), Pandey, Yenradee y Archariyapruet (2000).

²⁶ Lunn y Neff (1992, pp. 1-2), Melnyk y Denzler (1996, pp. 796-801), Narasimham, McLeavey y Billington (1996, pp. 351-353).

el nexo de unión entre el Plan de Materiales y la posibilidad de su elaboración en el taller; ¿Cómo programar las operaciones en el día a día, si no hay unas ciertas garantías mínimas de que disponemos para ello de los recursos necesarios (capacidad en Centros de Trabajo, por ejemplo)? ¿Cómo gestionar la capacidad de forma eficiente, si no conocemos la existencia de sobrecargas o subcargas de capacidad en los Centros de Trabajo, hasta que ya se están fabricando los pedidos? ¿Cómo vamos a lograr un alto nivel de servicio, si sólo detectamos que nos falta capacidad para acabar a tiempo los pedidos, justo cuando llega el momento de emitirlos?

Por nuestra parte, entendimos que, dada la gran importancia que tiene la Planificación de Capacidad a corto plazo en entornos ERP y en configuraciones por lotes, de cara a poder llevar a la práctica de manera eficiente el Plan de Materiales (y con él, el Programa Maestro de Producción, el Plan Agregado, el Plan Estratégico y los objetivos de la empresa), merecía la pena intentar aprovechar las ventajas que según los diferentes estudios debería tener CRP, intentando evitar sus principales limitaciones. De ahí que nos planteáramos desarrollar un sistema a capacidad infinita para la Planificación de la Carga derivada del Plan de Pedidos, capaz de corregir o, al menos paliar, los inconvenientes de CRP, que esté basado en su filosofía (y, por tanto, que sea fácilmente integrable en entornos ERP) y que fuera más eficiente, fácil de aplicar y menos exigente en cuanto a los recursos, tiempo y dinero, necesarios para su implementación y uso.

Este es el fin último que persigue el presente Trabajo, dentro del cual se encuadran los objetivos que se han fijado, los cuales, aun a riesgo de ser excesivamente ambiciosos, pasamos a exponer a continuación.

Objetivo 1. Establecer las principales fuentes de la complejidad y baja eficiencia práctica de la técnica CRP. Si se desea proponer una técnica capaz de corregir o paliar los principales inconvenientes de CRP, que han llevado a su baja eficiencia e implementación, es obvio que, el primer objetivo a lograr debe ser necesariamente, identificar y analizar los elementos que se encuentran en el fondo de dicha complejidad y baja eficiencia de CRP. A este respecto, aunque muchos de ellos, como se ha podido ver en el apartado anterior, han sido identificados a través de las encuestas y estudios empíricos desarrollados, se hacía necesario un análisis teórico del grado de implicación de cada uno de dichos elementos, para lo cual es preciso:

Subobjetivo 1.1. Establecer analíticamente la determinación del tiempo de suministro planificado en condiciones de universo aleatorio, e identificar y analizar, todas y cada una de las variables que

intervienen en el proceso de cálculo de CRP. Si bien son muchos los trabajos que describen genéricamente el proceso de cálculo de CRP, no es menos cierto que dichas descripciones son bastante genéricas y no entran en el análisis de la información (variables) utilizada para los cálculos, ni mucho menos en la forma de obtenerla. Es claro que el origen de las disfunciones que pudiera devenir del proceso de cálculo de CRP, puede estar en la gran cantidad de variables que emplean, pero no lo es menos, que pudiera estar también en la forma de obtenerlas y en sus propias características. Ello obliga a conocerlas en profundidad, antes de establecer su influencia en la eficiencia de los planes desarrollados mediante esta técnica, lo cual, además, nos permitirá identificar las fuentes de la aleatoriedad del Plan de Carga determinado por CRP. Para ello, previamente, es necesario determinar analíticamente la composición del tiempo de suministro planificado, dado que todos y cada uno de los elementos que lo condicionan, son variables empleadas por la técnica que nos ocupa.

Subobjetivo 1.2. Formular analíticamente, el proceso de cálculo del Plan de Carga (capacidad necesaria) que desarrolla CRP. Como ya hemos comentado, son muchos los trabajos que describen genéricamente el proceso de cálculo de CRP, pero normalmente lo hacen basándose en un ejemplo y, desde luego, en ningún caso expresan analíticamente dicho cálculo, más allá del cálculo de la carga que una operación de un lote genera. Sin embargo, una vez se identifiquen y analicen las variables que intervienen en el proceso de cálculo de CRP, para poder demostrar la influencia que tienen en el Plan de Carga resultante de esta técnica, es necesario formular analíticamente el cálculo de dicho plan, con objeto de ver la influencia concreta de cada una de ellas sobre el mismo y sobre su eficiencia.

Subobjetivo 1.3. Analizar los orígenes de la aleatoriedad de los Planes de Capacidad (capacidad disponible) y Carga (capacidad necesaria) generados por CRP. El hecho de que el Plan de Carga calculado se cumpla, depende tanto del establecimiento acertado del valor de las cargas generadas en cada Centro de Trabajo, por las operaciones que hay que realizar a cada lote del Plan de Materiales, como de si éstas han sido adecuadamente asignadas a los momentos concretos en que han de producirse.

Subobjetivo 1.4. Formular analíticamente, la probabilidad del cumplimiento del Plan de Carga obtenido por CRP. Si uno de los principales problemas de CRP que han sido identificados por los diferentes autores, tal y como ya hemos citado en el apartado anterior, es la baja eficiencia o baja probabilidad de que se cumpla en la práctica el Plan de Carga obtenido, se hace necesario identificar de qué depende dicha probabilidad, por lo que hay que establecerla analíticamente.

Subobjetivo 1.5. Establecer desde el punto de vista teórico, la fiabilidad de la planificación elaborada por CRP, considerando el cumplimiento simultáneo de los Planes de Carga y Capacidad. Una vez formulada analíticamente la probabilidad de que se cumpla en la práctica el Plan de Carga obtenido, podremos identificar, cómo influye cada variable en la probabilidad de cumplimiento del plan, teniendo en cuenta el cumplimiento simultáneo de los Planes de Carga (tanto de la carga estimada, como de los periodos a los que se asigna) y Capacidad.

Subobjetivo 1.6. Determinar en qué casos y bajo qué condiciones, es más o menos eficiente CRP. Una vez conocido el comportamiento de la planificación elaborada en relación con todos los elementos que lo condicionan, deberíamos estar en condiciones de establecer las situaciones en las que la aplicación de la técnica CRP es o no, adecuada para la gestión de capacidad, a causa de los altos, o bajos niveles de probabilidad de cumplimiento de la planificación desarrollada.

Objetivo 2. Proponer un modelo para la Planificación de la Capacidad a corto plazo asistido por ordenador para configuraciones por lotes, basado en la filosofía de CRP, que sea capaz de lograr unos niveles de cumplimiento al menos similares a los logrados por éste, pero que sea más simple, que requiera menos recursos, tanto para su implementación como su mantenimiento, y sea utilizable incluso, por la pequeña y mediana empresa. Ello implica:

Subobjetivo 2.1. Plantear una mecánica de cálculo del Plan de Carga, que sea más simple, que use una menor cantidad de variables aleatorias y más fáciles de estimar, que las que emplea CRP. Como podremos analizar en los próximos capítulos, muchos de los inconvenientes de CRP devienen de la complejidad del proceso de cálculo del Plan de Capacidad, que requiere de una

gran cantidad de variables aleatorias, cuyos valores han de ser estimados mediante muestreos (Estudios de Tiempos, Teoría de Colas, etc.). Esto hace que, como intentaremos demostrar en el Capítulo 4, la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga elaborado por CRP sea muy baja, incluso logrando estimaciones bastante buenas de los valores de las variables. Estas estimaciones además, al ser obtenidas mediante muestreos, requieren de mucho personal especializado y tiempo; necesidad que no se limita al momento de la puesta en marcha de CRP, sino que se sostiene en el tiempo en gran medida, habida cuenta de la necesidad de mantener actualizados los valores estimados. Simplificar el proceso de cálculo pues, se vuelve fundamental en la propuesta de un modelo alternativo, como forma de emplear un menor número de variables aleatorias, cuya estimación no requiera, tantos esfuerzos y recursos. Todo ello es además, fundamental para que el modelo propuesto pueda ser aplicable en pequeñas y medianas empresas.

Subobjetivo 2.2. Completar el modelo alternativo desarrollando el software necesario para una aplicación práctica y sencilla de la mecánica de cálculo propuesta, con pocos requisitos de personal técnico, empleando además herramientas informáticas asequibles a pequeñas y medianas empresas. Obviamente, aunque la mecánica propuesta requiera menos información que la de CRP, sería impensable en la actualidad, que se llevara a la práctica manualmente. Primero, por la ineficacia de tal opción, dado el gran volumen de datos que habría que manejar. Segundo, porque la Planificación de la Capacidad a corto plazo, no es más que un elemento de los que integran el Sistema ERP (que es un sistema integrado asistido por ordenador, que enmarca el entorno en el que nos movemos en el presente trabajo), por lo que la mecánica de cálculo propuesta debe ajustarse a la secuencia de generación de la información de este Sistema (recibiendo la información de las fases de planificación que le preceden, y proporcionándola a las que le siguen). Por ambas cosas era necesario completar dicha mecánica de cálculo propuesta, con el software necesario para llevarla a la práctica²⁷, e integrar toda la información en el Sistema ERP, haciéndolo además, de manera que los requerimientos de software y hardware sean pocos y lo más

²⁷ De ahí que en múltiples ocasiones y a partir de aquí, hablaremos del **modelo alternativo** a CRP propuesto, para referirnos al conjunto de la mecánica de cálculo y el software para su aplicación, el cual permite además (ver Capítulo 5), una estimación automática de los valores medios de las variables que emplea dicha mecánica de cálculo propuesta para el desarrollo del Plan de Carga.

estándares posible. Sólo de esta forma se harían mínimas las necesidades de personal especializado y equipamientos, lo que a su vez, es condición necesaria, aunque no suficiente, para su aplicabilidad en la pequeña y mediana empresa. Y decimos que no es suficiente, porque para lograr que realmente tenga esa aplicabilidad, es necesario lograr además, que el software desarrollado:

- Subobjetivo 2.2.1. **Presente una interfaz amigable y unos menús con explicaciones que hagan fácil su utilización.**
- Subobjetivo 2.2.2. **Permita la introducción de datos de las operaciones realizadas de una forma cómoda y segura, generando una base de datos que recoja los valores históricos.**
- Subobjetivo 2.2.3. **Realice el proceso de estimación y actualización de los valores de las variables que emplea de manera automática.**
- Subobjetivo 2.2.4. **Presente la información generada de manera comprensible.**
- Subobjetivo 2.2.5. **Sea capaz de presentar amplias ayudas para que no exija al usuario un volumen de conocimientos excesivo o una amplia experiencia previa en este tipo de sistemas.**
- Subobjetivo 2.3. **Formular analíticamente la probabilidad del cumplimiento del Plan de Carga obtenido mediante el modelo alternativo propuesto.** Al igual que se explicó en el Subobjetivo 1.4. para el caso de CRP, si uno de los inconvenientes fundamentales de CRP que pretendemos paliar, es la baja eficiencia o baja probabilidad de que se cumpla en la práctica el Plan de Carga obtenido, se hace necesario identificar de qué depende dicha probabilidad en el caso del modelo alternativo propuesto, por lo que hay que definirla analíticamente.
- Subobjetivo 2.4. **Establecer desde el punto de vista teórico, la fiabilidad de la planificación elaborada por el modelo alternativo propuesto, considerando el cumplimiento simultáneo de los Planes de Carga y Capacidad.** Al igual que para CRP (Subobjetivo 1.5.), una vez formulada analíticamente la probabilidad de que se cumpla en la práctica el Plan de Carga obtenido con el modelo propuesto, podremos identificar, cómo influye cada variable en

la probabilidad de cumplimiento del plan, teniendo en cuenta el cumplimiento simultáneo de los Planes de Carga (tanto de la carga estimada, como de los periodos a los que se asigna) y Capacidad.

Subobjetivo 2.5. Determinar desde el punto de vista teórico, las ventajas e inconvenientes del modelo propuesto en relación con CRP, estableciendo en qué casos y bajo qué condiciones, es más o menos eficiente que éste.

Estos y no otros, son los objetivos que intentaremos lograr en los próximos capítulos del presente trabajo.

1.4. METODOLOGÍA

La consecución de los objetivos planteados nos lleva al uso de una metodología que ha de comenzar, necesariamente, por el empleo de una aproximación normativa destinada a coordinar y sistematizar todo el cuerpo de conocimientos relativos al ámbito de nuestro trabajo. Hemos intentado abarcar toda la bibliografía relativa a la Planificación de la Capacidad a medio y corto plazo en general, y a la Planificación de Necesidades de Capacidad en particular, incluyendo libros, artículos en revistas, actas de congresos, tesis doctorales y documentos electrónicos disponibles en Internet. Todo ello con el objeto de llegar a:

- Establecer el estado de la cuestión.
- Justificar el tema elegido.
- Describir la función de la Planificación y Control de la Producción, como contexto en el que se encuadra la Gestión de la Capacidad, la cual, a su vez, constituye la envolvente de la función que desarrolla la técnica CRP de Planificación de la Capacidad a corto plazo.
- Identificar y analizar la información requerida para el desarrollo de la Planificación de la Capacidad a corto plazo, a través de CRP.

Una vez se dispuso de toda esta información, se procedió al estudio de los elementos del sistema de Gestión de la Capacidad en entornos de fabricación por lotes que nos ocupa, dentro de la que se encuentra la Planificación de la Capacidad a corto plazo, la cual pretende establecer el Plan de Carga o, lo que es igual, la

capacidad necesaria en cada Centro de Trabajo en cada periodo del horizonte de planificación, para hacer frente al Plan de Pedidos o Plan de Materiales elaborado. Para ello aplicamos el método analítico, procediendo a descomponer el tiempo de suministro de los pedidos, en todos y cada uno de los elementos que lo componen, desarrollándose así un estudio pormenorizado de cada uno de ellos para identificar las características de su comportamiento aleatorio y de la influencia de dichos comportamientos en el del tiempo de suministro, como elemento determinante del Plan de Carga. Procedimos a continuación a la formulación analítica de los valores medios de cada uno de dichos componentes mediante la Teoría de Colas y el Estudio de Tiempos, para, a continuación, formular matemáticamente, la determinación del tiempo de suministro planificado en universos aleatorios.

Dicha formulación nos sirvió como punto de partida para representar matemáticamente la mecánica de cálculo de CRP, tanto de las cargas derivadas de de los pedidos a fabricar, como de su distribución a lo largo del tiempo de suministro. Dicha formulación constituye el punto de partida para, a continuación, formular la probabilidad de cumplimiento de los Planes de Carga y Capacidad elaborados mediante CRP, y la probabilidad de cumplimiento simultáneo de ambos planes, como indicativo de la fiabilidad de la planificación desarrollada con dicha técnica.

Tras el análisis de la fiabilidad de la planificación elaborada mediante CRP, siguiendo la metodología de simulación asistida por ordenador, desarrollamos un modelo que pretende simular las cargas que genera en cada Centro de Trabajo cada uno de los pedidos que componen el Plan de Materiales, así como los momentos del tiempo concretos en que se producirían dichas cargas, siguiendo así la filosofía general de la Gestión de la Capacidad en entornos MRP II/ERP al igual que CRP, pero de manera que se redujera el volumen de información y la mecánica de cálculo a emplear, para obtener un Plan de Carga que alcance unos niveles de cumplimiento similares, o incluso superiores, a los obtenidos mediante dicha técnica CRP, pero con menor complejidad, coste, tiempo y esfuerzo. Dicho modelo ha sido programado en Visual Basic de Microsoft® Access® (incluida en el paquete Microsoft® Office®), en su versión Office 2003 para Windows® 2003/XP/NT, con objeto, como expresamos en el apartado anterior, de que su utilización práctica fuera sencilla, con pocos requisitos de personal técnico y usando herramientas informáticas estándares y asequibles a pequeñas y medianas empresas.

Obviamente, se hacía necesario comparar el modelo propuesto con la técnica CRP. Siguiendo la misma metodología y bajo las mismas hipótesis de partida que se usaron para determinar la probabilidad de cumplimiento de los Planes de Carga y Capacidad obtenidos mediante CRP, formulamos analíticamente la probabilidad del cumplimiento de dichos planes con el modelo propuesto.

Mediante la comparación de la formulación desarrollada para CRP y el modelo propuesto, pudimos obtener conclusiones sobre la bondad de ambas técnicas de cara a la resolución del problema estudiado, bajo la hipótesis de que es igual la probabilidad de cumplimiento del valor estimado de cada una de las variables empleadas por CRP y por el modelo alternativo propuesto.

Además, para ampliar las características para las que se comparan ambas técnicas, se utilizó el método de simulación para realizar dicha comparación para diferentes ámbitos o tipologías de entornos productivos (caracterizadas por la profundidad de las Listas de Materiales, el número de pedidos a procesar por ítem, el número de Centros de Trabajo que se utilizan, el número de operaciones a realizar por ruta, etc.), con objeto de establecer en cada uno de ellos las ventajas e inconvenientes de cada modelo con respecto al otro.

1.5. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El trabajo que presentamos ha quedado configurado en cinco partes, a las que se ha añadido varios anexos, entre los que destaca un Manual de Usuario para el prototipo del programa informático, incluido en un CD adjunto, el cual ha sido diseñado para la aplicación práctica del modelo de Planificación de Capacidad que se ha desarrollado en este trabajo.

Así, la **primera parte**, que es la que nos ocupa, se ha dedicado al análisis bibliográfico, al establecimiento del estado de la cuestión y a la justificación del tema elegido para, a continuación, plantear los objetivos y describir la metodología utilizada, finalizando con la descripción de los distintos aspectos contenidos en el presente trabajo.

El análisis de la Gestión de la Capacidad es el objeto de la **segunda parte**, dentro de la Planificación y Control de la Producción, centrándonos en la Planificación Detallada o a corto plazo, que es en la que se encuadran CRP y el modelo alternativo propuesto; todo ello, con objeto de analizar la función de la Dirección de Operaciones a la que nos enfrentamos, así como sus elementos fundamentales, dado que la una y los otros condicionan sobremanera el trabajo a desarrollar, puesto que establecen los nexos de unión de la planificación detallada de la capacidad con el resto de las funciones de la Planificación y Control de la Capacidad, así como su misión y el papel que juega en configuraciones productivas que nos ocupan. Además, en esta parte del trabajo se realiza un análisis de la técnica de Planificación de Necesidades de Capacidad (*Capacity Requirements Planning* –CRP–), de sus entradas y salidas, de su mecánica de cálculo del Plan de

Carga, así como de sus ventajas e inconvenientes; todo ello situándola en el contexto de los Sistemas Integrados de Gestión y Control de la Producción y bajo un enfoque jerárquico, tal como el de MRP II o ERP y, en configuraciones *job-shop*.

El análisis de la eficacia y utilización de CRP se ha realizado en la **tercera parte** de este trabajo. De esta manera, el estudio del procedimiento de cálculo seguido por esta técnica nos remite las posibles fuentes de aleatoriedad, las cuales están directamente relacionadas con el tiempo de suministro que esta técnica pretende simular componente a componente, en la asignación en el tiempo de las cargas calculadas. Por este motivo, el Capítulo 3 se ha dedicado al estudio de las variables que componen el tiempo de suministro, analizando características y los condicionantes de su aleatoriedad, como elementos fundamentales para poder estudiar la probabilidad de cumplimiento de los planes elaborados por CRP, que es el objeto fundamental del Capítulo 4. En él se desarrolla la variabilidad de dichos planes a través del estudio analítico e individualizado de sus probabilidades de cumplimiento para, posteriormente, estudiar el nivel de fiabilidad de la planificación elaborada, considerando el cumplimiento simultáneo de los Planes de Carga y Capacidad.

Tras el análisis completo de las características y fiabilidad de la técnica CRP, se ha destinado la **cuarta parte** de este trabajo a la propuesta de un modelo de planificación detallada de capacidad, para configuraciones por lotes que, con un menor número de variables aleatorias y cálculos más simples, elabore una Planificación de Capacidad que consiga unos niveles de cumplimiento similares o incluso superiores a los obtenidos mediante CRP. Para ello se describe la mecánica alternativa propuesta para el cálculo del Plan de Carga, se analiza el software elaborado para su aplicación, y se desarrolla un estudio comparativo de este sistema con CRP, intentando establecer las principales ventajas e inconvenientes de cada uno con respecto al otro.

Dedicamos la **quinta parte** a exponer las principales conclusiones a las que creemos haber llegado con el presente trabajo, así como a establecer sus principales limitaciones y las futuras líneas de investigación que podrían darle continuidad.

Por último, hemos añadido a nuestro trabajo seis anexos que, además de buscar la mayor comodidad del lector, pretenden cada uno de ellos hacer frente a otras necesidades. Así:

- El **Anexo 1** incluye una guía breve de instalación y un manual de uso de la aplicación informática que incluye el modelo de Planificación de Capacidad a corto plazo desarrollado en este trabajo.

- El **Anexo 2** intenta reproducir con un breve ejemplo, la mecánica detallada de cálculo del Plan de Carga que elabora CRP. Mecánica detallada que es fundamental para la comprensión de todo el estudio que lleva al establecimiento de la fiabilidad de esta técnica, además de para poder aprehender en toda su complejidad, su comparación con el modelo propuesto. Es básica pues, para varios de los capítulos del presente trabajo, por lo que hemos preferido incorporarla como un Anexo.
- En el **Anexo 3** se identifica toda la nomenclatura empleada en las fórmulas y explicaciones que se han ido desarrollando a lo largo de este trabajo, con objeto de que el lector pueda consultarlas en cualquier momento.
- El **Anexo 4** se ha utilizado para el desarrollo analítico de la probabilidad de cumplimiento del ejemplo utilizado en el Apartado 4.4., dada la complejidad de éste.
- En el **Anexo 5** se presentan los resultados graficados de la simulación realizada para analizar la reducción en el número de variables aleatorias que se consigue con la utilización del modelo de Planificación de Capacidad desarrollado en vez de CRP.
- El **Anexo 6** engloba toda la bibliografía utilizada en el desarrollo de este trabajo de investigación.
- Por último hemos añadido, como **Anexo 7**, un CD con el software diseñado para la aplicación informática del modelo de planificación de capacidad a corto plazo que se desarrolla en este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, F. P. y COX, J. F. (1985), "Manufacturing resource planning: An information systems model", *Long Range Planning*, Vol. 18, No. 2, pp. 86-92.
- BELT, B. (1976), "Integrating Capacity Planning and Capacity Control", *Production and Inventory Management*, Vol. 17, No. 1, pp. 9-25.
- BENDOLY, E. y SCHOENHERR, T. (2005), "ERP system and implementation-process benefits: implications for B2B e-procurement", *International*

- Journal of Operations & Production Management*, Vol. 25, No. 4, pp. 304-319.
- BERNARD, P. (1990), "Inaccurate Schedules? Check Your CRP Logic", *Production & Inventory Management Review & Apics News*, Vol. 10, No. 1, pp. 37-40.
- BERRY, W. L., SCHMITT, T. G. y VOLLMANN, T. E. (1982), "Capacity Planning Techniques for Manufacturing Control Systems: Information Requirements and Operational Features", *Journal of Operations Management*, Vol. 3, No. 1, pp. 13-25.
- BURCHER, P. G. (1992), "Effective Capacity Planning", *Management Services*, Vol. 36, No. 10, pp. 22-25.
- CHEN, T. C. E. (1986), "Capacity requirements planning by stochastic linear programming", *Mathematical Modelling*, Vol. 7, No. 2-3, pp. 443-448.
- CLASSEN, R. J. y MALSTROM, E. M. (1982), "Effective Capacity Planning for Automated Factories Requires Workable Simulation Tools and Responsive Shop Floor Controls", *Industrial Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 73-77.
- CRANDALL, R. E. (2006), "The epic life of ERP", *APICS magazine*, Feb, pp. 17-20.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A., y otros (1995a), *Dirección de Operaciones. Aspectos estratégicos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A., y otros (1995b), *Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- FOLEY, M. J. (1988), "The Winds of Change Are Blowing for MRP II Users", *Datamation*, Vol. 34, No. 3, pp. 19-21.
- HOUGHTON, E. y PORTOUGAL, V. (1995), "A planning model for just-in-time batch manufacturing", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 9, pp. 9-26.
- HUNG Y. F. y CHIEN K. L. (2000), "A multi-class multi-level capacitated lot sizing model", *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, No. 11, pp. 1309-1318.
- JONSSON, P. y MATTSSON, S. (2002), "Use and applicability of capacity planning methods", *Production and Inventory Management*, Vol. 43, No. 3/4, pp. 89-95.
- JONSSON, P. y MATTSSON, S. (2003), "The implications of fit between planning environments and manufacturing planning and control methods", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 23, No. 8, pp. 872-900.
- KREPCHIN, I. P. (1989), "Using Computers for Planning and Control", *Modern Materials Handling*, Vol. 44, No. 13, pp. 68-71.

- LEE, C. Y. (1993), "A recent development of the integrated manufacturing system: A hibrid of MRP and JIT", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 13, No. 4, pp. 3-18.
- LUNN, T. y NEFF, S. A.. (1992), *MRP Integrating Material Requirements Planning And Modern Business*, Irwin, New York.
- MCCARTHY, S. W. y BARBER, K. D. (1990), "Medium to short term finite capacity scheduling: a planning methodology for capacity constrained workshops", *Engineering Costs and Production Economics*, Vol. 19, No. , pp. 189-199.
- MELNYK, S. A. y DENZLER, D. R. (1996), *Operations Management*, Irwin, New York.
- MUSCATELLO, J. R., SMALL, M. H. y CHEN, I. J. (2003), "Implementing enterprise resource planning (ERP) systems in small and midsize manufacturing firms", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 23, No. 8, pp. 850-871.
- NARASIMHAN, S. L., MCLEAVEY, D. W. y BILLINGTON, P. J. (1996), *Planeación de la Producción y Control de Inventarios*, Prentice Hall, Naupalcan de Juárez, Mexico.
- ORLICKY, J. (1975), *Material Requirements Planning*, McGraw Hill, New York.
- PANDEY P. C., YENRADEE P. y ARCHARIYAPRUEK S. (2000), "A finite capacity material requirements planning system", *Production Planning and Control*, Vol. 11, No. 2, pp. 113-121.
- PLOSSL, G. y WIGHT, O. W. (1973), "Capacity Planning and Control", *Production and Inventory Management*, Vol. 14, No. 3, pp. 31-68.
- PTAK, C. A. (1997), *MRP and Beyond*, McGraw-Hill, New York.
- SCHMITT, T. G., BERRY, W. L. y VOLLMANN, T. E. (1984), "An Analysis of Capacity Planning Procedures for a Material Requirements Planning System", *Decision Sciences*, Vol. 15, No. 4, pp. 522-541.
- TAAL, M y WORTMANN, J. C. (1997), "Integrating MRP and finite capacity planning", *Production Planning & Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 245-254.
- THOMPSON, K. (1983), "MRP II in the Repetitive Manufacturing Environment", *Production and Inventory Management*, Vol. 24, No. 4, pp. 1-14.
- WALLACE, T. y KREMZAR, M. (2001), *ERP: Making it Happen*, John Wiley & Sons, New York.
- WIGHT, O. W. (1981), *MRP II, Unlocking America's Productivity Potential*, CBI Publishing, Mass, Boston.

PARTE II

UNA INTRODUCCIÓN A LA PLANIFICACIÓN DE NECESIDADES DE CAPACIDAD (CRP)

CAPÍTULO

2

LA PLANIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD A CORTO PLAZO: LA TÉCNICA CRP

2.1. INTRODUCCIÓN: LA GESTIÓN DE LA CAPACIDAD EN EL CONTEXTO DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN

Como podemos observar en la literatura sobre el tema¹, bajo la consideración de un enfoque jerárquico (integración vertical), el Proceso de Planificación y Control de la Producción (en adelante PPCP), puede ser estructurado de diferentes formas, si bien las diferencias entre las propuestas de los diferentes autores no son sustanciales. De entre ellas, nos decantamos por la de Domínguez y otros (1995b, pp. 3-12), para el caso más complejo de una empresa de fabricación (Figura 2.1.).

No obstante, la aproximación jerárquica es condición necesaria, pero no suficiente, para lograr la integración de las diferentes fases del PPCP, dado que, en sentido estricto, solo contemplaría la integración en sentido vertical, de lo global a lo concreto. Tan importante como ésta sería la horizontal, es decir, la que ha de

¹ Véase, por ejemplo, Mackulak y otros (1980, pp. 455 y ss.), Gelders y Van Wassenhove (1982, pp. 27 y ss.), Erschler y otros (1986, pp. 464 y ss.), Vollmann, Berry y Whybark (1995, pp. 4 y ss.) o Heizer y Render (2001, pp. 115 y ss.).

darse entre las distintas áreas funcionales de la empresa; por ello, el PPCP debe desarrollarse de forma coordinada con aquéllas, pues influirán en el mismo, tanto más cuanto más alto sea el nivel de planificación en que nos encontremos.

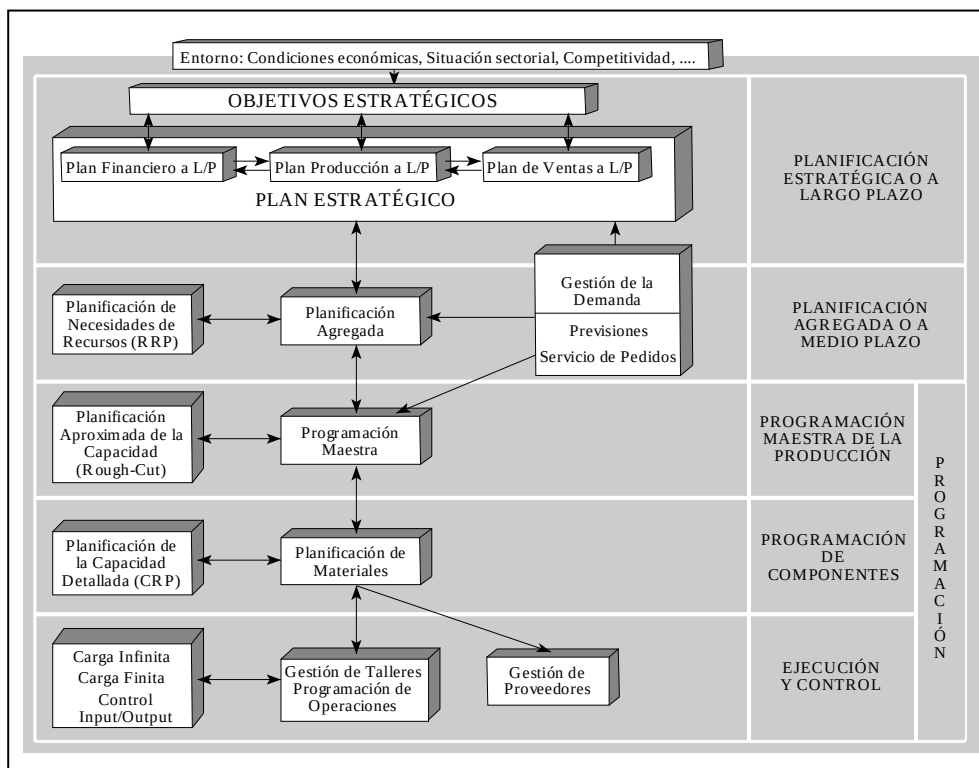


Figura 2.1. Estructura de un sistema jerárquico de Planificación y Control de la Producción.

Fuente: Domínguez y otros (1995b, p. 9).

Como se observa en la Figura 2.1., Domínguez y otros diferencian cinco fases en el proceso de Planificación y Control de la Producción:

- Planificación estratégica o a largo plazo.
- Planificación táctica o a medio plazo.
- Programación Maestra.
- Programación de componentes.
- Ejecución y Control.

Estas fases se llevarán a cabo en cualquier empresa manufacturera, independientemente de su tamaño y actividad aunque, lógicamente, la forma en que éstas las desarrollen dependerá de las características propias de cada sistema productivo. En el caso de las empresas de servicios el proceso será, normalmente, más simple que el expuesto en la Figura 2.1. Estudiaremos a continuación las distintas fases que pueden formar parte de un sistema de Planificación y Control de la Producción.

2.1.1 Planificación Estratégica o a largo plazo

La primera fase de la Planificación y Control de la Producción parte de los objetivos estratégicos de la empresa para elaborar, a continuación, el Plan Estratégico (o Plan de Empresa), mediante la coordinación de los planes de producción, ventas y financiero a largo plazo. El Plan de Producción Estratégico o a largo plazo nos indicará las cantidades a obtener, en cifras trimestrales o anuales muy agregadas (tipos de producto) y debe llevarse a cabo con la ayuda de la Estrategia de Operaciones. Ésta se puede definir como un *“plan a largo plazo para el Subsistema de Operaciones, en el que se recogen los objetivos a lograr y los cursos de acción, así como la asignación de recursos a los diferentes productos y funciones. Todo ello debe perseguir el logro de objetivos globales de la empresa en el marco de su Estrategia Corporativa, constituyendo, además un patrón consistente para el desarrollo de las decisiones tácticas y operativas del Subsistema”* (Domínguez y otros, 1995a, p. 72).

En este nivel de planificación, las actividades de la producción se centrarán en el desarrollo de nuevos productos o modificación de los existentes, en tecnologías y procesos, así como en la valoración de las necesidades de capacidad derivadas del plan a largo plazo. Se estudiará la conveniencia o no de crear nuevas instalaciones o modificar las existentes, la elección del lugar o localización donde colocar las instalaciones y la distribución interna de éstas. Todo ello dentro del contexto establecido por las prioridades competitivas de la empresa.

Nos parece conveniente, al objeto de delimitar el ámbito de aplicación de nuestro estudio y definir conceptos que serán utilizados con posterioridad, ahondar en las características productivas de la empresa que restringen su estrategia de proceso (o de transformación), es decir, en el enfoque que adopta una organización para transformar recursos en bienes y servicios. El objetivo de una estrategia de proceso es encontrar una forma de producir bienes (o configuración productiva) que satisfagan las necesidades de los clientes y las especificaciones de los

productos, a un coste concreto y bajo determinadas restricciones de gestión². El proceso seleccionado tendrá efectos a largo plazo en las actividades, eficiencia y producción de la organización, así como en la flexibilidad, coste y calidad de los bienes producidos.

Si bien existen multitud de clasificaciones para las configuraciones productivas³, el criterio más adecuado para nuestro propósito, es el de la continuidad en la obtención del producto, diferenciando tres grupos⁴:

- Configuraciones por proyectos: donde se encargan los productos individualmente, adaptándose a los requerimientos específicos de cada cliente. Se elabora poca cantidad de un gran número de productos (generalmente con un período de fabricación largo).
- Configuraciones por lotes: en las que una misma instalación puede ser utilizada para realizar varias operaciones a distintos artículos (que pueden ser más o menos homogéneos). Este tipo de configuración puede dividirse, a su vez, en configuración por proceso o *job-shop* (que engloba las configuraciones por talleres y en *batch*) y configuración en línea.
- Configuraciones continuas: que se centran en fabricar grandes cantidades de una pequeña variedad de productos (asignando, generalmente una instalación a cada producto).

Un método, que nos permite realizar una comparación entre los distintos tipos de configuraciones productivas, consiste en colocarlas en el siguiente orden: por proyecto, por talleres, en *batch*, en línea y continua; de manera que, el traslado de izquierda a derecha, indica: el aumento del volumen de producción, la automatización y homogeneización de los procesos, la repetitividad de las operaciones, la inversión en capital y la estandarización del producto, reduciéndose la flexibilidad del proceso y la participación del cliente en éste (véase Figura 2.2.).

² En muchas ocasiones la selección y diseño de productos y la elección y diseño del proceso productivo se desarrollan simultáneamente debido a la gran interrelación que existe entre las decisiones que se toman y a la necesidad de acelerar el proceso de diseño y desarrollo de un producto.

³ Véase, por ejemplo, Woodward (1965), Hayes y Wheelwright (1984), Adam y Ebert (1991), Markland, Vickery y Davis (1995), Domínguez y otros (1995a), Melnyk y Denzler (1996), o Heizer y Render (2001).

⁴ Seguimos como base la clasificación de Domínguez y otros (1995a, p. 142).

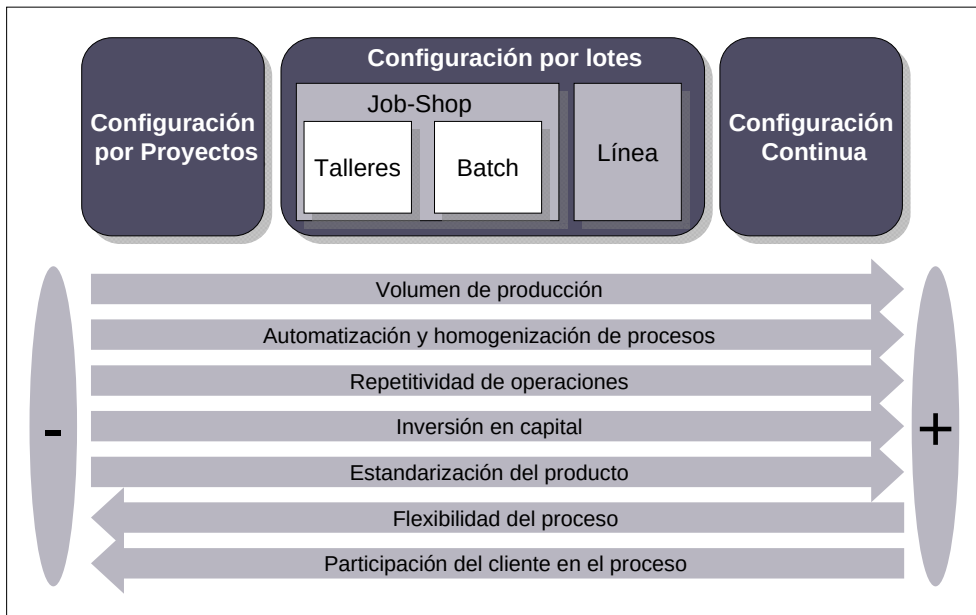


Figura 2.2. Comparativa de las configuraciones productivas.

Fuente: Adaptado de Domínguez, 1995a, p. 151.

Para nuestro trabajo, es conveniente incidir en las características de las configuraciones productivas por lotes, ya que nos moveremos fundamentalmente dentro de este ámbito. El hecho diferenciador de este tipo de configuraciones está en que “*se utilizan las mismas instalaciones para la obtención de múltiples productos*” (Domínguez y otros, 1995b, p. 143). A estas instalaciones se les suele llamar Centros de Trabajo, y pueden estar formados por:

- Una máquina o grupo de máquinas que realizan un trabajo similar.
- Una célula compuesta por un grupo de máquinas similares que desarrollan un flujo de trabajo.
- Una línea de fabricación.

Nos referimos, por lo tanto, a cualquier unidad productiva identificable; en función del caso, podrá incluir una máquina, un conjunto de ellas, un taller, un conjunto de talleres o, incluso, una instalación completa. Su entidad dependerá del detalle requerido en el nivel de planificación. El propósito de definir el Centro de Trabajo es permitir considerarlo como una unidad en el momento de realizar la planificación. En las configuraciones por lotes, un Centro de Trabajo puede ser

utilizado para realizar varias operaciones a distintos artículos⁵; llegado un lote de un ítem, se le realizará la operación correspondiente a cada una de las unidades que lo componen y a partir de ese momento podrá procesarse otro lote.

2.1.2. Planificación táctica o a medio plazo

Si bien no es imprescindible la elaboración de planes a medio plazo, su desarrollo suele ayudar a vincular el Plan de Producción a largo plazo con la planificación operativa. En esta fase se concreta algo más el primero de ellos estableciendo, todavía en unidades agregadas (familias de productos), pero para períodos más cortos (normalmente mensuales, aunque pueden ser inferiores), los valores de las principales variables productivas (cantidades de productos, volumen de inventarios de productos finales, nivel de mano de obra, etc.), teniendo en cuenta la capacidad disponible e intentando que permitan cumplir el Plan a largo plazo al menor coste posible. Para ello deben tenerse en cuenta también las previsiones de demanda para los plazos y unidades de que conste el Plan. Esta etapa, que también se denomina planificación a medio plazo, finaliza con el establecimiento de dos planes agregados: el de producción y el de capacidad.

Puesto que será difícil conseguir el mencionado grado de concreción para períodos que vayan más allá de un año o año y medio (horizonte típico del Plan Agregado), estos planes sólo abarcarán la primera parte del Plan de Producción a largo plazo (ahora bien, hay que recalcar que deberán coincidir las respectivas cifras de producción total para el mencionado período). En cuanto al Plan Agregado de Capacidad, deberá tenerse en cuenta que, para el horizonte en cuestión, la capacidad de las instalaciones se considerará dada, permitiéndose sólo medidas de ajuste transitorio que no afecten a la estructura productiva fija; con ellas se asegurará la factibilidad del Plan Agregado de Producción mediante la denominada Planificación de las Necesidades de Recursos (*Resource Requirements Planning*). Si ello no es posible, habría que modificar el Plan Agregado de Producción y, con él, los planes del nivel estratégico.

⁵ En este sentido también se refieren, entre otros, Goddard (1984, p. 55), Lunn y Neff (1992, p. 131) o Landvater (1993, p. 166).

2.1.3. Programación Maestra

La Programación Maestra de la Producción (*Master Production Schedule*) se realiza a nivel operativo y tiene como fin desagregar las distintas familias en productos concretos y períodos, generalmente, semanales. Las estimaciones de demanda a corto plazo, de las unidades que se incluirán en el Programa Maestro, permiten la actualización de los datos utilizados para su elaboración. El horizonte de planificación de esta programación de la producción no suele superar el año, puesto que raramente podría asegurarse la concreción requerida para períodos de tiempo superiores.

Aun cuando ya se aseguró la factibilidad del Plan Agregado en relación con la capacidad en el nivel anterior, habrá que hacer lo mismo para el Programa Maestro mediante la Planificación Aproximada de la Capacidad (*Rough-cut*). Ello es debido, por una parte, a que el nivel de desagregación es mayor (en productos y períodos de tiempo) y, por otra, al hecho de que, aunque la capacidad disponible para períodos mensuales sea suficiente de forma agregada, ello no quiere decir que no puedan existir desajustes semanales. Si existiesen problemas de factibilidad no resolubles a este nivel podría ser necesario rehacer el Plan Agregado, ya que debe darse compatibilidad entre ambos.

2.1.4. Planificación de Materiales

El Programa Maestro de Producción es una de las entradas necesarias para la elaboración del Plan de Materiales o Plan de Pedidos, objeto de la fase de la Planificación de Materiales o Programación de Componentes. En este nivel se realizará una programación detallada (en cantidades y momentos de tiempo) de los componentes que integran los distintos productos y la Planificación Detallada de la Capacidad requerida por los mismos. Siguiendo el enfoque jerárquico, si existen problemas irresolubles de disponibilidad respecto a la capacidad existente, el Programa Maestro de Producción deberá ser reajustado.

El uso de la Planificación de Necesidades de Capacidad (CRP), como técnica de Planificación Detallada de Capacidad, es apropiado en configuraciones productivas por lotes y entornos MRP⁶, los cuales serán analizados en el apartado siguiente. No obstante, algunos autores⁷ concretan que el ámbito de aplicación más

⁶ De bucle cerrado o MRP II (Manufacturing Resource Planning).

⁷ Véase, por ejemplo, Oden, Langenwalter y Lucier (1993, p. 179), Domínguez y otros (1995b, p. 155) o Bicheno y Elliot (1997, p. 439).

adecuado para la técnica CRP, son empresas manufactureras con configuraciones productivas por lotes, que disponen de listas de materiales muy largas y multitud de instalaciones que planificar.

2.1.5. Ejecución y Control

La última fase de la Planificación y Control de la Producción, reflejada en la Figura 2.1., implicará la ejecución y control del Plan de Materiales. Para ello, éste se traducirá, por un lado, en una programación de operaciones en los Centros de Trabajo, que tenga en cuenta las prioridades de fabricación y, por otro, en las acciones de compra de las materias primas y componentes que se adquieren en el exterior. También será necesario realizar aquí un control de la capacidad, pero aún más detallado (por ejemplo, Control Input/Output), el cual proporcionará retroalimentación a este nivel y a los niveles superiores. Hay que hacer notar que esta fase no es estrictamente de ejecución y control aunque sea ésta su denominación más extendida, pues, como acabamos de ver, también se realizan actividades de programación a nivel muy detallado.

2.2. FILOSOFÍAS DE LA PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN EN ENTORNOS DE FABRICACIÓN DISCRETA

La complejidad de los sistemas productivos y la difusión de la utilización de los ordenadores, hacen cada vez más imperante la utilización de medios informáticos para resolver los problemas de planificación y coordinación de las operaciones y de los aprovisionamientos y el control de inventarios. Los sistemas informatizados integrados de Planificación y Control de la Producción con mayor grado de implantación, en entornos de fabricación discreta, son los sistemas MRP II/ERP (*Manufacturing Resource Planning/ Enterprise Resource Planning*), JIT (*Just in Time*) y OPT/TOC (*Optimized Production Technology/Theory Of Constrains*)⁸. A estos sistemas, considerados tradicionalmente, se les deben añadir sistemas híbridos que pretenden agrupar las ventajas de varios de ellos, reduciendo sus inconvenientes.

⁸ Véanse estudios comparativos de los distintos sistemas, por ejemplo, en Plenert y Best (1986), Johnson (1986), Fogarty, Blackstone y Hoffman (1991, pp. 649-656), Ptak (1991), Díaz (1993, pp. 357-384) o Plenert (2002, pp. 9-15).

No obstante, según Browne, Harhem y Shivnan, “MRP, JIT y OPT no son tecnologías rivales. Cada una es diferente en términos de su ámbito de aplicación, es decir, en el tipo de problemas que intentan resolver, en los entornos o configuraciones donde han sido aplicados y en su habilidad para adecuarse a un entorno de integración creciente”⁹.

Una de las primeras empresas en trabajar en el área de la fabricación discreta fue IBM, donde Joseph Orlicky y otros colaboradores desarrollaron el sistema de Planificación de las Necesidades de Materiales MRP (*Material Requirements Planning*). Aprovechando que la mayoría de los artículos que se utilizan en el proceso productivo tienen demanda dependiente, el MRP pretendía mejorar la gestión de los inventarios mediante una programación en el tiempo de las órdenes de pedido o fabricación; de forma que los componentes y materias primas se encuentren disponibles en el momento en que son necesarios para llevar a cabo las actividades de producción y poder atender la demanda de productos terminados. El originario sistema MRP fue ampliado, incorporando técnicas de gestión de talleres y la Planificación de Capacidad, dando lugar al MRP de Bucle Cerrado (*MRP Closed Loop*)¹⁰. Posteriormente aparece el MRP II (*Manufacturing Resource Planning*) o Planificación de Recursos de Fabricación, como un modelo de sistema de información para el entorno productivo. El MRP II provee a la empresa de una base de datos común, que permite el acceso a la información de las áreas comercial, financiera, ingeniería, ventas y personal. “Este modelo es dinámico, en el sentido de que puede simular diferentes estrategias, el impacto de los objetivos tanto a corto como a largo plazo y formular nuevos planes en el caso de que sea necesario” (Adams y Cox, 1985, p. 86). Con posterioridad, en 1991, los sistemas MRP se pueden englobar dentro del *Enterprise Resource Planning* (ERP), el cual se utiliza como herramienta para la Gestión Integrada de la Empresa.

Si bien, inicialmente, la aplicación de los sistemas MRP se centraba principalmente en las empresas manufactureras con configuraciones productivas del tipo *job-shop*, con mayores problemas en la Planificación de Materiales, la atención sobre la planificación y control de inventarios de otro tipo de empresas ha originado la adecuación del MRP a diferentes formas de producir, como en entornos de fabricación repetitiva y empresas de servicios¹¹.

⁹ Browne, Harhem y Shivnan (1996, p. 341). En este sentido también se refiere Plenert y Kirchmier (2000, pp. 68-69).

¹⁰ Referido por primera vez en Orlicky (1975, p. 244).

¹¹ Así, por ejemplo, Thompson (1983) realiza un estudio del MRP en configuraciones en línea y Wacker (1985), Khumawala, Hixon, y Law (1986) y Pope y Wermus (1993), analizan la adaptación del sistema MRP a empresas de servicios.

Simultáneamente a la mejora e incorporación de nuevas funciones de los sistemas MRP, empezó a tener importancia, en la década de los 80, la filosofía Justo a Tiempo o *Just in Time* (JIT), que tenía su origen en Japón¹². Se trata de un conjunto integrado de actividades diseñado para alcanzar un alto volumen de producción, empleando para ello un inventario mínimo que llega al puesto de trabajo justo a tiempo. Esta filosofía, pretende eliminar toda fuente de despilfarro o de coste innecesario, entre las que se encuentran los defectos, los tiempos inoperativos, los inventarios, los plazos y el papel o la burocracia¹³.

La Teoría de las Limitaciones (*Theory Of Constraints –TOC-*) y en su vertiente productiva la Tecnología de Producción Optimizada (*Optimized Production Technology –OPT-*), desarrollada por Goldratt¹⁴, tienen como objetivo conseguir un movimiento ágil y sincronizado de los materiales e ítems a lo largo del proceso productivo. La Teoría de las Limitaciones tiene como base: por un lado la visión limitada de la realidad empresarial de los trabajadores que no se encuentran en la cúspide de la estructura jerárquica; y por otro lado, la existencia de eslabones débiles o limitaciones, que forman parte de la cadena de acciones que configuran un proceso productivo. No obstante hay autores que no consideran la TOC/OPT como un sistema integrado de Planificación y Control de la Producción, sino, más bien una herramienta de ayuda o apoyo a otros sistemas. En esta línea se expresan Vollmann, Berry y Whybark, considerando que si bien “*algunas personas lo vieron como un sustituto de un sistema de Planificación y Control de la Producción integrado, en realidad eso no es correcto [...], esto es, que el OPT efectúa muchas funciones de la estructura de Planificación y Control de la Producción, pero no todas*”¹⁵. En este mismo sentido, Larrañeta lo define como “*un sistema informático de programación y control de la producción que proclama como principal característica el tener en cuenta, explícitamente, las consideraciones de capacidad para obtener el programa detallado de lanzamiento de órdenes*”¹⁶.

¹² La empresa pionera en la aplicación de esta filosofía de fabricación fue Toyota, siendo el sector del automóvil en el que, actualmente alcanza un mayor grado de implantación de la filosofía JIT.

¹³ Véase la teoría de los cinco ceros de Archier y Seryex citada en Domínguez y otros (1995b, p. 203).

¹⁴ Goldratt y Cox (1986).

¹⁵ Vollman, Berry y Whybark (1991, pp. 824-825).

¹⁶ Larrañeta y otros (1988, pp. 271-276).

2.3. TÉCNICAS DE PLANIFICACIÓN DE CAPACIDAD A MEDIO Y CORTO PLAZO

En la Figura 2.3. se resumen las fases del proceso de Planificación y Control de la Producción junto con los planes que de ellas se derivan, relacionando los niveles de planificación empresarial y la planificación y gestión de la capacidad.

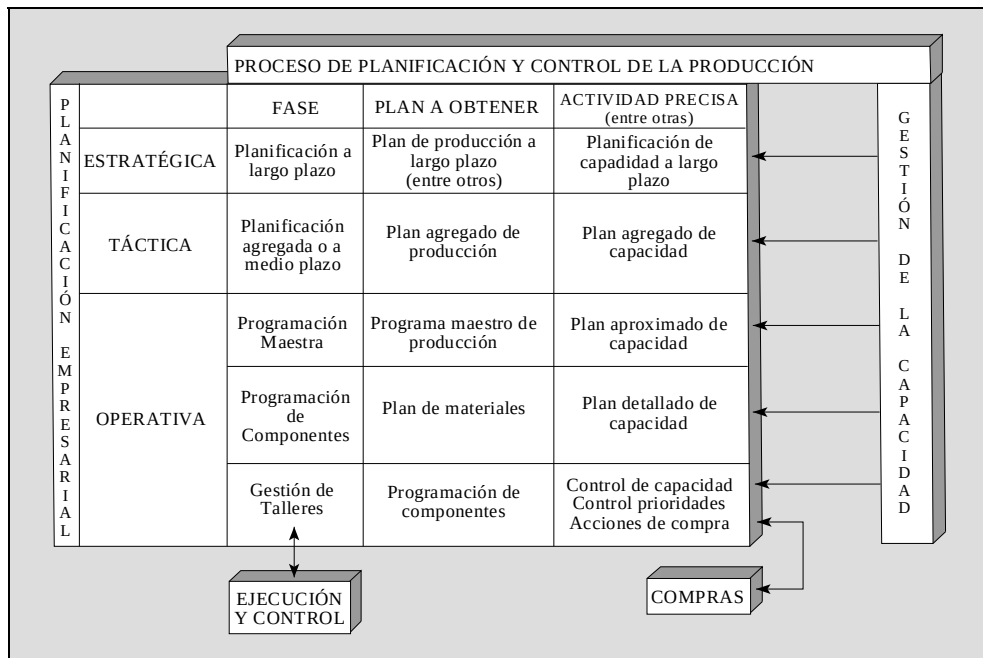


Figura 2.3. Planificación Empresarial y Planificación y Control de la Producción.

Fuente: Domínguez y otros (1995b, p. 12).

Las técnicas de Gestión de la Capacidad, son un conjunto de actividades encaminadas a “realizar la conversión de la producción programada en necesidades de capacidad, estimar la capacidad disponible y tomar decisiones sobre las acciones a desarrollar para ajustar la capacidad disponible y la necesaria” (Wemmerlöv, 1984, p. 6).

Para predecir la capacidad requerida en un Centro de Trabajo, en el entorno MRP, la empresa puede utilizar distintas técnicas, cuyas diferencias radican, principalmente, en la cantidad de información necesaria y el nivel de agregación con el que se trabaje. Las técnicas de Planificación de Capacidad, de uso más

común en el medio y corto plazo¹⁷, que se utilizan para calcular la carga de los Centros de Trabajo por separado, ordenadas en función de su nivel de desagregación, son las siguientes:

- Planificación de Capacidad usando Factores Agregados (*Capacity Planning using Overall Factors –CPOF-*).
- Lista de Capacidad.
- Perfiles de Recursos.
- Planificación de Necesidades de Capacidad (CRP).

Las tres primeras técnicas se agrupan dentro de las llamadas técnicas *Rough-cut*, y se utilizan principalmente para la elaboración de los Planes Agregados y Aproximados de Capacidad. A diferencia de éstas, la Planificación de Necesidades de Capacidad tiene las siguientes características:

- Elabora un Plan Detallado de Capacidad.
- Calcula la carga para todos los ítems y todos los Centros de Trabajo¹⁸, no sólo para los más importantes o para los críticos¹⁹.
- Tiene como origen el Plan de Materiales, en vez del Programa Maestro de Producción.
- Considera los pedidos en curso de todos los ítems para calcular la carga, estableciendo el lugar en el que se encuentran de su ruta.
- Puesto que se basa en el MRP, considera las unidades que se encuentran en almacén y las llegadas previstas de lotes de los distintos ítems.

¹⁷ Véase, por ejemplo, Schmitt, Berry y Vollmann (1984), Wemmerlöv (1984) o Domínguez y otros (1995b).

¹⁸ Goddard (1986), Oden, Langenwalter y Lucier (1987) y Plenert (1992).

¹⁹ No obstante Adams y Cox (1985, p. 89) consideran que no es preciso que CRP calcule la carga que se genera en todos los Centros de Trabajo de la empresa, sino en aquellos que puedan convertirse en cuellos de botella.

- Tiene en cuenta cualquier capacidad adicional que se requiera para hacer frente a las unidades defectuosas.
- Según Vollmann, Berry y Whybark²⁰, la técnica CRP sólo es aplicable a las empresas que trabajan en entornos MRP, mientras que las técnicas *Rough-cut* se pueden emplear incluso en empresas que utilizan la filosofía Justo a Tiempo (o *Just in Time* –JIT–).

Las diferencias entre los datos que precisan las técnicas de Planificación de Capacidad mencionadas, se reflejan en la Tabla 2.1., donde se observa que conforme mayor sea el grado de precisión objetivo, se acrecienta el número de datos requeridos.

Técnica de Planificación de Capacidad	CPOF	Lista de Capacidad	Perfiles de Recursos	CRP
Datos sobre el trabajo directo	X			
Rutas y tiempos estándar		X	X	X
Listas de Materiales		X	X	X
Tiempo de suministro interno			X	X
Inventario				X
Producción en proceso				X
Tamaño de lote				X
Stock seguridad				X

Tabla 2.1. Fuentes de información de las técnicas *Rough-cut* y CRP.

Fuente: Adaptado de Schmitt, Berry y Vollmann (1984, p. 524).

Si bien para la Planificación de Materiales resulta más adecuada la aplicación de CRP, muchas empresas se plantean aplicar alguna de las técnicas *Rough-cut*, aun cuando la información obtenida sea más agregada. Esta decisión suele estar condicionada, no tanto por el mayor número de datos necesarios para aplicar CRP, sino por el tiempo de computación necesario, que dificulta el uso de la simulación para estudiar el efecto de los cambios y, por otro lado, los bajos niveles de exactitud obtenidos²¹.

²⁰ Vollmann, Berry y Whybark (1995, p. 196). Otros autores, sin embargo, no son tan restrictivos, dejando la posibilidad de aplicación dentro de otros sistemas, si bien consideran que el ámbito donde puede obtenerse mayores beneficios de la aplicación de CRP es en entornos MRP (Oden, Langenwaller y Lucier, 1993; Landvater, 1993; Domínguez y otros, 1995b; o Bicheno y Elliot, 1997).

²¹ “El procedimiento CRP requiere datos adicionales y un esfuerzo computacional, y se cuestiona si está justificado este esfuerzo por la mejora del proceso de fabricación” (Schmitt, Berry, y Vollmann, 1984, p. 525). Véase también Classen y Malstrom (1982, p. 76) o Burcher (1992, pp. 23-24).

Las mayores diferencias entre la planificación *Rough-cut* y CRP, si se aplican al Plan de Materiales, se producirán en los primeros periodos. Esto es debido a que las técnicas *Rough-cut* no consideran la carga de los pedidos en curso. No obstante en los periodos posteriores, generalmente, también existirán variaciones entre las cargas planificadas, si bien, en estos casos, están originadas, más que por diferencias entre el valor de las cargas calculadas, por la periodificación de éstas.

Para terminar de situar a la técnica CRP dentro de la Planificación de Capacidad, puede ser conveniente estudiar, brevemente, su diferencia con el control *Input-Output*²², que utiliza niveles de desagregación superiores. En concreto, se encarga de comprobar el cumplimiento, en términos de capacidad, de la Programación de Operaciones, trabajando con información relativa al muy corto plazo. Esta técnica ayuda a mantener actualizados factores relativos a los Centros de Trabajo, como la eficiencia²³, utilización²⁴, aprovechamiento²⁵ y capacidad disponible, así como la información referente a las colas de espera que se generan en él.

No obstante, según Goddard (1986, p. 28), “*la mayor diferencia entre CRP y el control Input-Output es la dirección y el propósito. CRP mira hacia delante y predice qué se espera que ocurra. El control Input-Output mira hacia atrás y comprueba qué ha pasado*”.

²² Véase, por ejemplo, Plossl y Wight (1973), Wemmerlöv (1984), Vollmann, Berry y Whybark (1995) o Domínguez y otros (1995b).

²³ Factor utilizado para incluir el efecto de la variabilidad de la destreza de los trabajadores que realicen una misma tarea y la incidencia, de los distintos niveles de habilidad de un trabajador, en la realización de varias operaciones. Se estudiará más detalladamente el factor eficiencia cuando se analice la unidad de medida de la capacidad (Apartado 2.4.3.).

²⁴ El factor utilización se usa para eliminar el tiempo improductivo. Suele ser considerado junto con el factor eficiencia para el cálculo del tiempo estándar, una vez conocido el tiempo real o teórico. Véase el Apartado 2.4.3.

²⁵ Conforme un lote de un ítem va recibiendo las distintas operaciones, que componen su ruta, el tamaño de éste se verá reducido, debido a la pérdida o eliminación de unidades originada por los desechos o los defectos que puedan producirse en su transformación. El factor aprovechamiento mide la proporción de unidades sin defectos que se obtienen tras la ejecución de una operación.

2.4. BREVE DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA CRP (PLANIFICACIÓN DE NECESIDADES DE CAPACIDAD)²⁶

2.4.1 Técnicas de carga finita e infinita

Comencemos por situar a la técnica CRP dentro la categoría de las técnicas de planificación de la capacidad en la que se encuadra; es decir, en el grupo de técnicas de carga infinita.

CRP es considerado una técnica de Planificación Detallada de la Capacidad infinita, si bien, en el caso de que no sea suficiente la capacidad instalada para cubrir la necesaria, en determinados Centros de Trabajo y periodos, al tratarse de una técnica de simulación, permite realizar iteraciones por parte del planificador, que vayan llevando a un mejor ajuste entre capacidad y carga, lo cual, para algunos autores indica que no toma la capacidad como “infinita”²⁷.

Las técnicas de capacidad finita han evolucionado rápidamente desde principios de la década de los 80, existiendo en el mercado muchos paquetes informáticos para su utilización²⁸. Este importante desarrollo surge como respuesta a los inconvenientes derivados de la falta consideración de las restricciones de capacidad por parte de las técnicas infinitas, originalmente vinculadas a MRP²⁹. Las técnicas finitas de Planificación de Capacidad parten de la base de que no se debe colocar en un Centro de Trabajo más volumen del que se espera que pueda producir. La carga es asignada considerando una secuencia de prioridades establecidas y, como se considera que la capacidad de cada Centro de Trabajo es fija, en el caso de que la asignación de cargas exceda la capacidad, ésta se reasigna automáticamente (generalmente mediante ordenador) al siguiente periodo más cercano. Ello conlleva que resulte más complicado averiguar los periodos o lotes que originan la sobrecarga. Dado que el ajuste de los Planes de Capacidad suele

²⁶ Un ejemplo práctico sobre la utilización y el procedimiento detallado de cálculo de CRP, puede verse en el Anexo 2.

²⁷ Véase, por ejemplo, Blackstone (1989, p. 109), Burman (1995, p. 128), Domínguez y otros (1995b, p. 46) o Narasimhan, McLeavey y Billington (1996, p. 414).

²⁸ Bicheno (1997, p. 448) o Plenert y Kirchmair (2000).

²⁹ McCarthy y Barber (1990), Taal y Wortmann (1997), Pandey, Yenradee y Archariyapruet (2000).

estar automatizado, este tipo de técnicas reducen, con frecuencia, la utilización de la creatividad humana, así como la capacidad de evaluar distintas alternativas, en aras de una mayor agilidad y rapidez en la elaboración de la planificación.

En las técnicas infinitas, sin embargo, se asignan las cargas a los Centros de Trabajo correspondientes sin considerar la capacidad disponible de éstos, de forma que un estudio posterior, que incluye un análisis de las disponibilidades de capacidad, nos indicará qué Centros se encuentran sobreutilizados o infrautilizados.

Puesto que para la elaboración del Plan de Carga se parte de variables aleatorias (tiempos de procesamiento, factor de defectuosas, tiempo de cola, etc.; ver Capítulo 3), sería necesario actualizar dicho Plan ante cambios en el valor de éstas. El coste de la simulación, para adaptarse a la nueva situación, es mucho mayor si se aplica una técnica de carga finita que en el caso de haber utilizado la carga infinita. No obstante, *“quienes defienden la carga finita, afirman que obtienen cálculos de capacidad de carga más precisos en un menor plazo (unos pocos días) que los que se obtienen mediante el procedimiento de programación detallado de secuencia de carga infinita”* (Adam y Ebert, 1991, p. 474).

Con el uso de CRP, el plan resultante, en el caso de que la carga esté equilibrada con la capacidad, será mejor que el calculado con técnicas de capacidad finita³⁰, debido a que para la búsqueda del equilibrio entre capacidad y carga, se consideran más opciones, como pueden ser: variaciones en la fuerza de trabajo, las máquinas, las herramientas, el uso de rutas alternativas, subcontratación, etc.; siendo un especialista el encargado de tomar la decisión que mejor se ajuste a los objetivos de la empresa. De esta manera, se consigue un equilibrio entre las técnicas de capacidad finita e infinita.

No obstante muchos paquetes ERP incorporan un módulo CRP con la opción añadida de elaborar el Plan de Capacidad utilizando el procedimiento de las técnicas finitas, es decir, partiendo del Plan CRP permiten una posterior reasignación automática para eliminar las desviaciones entre capacidad y carga por período, en la medida de lo posible. Aun así los usuarios experimentados de MRP prefieren utilizar las técnicas infinitas puesto que permite una mayor flexibilidad y control por parte del planificador³¹.

³⁰ Véase Blackstone (1989, p. 108) o Oden, Langenwaller y Lucier (1993, p. 406).

³¹ Véase Gibson, Greenhalgh y Kerr (1995, p. 126).

2.4.2. Información necesaria para la aplicación de la técnica CRP³²

La Planificación de Capacidad CRP pretende determinar la carga generada por el Plan de Materiales, para comprobar su viabilidad mediante la comparación de ésta con la capacidad disponible para cada período de un determinado horizonte de planificación, el cual, como es lógico, suele coincidir con el utilizado para la Planificación de Materiales dentro de los sistemas MRP, por lo que puede cubrir entre varias semanas hasta un año³³. Es común utilizar en este nivel de detalle un horizonte de planificación de pocos meses, y como cubo de tiempo la semana³⁴. No obstante, debido a la gran cantidad de cálculos necesarios para su elaboración y a los cambios que pueden sufrir los periodos más futuros, a veces el horizonte de planificación utilizado es menor que el usado en la Planificación de Materiales³⁵.

Para poder determinar la viabilidad en términos de capacidad del Plan de Materiales, será necesario elaborar un Plan de Carga y un Plan de Capacidad y calcular las desviaciones existentes entre ellos. La empresa estudiará las medidas de ajuste de capacidad que puedan llevarse a cabo para conseguir la factibilidad del Plan de Materiales pero, si no son suficientes, será preciso ajustar el Programa Maestro de Producción (PMP).

Para la elaboración de los Planes con el método CRP, es preciso disponer de la siguiente información:

- Pedidos u órdenes planificados y en proceso.

³² Para un análisis detallado de todos los aspectos de la información necesaria y del proceso de cálculo descrito en este Apartado, ver el ejemplo numérico desarrollado en el Anexo 2 y en el Apartado 5.5. del Capítulo 5.

³³ Blackstone (1989, p. 2), Vollmann, Berry y Whybark (1995, p. 179), Domínguez y otros (1995b, pp. 4-12).

³⁴ Según Wemmerlöv (1984, p. 30), puede ser adecuado considerar el horizonte de planificación de 2 a 6 meses. Mientras que el tamaño medio del horizonte de planificación, considerado por Scott (1994, p. 150), para CRP es de 23 semanas. Por otro lado, con respecto al cubo de tiempo, éste depende del tamaño del horizonte de planificación, así como del nivel de desagregación deseado, pudiéndose utilizar semanas, días, horas, etc., siendo el más común el uso de las semanas. Del estudio de Jonsson y Mattsson (2002, pp. 91-92), realizado sobre empresas suecas, se desprende que: el 33 % tienen aplicado CRP al corto plazo y el 38 % lo aplican para la Planificación de Capacidad a medio plazo; el uso de la semana como cubo de tiempo tiene una aceptación del 55 % frente al 27 % de las empresas que utilizan el mes como tamaño de los periodos. Véase Wemmerlöv (1979, p. 16), Plossl y Wight (1973), Orlicky (1975), Harl y Ritzman (1985, p. 311).

³⁵ Véase, por ejemplo, Adams y Cox (1985, p. 89) o Domínguez y otros (1995b, p. 53). Según Bakke y Hellberg, en la práctica se suele planificar para un máximo de 2 a 6 meses (Bakke y Hellberg, 1993, p. 246).

- Rutas y las operaciones que las componen.
- Datos sobre los Centros de Trabajo.
- Otros datos necesarios para conocer el tiempo de suministro³⁶.

En la Figura 2.4. se aprecia el proceso de cálculo de CRP. Podemos observar que para la elaboración del Plan de Carga, será necesario tomar información del Plan de Materiales, rutas y operaciones, Centros de Trabajo y tiempo de suministro, mientras que para el desarrollo del Plan de Capacidad (donde se recoge la capacidad disponible), sólo se precisan datos referentes a los Centros de Trabajo.

Desagregaremos, a continuación, la información que precisa la técnica CRP para elaborar la Planificación de Capacidad.

2.4.2.1. Pedidos planificados y en proceso

Los pedidos planificados provienen del lanzamiento de pedidos planificados del MRP, en concreto, del Plan de Materiales, mientras que, para conocer cuáles son los pedidos en proceso o en curso, será necesario tomar esta información directamente del proceso productivo; ni que decir tiene que, en entornos ERP, esta información debe encontrarse en la base de datos del sistema.

Del Plan de Materiales se obtiene la información referente a la emisión de lotes de los diferentes ítems que procesa la empresa, reflejando el periodo en el que se deben emitir, así como el tamaño de éstos.

Por otro lado, con respecto a los pedidos en proceso, se deben indicar:

- Tamaño del lote emitido.

³⁶ En concreto se precisa conocer determinados datos del tiempo de suministro interno, el cual se puede definir como el “*intervalo de tiempo que transcurre entre que se solicita un pedido y el instante de su llegada, entendida ésta como el momento en que está disponible para ser utilizado, tras la correspondiente inspección y almacenamiento en su caso*” (Domínguez y otros, 1990, p. 620). En el Capítulo 3 se realizará un análisis más exhaustivo del tiempo de suministro.

- Situación con respecto a su ruta de fabricación³⁷, especificando: el tiempo que le resta para salir de un Centro de Trabajo (en el caso de que no se le haya terminado de ejecutar una operación) y cuál fue la última operación que se le ejecutó, si está situada entre operaciones, se encuentra en espera de entrar en un nuevo Centro de Trabajo, esperando para desplazarse al siguiente de su ruta, o en el proceso de desplazamiento.

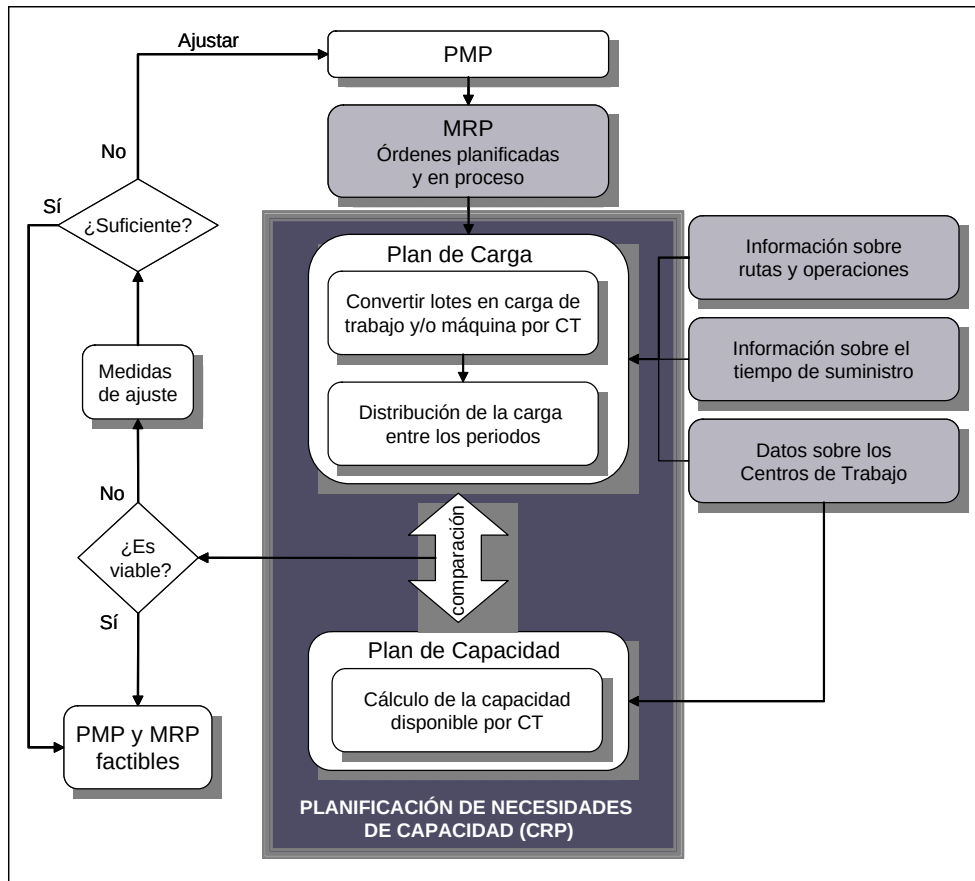


Figura 2.4. Proceso de cálculo de CRP.

Fuente: Elaboración propia

³⁷ Una ruta está formada por la secuencia de pasos o el camino que debe seguir un ítem (componente o producto final), de un Centro de Trabajo a otro, para ser completado.

2.4.2.2. Datos sobre los Centros de Trabajo

Como se ha comentado en el Apartado 2.1.1., en las configuraciones productivas por lotes, una misma instalación puede ser utilizada para la ejecución de varias operaciones, que pueden formar parte de rutas distintas. Definiendo un Centro de Trabajo como *“un conjunto de máquinas, y/o un número de trabajadores que pueden ser considerados como una unidad para la Planificación de Capacidad y la asignación detallada”* (Oden, Langenwaller y Lucier, 1993, p. 186), es necesario conocer, para cada uno de ellos, la siguiente información:

- Descripción y código de identificación.
- Número de tareas u operaciones que se realizan en él.
- Total de máquinas de que dispone, especificando el número de equipos destinados a las distintas operaciones y si hay diferencias entre ellos que afecten a su eficiencia³⁸.
- Personal que compone el Centro de Trabajo, indicando el número de personas necesarias para la ejecución de una operación y para el funcionamiento de los equipos.
- Número de turnos, horas por turno y días laborables.
- Factores de utilización³⁹ y eficiencia⁴⁰.
- Tiempo medio de preparación o ajuste para realizar una operación diferente a la ejecutada justo anteriormente.
- Tiempo de cola medio: considerado como el tiempo medio de espera, una vez llegado al Centro de Trabajo, hasta que sea el turno de ser procesado.

³⁸ Esto provocaría que el tiempo de ejecución de una tarea varíe en función de la máquina que la ejecute.

³⁹ El factor de utilización refleja el *“porcentaje de tiempo en el que un Centro de Trabajo está produciendo, en comparación con el tiempo total”* (Lunn y Neff 1992, p. 144).

⁴⁰ El factor eficiencia refleja la diferencia de destreza y rapidez de movimientos entre distintos trabajadores, *“es la medida de cómo nuestros trabajadores son capaces de actuar comparados con las horas estándar de nuestra ruta. Algunos trabajadores muy experimentados pueden producir elementos en menor tiempo que los estándares dictados; por lo que se consideran muy eficientes”* (Lunn y Neff, 1992, pp. 144-145)

- Tiempo de espera medio, a la salida del Centro de Trabajo, para el traslado del lote al Centro donde se le vaya a realizar la siguiente operación de su ruta, o al almacén en el caso de que ésta haya finalizado.

2.4.2.3. Información sobre rutas y operaciones que las componen

Una ruta de fabricación está compuesta por una o más operaciones, considerando cada una de éstas como *“un paso individual o una función, que es realizada en un área o Centro de Trabajo específico”* (Oden, Langenwaller y Lucier, 1993, p. 184). La técnica CRP asume, para cada ítem elaborado o transformado por la empresa, una única ruta, es decir, un solo método de fabricación. No obstante, muchas empresas permiten el uso de rutas alternativas, utilizadas, generalmente, para casos puntuales de averías o sobrecarga en determinados Centros de Trabajo que provocarían retrasos en la planificación. Según Ptak (1997, p. 163), *“ningún sistema CPR es lo suficientemente inteligente para asignar rutas alternativas. Esto es trabajo de un planificador”*⁴¹. En este sentido, para realizar una Planificación de Capacidad mediante CRP, sólo precisamos conocer la ruta base de elaboración de los distintos ítems.

Es preciso conocer, con respecto a la ruta de cada ítem, las operaciones que la componen y el orden en el que se deben realizar éstas. Siendo necesario disponer de la siguiente información referente a cada una de las operaciones que conforman la ruta⁴²:

- Código y descripción de la operación.
- Centro de Trabajo donde se realiza.
- Tiempo de ejecución unitario, o tiempo necesario para ejecutar la operación a una unidad del lote.

⁴¹ Véase también Connor (1986, p. 20).

⁴² Véase, por ejemplo, Goddard (1984, p. 54), Oden, Langenwaller y Lucier (1993, pp. 185-191) y Scott (1994, p. 165).

- Factor de aprovechamiento de la operación, que nos indica la proporción de ítems que cumplen con los requisitos de calidad, y que, por tanto, pasarán a la siguiente operación de la ruta⁴³.

2.4.2.4. Otros datos necesarios para conocer el tiempo de suministro⁴⁴

Existen muchas definiciones de tiempo de suministro, entre las cuales hemos elegido aquella que lo define como *“intervalo de tiempo que transcurre entre que se solicita un pedido y el instante de su llegada, entendida ésta como el momento en que está disponible para ser utilizado, tras la correspondiente inspección y almacenamiento en su caso”* (Domínguez y otros, 1990, p. 620). El tiempo de suministro se utilizará, en CRP, para poder comprobar si un lote será entregado en la fecha concertada con el cliente.

Puesto que el cálculo del tiempo de suministro interno de un ítem⁴⁵ implica considerar el proceso de fabricación, es necesario establecer los pasos que incluye éste, bajo el entorno de configuraciones por lotes. Nos referimos a las siguientes etapas y tiempos necesarios para el proceso productivo (ver Figura 2.5.):

1. Tiempo de preparación o confección del pedido.
2. Tiempo de desplazamiento del lote, al Centro de Trabajo donde deben realizarle la operación, y tiempo requerido para hacer llegar a dicho Centro los materiales necesarios desde sus zonas de almacenamiento. Además (punto 8), posteriormente será necesario conocer los tiempos de desplazamiento entre operaciones.
3. Tiempo de cola o tiempo que debe esperar para procesarse en un Centro de Trabajo.

⁴³ Conforme un lote de un ítem va recibiendo las distintas operaciones, que componen su ruta, el tamaño de éste se verá reducido, debido a la pérdida o eliminación de unidades originada por los desechos o los defectos que puedan producirse en su transformación. El decremento del tamaño del lote depende del valor de los factores de aprovechamiento de las operaciones que componen la ruta de fabricación.

⁴⁴ Ver el Capítulo 3 para un estudio detallado de la composición del tiempo de suministro.

⁴⁵ También llamado tiempo de suministro de fabricación.

4. Tiempo de preparación del Centro de Trabajo para ejecutar una operación distinta, a un nuevo lote.
5. Tiempo de ejecución de la operación correspondiente a todas las unidades que conforman el lote.
6. Tiempo de inspección del lote para comprobar si cumple con los requisitos establecidos por la empresa, en el caso de que la inspección se realice en todas las fases del proceso productivo. Es más común, sin embargo, inspeccionar los lotes sólo en determinados Centros o incluso demorar esta tarea hasta que el ítem esté completamente terminado. Será preciso conocer pues, los momentos en los que ésta se realizará (después de qué operación), así como el tiempo de inspección unitario. Si la inspección se realiza únicamente sobre el producto terminado, no afectará a los periodos en los que se ha asignado la carga de un lote, sin embargo, las inspecciones intermedias sí pueden incidir en el Plan de Carga.
7. Tiempo de espera para su traslado al siguiente Centro de Trabajo o al almacén, una vez terminado de procesar el lote en un Centro de Trabajo o inspeccionado, en su caso.
8. Cuando el lote no haya sido completado, el ciclo de fabricación continuaría con el desplazamiento al Centro de Trabajo siguiente en su ruta, por lo que sería necesario conocer los tiempos numerados de 2 a 7 (desplazamiento, cola, preparación, ejecución, inspección y espera), para cada uno de los Centros de Trabajo en los que hayan de desarrollarse las operaciones restantes de su ruta y por el orden de las mismas.
9. Una vez que el lote esté procesado por completo, deberá trasladarse al almacén, pudiendo ser necesario, como se comentó anteriormente, dedicar un tiempo a su inspección cuando ésta se realice sobre el lote ya completado.

Podemos decir, por tanto, que el tiempo de suministro interno en configuraciones por lotes, depende de los siguientes tiempos: confección de pedido, cola, preparación, ejecución, espera, desplazamiento e inspección.

Las características del tiempo de suministro no sólo son determinantes para la asignación de la carga, sino que para su cálculo es preciso conocer el valor de ésta, ya que depende del tiempo de ejecución y preparación (como se estudiará en el Apartado 2.4.3.1.1.). Así mismo, para realizar el Plan de Carga mediante CRP,

es necesario disponer de toda la información citada, dependiendo de la exactitud de la misma la calidad del plan obtenido, tanto en lo que se refiere al volumen de las cargas, como en lo relativo a los momentos del tiempo en que se producirán.

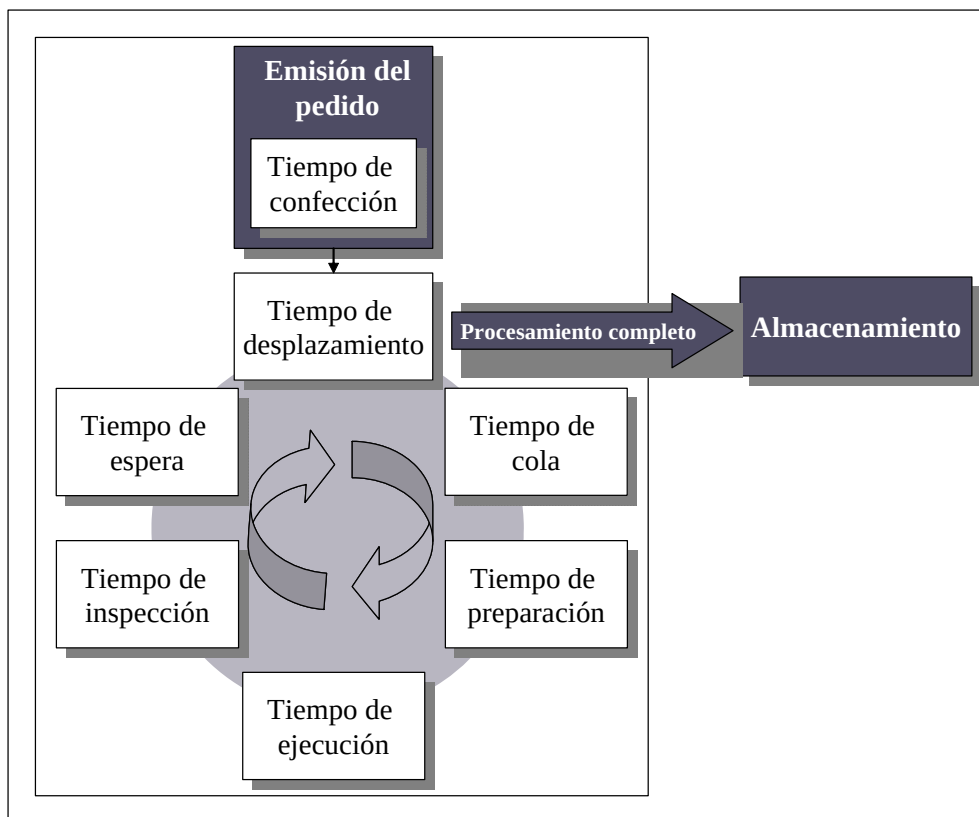


Figura 2.5. Proceso productivo de un lote.

Fuente: Elaboración propia.

Esta es una de las principales fuentes de inconsistencia de CRP. Nótese que, por ejemplo, para calcular la carga que genera **un solo pedido** de un ítem con una ruta de 10 operaciones, contaríamos con un total de 72 variables aleatorias (preparación del pedido, factor de defectuosas o aprovechamiento de las diez operaciones, diez tiempos de desplazamiento, diez tiempos de cola, diez tiempos de preparación, diez tiempos de ejecución, diez tiempos de espera, diez tiempos de inspección, y el tiempo de desplazamiento al almacén del lote terminado) o, como mínimo, de 63 si sólo se hace una inspección de calidad al final de la ruta. Si se emplean diez Centros de Trabajo, será necesario conocer también sus diez factores de eficiencia y utilización, es decir, otras 20 variables aleatorias. Es decir que, para planificar la carga que genera un solo lote en cada período del horizonte de planificación, es necesario conocer, además del tamaño del mismo, otras 83

variables aleatorias. Pero, por supuesto, es necesario calcular la carga que generan en cada período, todos los pedidos del Plan de Materiales. Ello implica que, si por ejemplo, son 100 los ítems obtenidos por la empresa, sería necesario manejar 7.200 variables aleatorias para calcular el Plan de Carga con **CRP para todo el Plan de Materiales**. A poco que haya 26 pedidos de cada ítem en un horizonte de 52 semanas, estaríamos aplicando las 7.200 variables a 2.600 pedidos, lo que ya nos da una idea de las grandes desviaciones que se podrían dar en los resultados, salvo que la probabilidad de cumplimiento de cada variable aleatoria no sea muy cercana a la unidad (ver Apartado 4.4.).

Por todo ello, debido a su relevancia sobre al Plan de Carga, se estudiarán todas estas variables detalladamente en el capítulo siguiente, centrándonos en las fuentes de aleatoriedad, ya que incidirán directamente en la exactitud del Plan de Carga elaborado con CRP.

2.4.3. Desarrollo de la Planificación de Capacidad mediante CRP⁴⁶

Como cualquier técnica de Planificación de Capacidad, el CRP calcula un Plan de Carga que será comparado con el Plan de Capacidad, donde vendrá reflejada la capacidad disponible. En concreto, se estudiarán las desviaciones originadas, entre capacidad necesaria y disponible, para cada Centro de Trabajo y cubo de tiempo en el que se divide el horizonte de planificación. Para ello es necesario:

- **Calcular tanto el valor de las cargas originadas por las diferentes órdenes que contiene el Plan de Materiales, y por los pedidos en curso, como el momento en el que se generarán éstas.** La capacidad necesaria por periodo y Centro de Trabajo⁴⁷ conformará el Plan de Carga elaborado por CRP. Para el cálculo del valor de la carga que se originará por el procesamiento de un lote, el CRP utiliza el mismo procedimiento que las técnicas *Rough-cut*, basándose en el tiempo de carga unitario (desagregándolo en el tiempo de ejecución y el tiempo de preparación). Sin embargo, para la asignación de la carga, la técnica CRP considera “*cinco tipos de actividades en la elaboración de un lote*

⁴⁶ Para un análisis detallado de todos los aspectos de la información necesaria y del proceso de cálculo descrito en este Apartado, ver el ejemplo numérico desarrollado en el Anexo 2.

⁴⁷ Calculada como la suma de las cargas originadas por órdenes emitidas o en proceso que, según los cálculos, serán total o parcialmente procesadas en ese periodo de tiempo.

de un determinado ítem: cola, preparación, ejecución, espera y desplazamiento”⁴⁸ (Oden, Langenwaller y Lucier, 1993, p. 204), a las que habrá que unir la tarea de confeccionar el pedido (considerado únicamente en el primer periodo) y las actividades de inspección, que dependen del sistema de planificación de la calidad que tenga implementado la empresa.

- **Averiguar la capacidad disponible de cada uno de los Centros de Trabajo.** Para lo cual se utilizará un método similar al que se aplica en las técnicas *Rough-cut*. El Plan de Capacidad recogerá la capacidad disponible por cada Centro de Trabajo y periodo en los que se divide el horizonte de planificación.

Puesto que se pretende comparar la capacidad disponible y necesaria, es preciso utilizar una unidad de medida homogénea. Generalmente en el nivel de planificación de CRP, se toman como unidad de capacidad, medidas del lado del input, siendo habitual considerar los recursos clave⁴⁹, como pueden ser mano de obra o Centro de Trabajo.

Una vez definida la unidad de medida de capacidad será aplicada a diferentes ítems y, dado que éstos pueden necesitar distintos Centros de Trabajo, máquinas o personal, para ser elaborados, es preciso definirla de manera que pueda ser utilizada en todos los casos. Se calculará, para esta labor, el tiempo estándar de la unidad de medida (generalmente horas estándar)⁵⁰. Este valor se obtendrá una vez eliminado el tiempo improductivo (originados por descansos, absentismo, roturas de máquinas, etc.) y consideradas las distintas habilidades y destrezas que pueden tener los trabajadores.

Así, número de horas estándar se calculará como:

$$NHE = NHP \times E = NHR \times U \times E$$

⁴⁸ Estas actividades son las que componen el tiempo de suministro del lote.

⁴⁹ Pueden ser considerados como recursos clave aquellos “factores que: implican una gran inversión de capital [...], nutren a otras instalaciones o Centros, presentan normalmente grandes colas de espera [...], requieren largo tiempo para aumentar su capacidad, necesitan mano de obra especializada con grandes periodos de entrenamiento, precisan de estabilidad en el empleo, etc.” (Domínguez y otros, 1995b, p. 37).

⁵⁰ Obtendremos, de esta manera, por ejemplo, las horas estándar de mano de obra al día, horas estándar que puede desarrollar una máquina en un turno, etc. Véase por ejemplo, Wemmerlöv (1984, p. 7), Blackstone, (1989 pp. 8-10), Domínguez y otros (1995b, p. 40) y Oden, Langenwaller y Lucier (1993, p. 203).

Donde:

NHP = número de horas productivas.

NHR = número de horas reales.

U = factor de utilización.

E = factor de eficiencia

El factor de utilización (U) refleja el “porcentaje de tiempo en el que un Centro de Trabajo está produciendo, en comparación con el tiempo total” (Lunn y Neff 1992, p. 144). Este factor nos permite transformar las horas reales (horas teóricas de trabajo) en horas productivas, ya que, para su cómputo, se tienen en consideración las paradas que pueden producirse en el proceso de fabricación. El procedimiento de cálculo de este factor⁵¹ consiste en dividir el número de horas productivas entre las horas reales ($U = NHP/NHR$). Según Blackstone⁵², el factor utilización está compuesto por dos variables: la disponibilidad, referente a las paradas forzadas por rotura de máquinas o el absentismo, cuyo valor debería ser cercano a uno; y la actividad, que cuantifica las pausas debidas a las esperas de trabajo, para la cual se debería definir un valor objetivo, ya que afectará a los trabajos en proceso y al tiempo de suministro.

Por otro lado, el factor eficiencia (E) refleja la diferencia de destreza y rapidez de movimientos entre distintos trabajadores, “es la medida de cómo nuestros trabajadores son capaces de actuar comparados con las horas estándar de nuestra ruta. Algunos trabajadores muy experimentados pueden producir elementos en menor tiempo que los estándares dictados; por lo que se consideran muy eficientes” (Lunn y Neff, 1992, pp. 144-145). Se utiliza pues, para expresar las variaciones en el tiempo que precisan diferentes trabajadores, en la realización de una misma tarea (variabilidad originadas por el nivel de experiencia, la pendiente de su curva de aprendizaje, su destreza, etc.), y también los cambios en el tiempo de una tarea, realizada por un mismo trabajador, a lo largo de la jornada y de su vida laboral (que se pueden producir ya sea por la propia aleatoriedad del proceso productivo, el nivel de cansancio y, en general las condiciones físicas variables propias del ser humano, o bien por el desplazamiento en su curva de aprendizaje debido a la experiencia).

⁵¹ Un ejemplo práctico de la determinación de este factor, puede observarse en el Apartado A2.2.2.2. del Anexo 2.

⁵² Blackstone (1989, pp. 20-21).

El objetivo del factor eficiencia es relacionar las horas estándar con las horas productivas ($E = NHE/NHP$). Para su determinación será preciso analizar los distintos niveles de actividad o ritmo de trabajo que tienen los trabajadores de un mismo Centro de Trabajo. La estimación de este factor se podría hacer mediante diferentes métodos de muestreo⁵³.

Tanto los factores de utilización como de eficiencia pueden ser determinados para trabajadores, equipos o una combinación de ambos. En general, se calcularán para un trabajador individual, un Centro de Trabajo o una planta productiva en función de los niveles de dispersión de los datos necesarios para su cálculo, la precisión deseada y los recursos que se deseen destinar a esta tarea⁵⁴.

La mayor diferencia del CRP con otras técnicas, que también se utilizan para calcular la carga de los Centros de Trabajo por separado, radica en el nivel de detalle del Plan de Carga, el cual se obtiene a partir de la inclusión de una mayor cantidad de información. Así, para el cálculo de la capacidad necesaria de un Centro de Trabajo se tiene en consideración las operaciones que se realicen en él y las órdenes, ya sean planificadas o en proceso, de todos los ítems, mientras que las técnicas *Rough-cut* sólo tienen en cuenta la carga provocada por los pedidos planificados de productos finales.

2.4.3.1 Elaboración del Plan de Carga

La Planificación de Necesidades de Capacidad realiza “una proyección hacia el futuro del output requerido para cada Centro de Trabajo y periodo con objeto de producir a tiempo los productos establecidos por el Programa Maestro de Producción” (Lankford, 1990, p. 40). Es decir, la técnica “CRP traduce las cantidades requeridas y fechas de entrega, reflejadas en el Plan de Materiales, en horas de carga de los distintos Centros de Trabajo que componen las rutas” (Connor, 1986, p. 19). El procedimiento parte del lanzamiento de pedidos planificados calculados mediante la técnica MRP, y de las órdenes de fabricación en curso, y calcula la capacidad necesaria o carga de cada Centro de Trabajo para poder cumplir la planificación.

⁵³ Un ejemplo práctico de la determinación de este factor, puede observarse en el Apartado A2.2.2.1. del Anexo 2.

⁵⁴ Véase Wemmerlöv (1984, pp. 7-8)

Para la elaboración del Plan de Carga, el CRP se basa en el tiempo de suministro, que será el que determinará el momento en el que asignar la carga. Será preciso calcular, en primer lugar, el montante de las cargas generadas por cada uno de los lotes (emitidos y en proceso⁵⁵), diferenciando el Centro de Trabajo en el que se originarán y, a continuación, se asignarán las cargas a los periodos de tiempo en el que serán necesarias, para cuyo conocimiento se tomará la información que nos ofrece el tiempo de suministro.

2.4.3.1.1. Cálculo del valor de la carga

Cada lote emitido o en proceso generará carga, es decir, necesidades de capacidad, a lo largo de los Centros de Trabajo por los que tiene que transitar para que se le realicen todas las operaciones que necesita para procesarse. Será preciso pues, calcular la carga que genera el lote en cada operación. El procedimiento seguido para ello puede ser más o menos preciso, en función del software CRP implantado. Así podemos encontrarnos con, al menos, tres formas de realizar este cálculo, en función del nivel de simplificación considerado, calculando el tiempo de carga de un lote a partir de:

- Tiempo ejecución total más tiempo de preparación (ver Apartado 3.5.4.2.) por operación⁵⁶: en cuyo caso, el procedimiento de cálculo de la carga, implica que al tiempo de preparación del Centro de Trabajo donde se realice la operación, se le suma el producto del tiempo de ejecución unitario por el número de unidades que componen el lote.
- Tiempo de carga unitario⁵⁷: suma del tiempo de ejecución (un ejemplo de su cálculo puede verse en el Apartado 5.5.2.2. del Capítulo 5) y tiempo de preparación unitarios (calculado éste, generalmente para un tamaño medio de lote, lo que puede llevar a desajustes con la carga real

⁵⁵ Dependiendo de las características del sistema CRP, puede calcularse un Plan de Carga inicial sin incluir los pedidos en proceso, y añadirlo posteriormente para el Plan de Carga final, o bien tratar de la misma manera los pedidos planificados y en curso, lo que supondría calcular directamente el Plan de Carga final.

⁵⁶ Véase, por ejemplo, Adam y Ebert (1991, p. 592), Fogarty, Blackstone, y Hoffmann (1991, p. 438) y Markland, Vickery y Davis (1995, p. 534).

⁵⁷ Véase, por ejemplo, Blackstone (1989, p. 96), Vollmann, Berry y Whybark (1995, pp. 136 y ss.) o Domínguez y otros (1995b, p. 168).

si el número de unidades del lote no coincide con el tamaño medio⁵⁸; un ejemplo de su cálculo puede verse en el Apartado 5.5.2.1. del Capítulo 5). El tiempo de carga unitario será el que se multiplique por los tamaños de lotes a procesar para obtener la carga generada por cada lote en cada Centro de Trabajo.

- Tiempo de carga unitario por Centro de Trabajo⁵⁹: que refleja la carga total originada por la ejecución y preparación, de todas las operaciones que se realicen en un Centro de Trabajo, a una unidad del ítem, la cual se multiplicará por el número de unidades que componen el lote.

Por supuesto, la técnica CRP se ajusta al primero de los cálculos expuestos, de manera que las otras dos son simplificaciones que sólo producirán resultados parecidos a CRP, bajo unas determinadas circunstancias (tales como baja variabilidad en los tamaños de lote, ínfimos factores de defectuosas en las operaciones, bajos tiempos de preparación en los centros de trabajo, etc.; ver Domínguez y otros, 1995b).

2.4.3.1.2. Asignación de la carga a los distintos periodos. Programación hacia delante y hacia atrás

Los distintos paquetes de software CRP que existen en el mercado, pueden presentar diferencias en el procedimiento de asignación de la carga; esto no quiere decir que haya una gran diversidad de técnicas CRP, sino que hay mucha diversidad de software que, aunque en la denominación comercial utilice el acrónimo CRP, no desarrollan la técnica CRP, sino otras técnicas de planificación de la capacidad.

En general, para la Planificación de Capacidad a corto plazo, existe software en el mercado (que, insistimos, no todo es CRP aunque se emplee esta denominación), más simplificado que no periodifican la carga y otros que, si bien la distribuyen en los distintos periodos del tiempo de suministro, utilizan métodos diferentes aproximados. Podemos distinguir, entre otros, los paquetes que:

⁵⁸ Véase García y García (1996, pp. 206-208).

⁵⁹ Utilizado como procedimiento de cálculo simplificado. Véase, por ejemplo, Domínguez y otros (1995b, pp. 164-168).

- Aplican toda la carga de una operación al periodo en el que comienza el procesamiento de ésta⁶⁰ (procedimiento que utiliza las Listas de Capacidad; ver por ejemplo Bicheno y Elliot (1997, pp. 436-437) o Jonsson y Mattson (2003, p. 881).
- Calculan la carga total generada por un lote, por Centro de Trabajo y, posteriormente, la periodifican de manera uniforme entre los periodos que comprende el tiempo de suministro (procedimiento utilizado por los Perfiles de Recursos; ver por ejemplo Bicheno y Elliot (1997, pp. 437-438) o Jonsson y Mattson (2003, p. 882)).
- Una vez calculadas las cargas de las distintas operaciones de la ruta de un lote, periodifican éstas comenzando en el momento de emisión del pedido. Es la llamada programación hacia delante (un ejemplo numérico sencillo de la programación hacia delante, puede verse en el Apartado A2.3.2. del Anexo 2).
- Distribuyen la carga calculada por operación comenzando por el momento en el que está prevista la entrega, utilizando la programación hacia atrás.

No obstante, como ya hemos citado, en los dos primeros casos, aunque en la denominación comercial del software se utilice el acrónimo CRP, realmente se está empleando una metodología de cálculo que no responde a esta técnica, sino que son simplificaciones que emplean un proceso de cálculo mucho menos detallado, más cercano a la Lista de Capacidad o el Perfil de Recursos. Es pues un proceso que se ajusta más a técnicas de Planificación Aproximada de la Capacidad, un nivel de planificación más agregado, cuyo objeto es determinar la viabilidad en términos de capacidad del Programa Maestro de Producción, y no del Plan de Materiales, el cual es el objeto de CRP. Sólo se puede hablar de esta técnica por tanto, cuando estemos hablando de los dos últimos procedimientos, es decir, cuando desarrollemos la programación hacia delante (*forward scheduling*) o la programación hacia atrás (*backward scheduling*), por lo que a partir de aquí nos centraremos en ellas, dado que es la técnica objeto del presente trabajo. Las demás no pueden denominarse CRP si se emplea un mínimo de rigor conceptual.

En ambas, el procedimiento de cálculo es el mismo; lo único que cambia es que en la programación hacia delante se periodifican las cargas comenzando en el

⁶⁰ Consideramos que se inicia el procesamiento cuando el Centro de Trabajo recibe el lote y se dispone a ajustarse para su ejecución.

momento de emisión del pedido y, en la programación hacia atrás, se periodifican las cargas comenzando por el momento en el que está prevista la entrega del pedido que las origina. Lógicamente, como veremos más adelante, el Plan de Capacidad obtenido para un mismo Plan de Materiales utilizando un método u otro, será igual cuando no haya holgura entre el tiempo transcurrido desde la emisión hasta la fecha de entrega y el tiempo de suministro.

La **programación hacia delante**, o prospectiva (un ejemplo numérico sencillo puede verse en el Apartado A2.3.2. del Anexo 2), organiza las actividades comenzando en el momento de emisión del pedido, siendo éste el instante a partir del cual se empezará a contar el tiempo de suministro. En el proceso de programación, la fecha final de una operación se toma como fecha inicial de la siguiente en su ruta (considerados los tiempos entre operaciones, destinados a la inspección, espera, desplazamiento y cola). En este caso, si el tiempo que transcurre desde la emisión del pedido hasta el momento de entrega, es mayor que el tiempo de suministro, se dispondrá de una holgura tras la finalización de éste. Es común que se origine esta diferencia, ya sea debido a la utilización de distintas unidades de medida para el tiempo de suministro y los cubos de tiempo, en que se divide el horizonte de planificación⁶¹, o bien por el establecimiento voluntario, por parte de la empresa, de un margen de seguridad.

En la **programación hacia atrás**, o retrospectiva, la asignación de operaciones, y con ella el tiempo de suministro, comienza en el momento en el que está prevista la entrega del pedido. Para la determinación del periodo de asignación de la carga, se considera la última fecha de comienzo, como la fecha en que finaliza la operación anterior (sin olvidar los tiempos entre operaciones), continuando hacia atrás hasta el comienzo de la primera de las tareas, de forma que, si existiese tiempo sobrante, éste quedaría delante del comienzo del tiempo de suministro, es decir, sería anterior a la confección del pedido.

El uso de la programación hacia delante implica comenzar el procesamiento del pedido lo antes posible, dejando un margen hasta la fecha de entrega que puede ser absorbido por retrasos en los materiales, disponibilidad de herramientas, cambios en las reglas de prioridad, etc. Es decir, todo retraso en el tiempo de suministro planificado no originará siempre una demora en la fecha de entrega (sólo se producirá cuando éste sea mayor que el margen establecido). Por otro lado, la terminación de ítems con anterioridad a su fecha de entrega, implicará el almacenamiento de éstos hasta el momento de su transmisión al comprador, lo que originará un coste de posesión para la empresa, el cual, lógicamente, será

⁶¹ Por ejemplo, si el tiempo de suministro es de 8 días y los cubos de tiempo son semanales, de 5 días laborables, el tiempo de entrega planificado será de 2 semanas, mientras que el tiempo de suministro planificado sólo alcanzará 1,6 semanas (8/5).

mínimo en el caso de aplicar la programación hacia atrás. En este segundo tipo de programación, sin embargo, el principal problema consiste en mantener la desviación entre los tiempos planificados y los reales, dentro de los márgenes establecidos por la empresa, ya que en caso contrario se reducirá el nivel de servicio al cliente, al que habrá que hacer frente, entre otras alternativas, con un mayor coste de transporte, regalos de compensación, etc., para evitar pérdidas de cuota de mercado.

Según Oden, Langenwaller y Lucier (1993, p. 195), la programación hacia atrás es la que más se acerca a la forma de programar que se hace actualmente, siendo más adecuada cuando la planta trabaja con toda su capacidad. En este sentido, algunos autores consideran que este tipo de programación es la que se debe aplicar en CRP⁶², lo cual también está avalado por el resultado del estudio realizado por Jonsson y Mattsson (2002, p. 94) sobre empresas suecas, donde se refleja que cerca del 80 % de las compañías encuestadas aplican la programación hacia atrás.

2.4.3.2 Cálculo del Plan de Capacidad

Para poder saber si el Plan de Materiales es factible desde el punto de vista de la capacidad, tal como nos hemos referido con anterioridad, es preciso comparar la capacidad requerida con la disponible. Puesto que ya se ha estudiado como desarrollar el Plan de Carga, a continuación nos centramos en el análisis del Plan de Capacidad, el cual deberá tener el mismo horizonte de planificación y cubos de tiempo que aquél, e incluirá la capacidad disponible de cada uno de los Centros de Trabajo involucrados en la Planificación de Necesidades de Capacidad.

Dado que el Plan de Capacidad refleja las disponibilidades de capacidad por periodo de tiempo, es preciso definir el concepto de capacidad disponible; pudiéndose considerar para su cálculo las condiciones teóricas, situaciones ideales, o las circunstancias normales de producción⁶³. Dentro de esta última consideración

⁶² Véase, por ejemplo, Wemmerlöv (1984, p. 32), Connor (1986, p. 21), Cheng (1986, p. 443), Scott (1994, p. 162), Companys y Coromias (1995, p. 276) y Slack (1997, p. 22).

⁶³ Así por ejemplo, según Wemmerlöv (1984, pp. 6-7), podemos distinguir entre capacidad máxima, nominal y demostrada. El primer concepto se refiere a la capacidad que se alcanzaría si se trabaja 24 horas al día y los 7 días de la semana. La capacidad nominal indica la capacidad disponible bajo condiciones normales de fabricación. Por último la capacidad demostrada mide el uso histórico de las horas productivas. Véanse otras definiciones de capacidad disponible en Stevenson (1990, p. 307), Walters (1991, p. 278) o Meredith (1992, p. 176).

se sitúa la definición de capacidad disponible más adecuada al objeto de CRP, la cual indica *“el volumen de output que podría ser logrado por periodo de tiempo en las circunstancias normales de producción, para la eficiencia y utilización reales del factor considerado”* (Domínguez y otros, 1995b, p. 40). Esta forma de cálculo de la capacidad nos dará como resultado el tiempo estándar disponible⁶⁴ (horas estándar, minutos estándar o segundos estándar, por ejemplo), que será fácilmente comparable con las necesidades de capacidad dictadas por el Plan de Carga, ya que vendrán dadas en la misma unidad de medida, tal y como se comentó en el Apartado 2.4.3. En este caso, los factores de utilización y eficiencia, que se utilizarán para el cálculo del tiempo estándar, deben ser representativos del Centro de Trabajo en su conjunto, pudiéndose estimar a partir de la media de los valores de utilización y eficiencia de cada trabajador y/o para cada operación que se ejecute en dicho Centro.

Las distintas técnicas de Planificación de Capacidad han dado en la práctica, una mayor importancia al cálculo y análisis de la carga, relegando la medición sistemática de la capacidad disponible a periodos largos de tiempo, lo que puede originar un grado de error de los valores utilizados del veinte al veinticinco por ciento (Bakke y Hellberg, 1993, p. 249).

2.4.4. Ajustes de la carga y/o capacidad para hacer factible el Plan de Materiales

Aunque CRP realiza una comparación entre el Plan de Carga y el de Capacidad en condiciones normales, ello no implica que cualquier sobrecarga que se produzca en uno o varios cubos de tiempo del horizonte de planificación provoque la inviabilidad del Plan de Materiales y, por ende, del Programa Maestro de Producción del que depende. La técnica CRP puede considerar la posibilidad de poner en práctica medidas que originen un aumento de la capacidad, en aquellos periodos en los que sea necesario, hasta llegar a su capacidad máxima⁶⁵.

Aunque CRP no suele incluir un módulo propio para las decisiones de ajuste de capacidad y carga, la consideración de la capacidad máxima, al objeto de

⁶⁴ Con eficiencia y utilización igual a la unidad.

⁶⁵ Existen varias definiciones de capacidad máxima, en función de las medidas que se contemplen para incrementar la capacidad disponible. Podrá ser el volumen de output alcanzado si se opera 24 h al día y todos los días de la semana (Wemmerlöv, 1984, p. 6), incluyendo además la opción de subcontratar para incrementar la capacidad (capacidad pico definida por Domínguez y otros, 1995b, p. 41) o una capacidad práctica máxima dentro del programa de operaciones normal (véase Domínguez y otros, 1995b, p. 41).

compararla con el Plan de Carga, puede ayudar a discernir, de forma rápida, la importancia de las desviaciones entre los Planes. Posteriormente el planificador elegirá, entre las distintas alternativas de ajuste posibles, las medidas que considere más adecuadas.

Puesto que CRP es una técnica de Planificación de Capacidad a corto plazo, las actuaciones que se pueden llevar a cabo a este nivel, para adecuar la carga y la capacidad por periodo y Centro de Trabajo, son medidas de ajuste transitorio, como por ejemplo la realización de horas extras, contrataciones o despidos, utilización de rutas alternativas, subcontratación, etc. Las distintas acciones aplicables incidirán en el equilibrio, actuando sobre las disponibilidades o sobre las necesidades⁶⁶.

En la comparación de los Planes de Carga y Capacidad se pueden observar dos tipos de desequilibrios: sobreutilización, cuando la carga excede de la capacidad, e infrautilización, en el caso contrario. Para cada uno de ellos se podría disponer de diferentes alternativas de ajuste en función del caso.

Los requerimientos de producción pueden variar considerablemente y, en algunos periodos, lograr exceder la capacidad disponible; en este caso, se origina sobreutilización. Los problemas que ésta ocasiona son fácilmente visibles: aumento de los trabajos en proceso de fabricación, reducción de la calidad, desmoralización de los trabajadores y planificadores, retrasos en las entregas y posible pérdida de clientes. El planificador estudiará la aplicación de medidas para conseguir la viabilidad del Plan de Materiales⁶⁷, las cuales pueden ser de dos tipos:

- **Redistribución de la carga:** que implicará adelantar o retrasar pedidos a periodos donde haya capacidad disponible. Esta medida incide sobre las necesidades, cambiando el Plan de Carga. *“Normalmente la reasignación es el último recurso porque la distribución existente refleja qué se necesita para cumplir el Programa Maestro de Producción”* (Correll y Edson, 1998, p. 129).
- **Aumentar la capacidad de determinados periodos:** lo cual se consigue mediante la utilización de horas extras, turnos de fin de

⁶⁶ Según Domínguez y otros (1995b, pp. 48-52), entre las acciones sobre las disponibilidades se encuentran: las contrataciones o despidos, programación de vacaciones, realización de horas extras o mantenimiento de tiempos ociosos en determinados periodos, movilidad del personal, utilización de rutas alternativas, subcontratación, variaciones del volumen de inventario y reajuste de los lotes de pedidos.

⁶⁷ Véase, por ejemplo, Oden, Langenwaller y Lucier (1993, p. 207) o Melnyk y Denzler (1996, p. 820).

semana, subcontratación, etc. Esta decisión supone actuar sobre las disponibilidades y por tanto variar el Plan de Capacidad.

En el otro extremo, cuando la carga de un periodo es inferior a la capacidad disponible de un Centro de Trabajo, podemos decir que se está infrautilizando. Los problemas que se originan en este caso no son tan evidentes como en la sobreutilización, entre otros: tiempos ociosos en maquinaria y trabajadores, que pueden originar reducción de la rentabilidad de la empresa y disminución de la moral en el trabajo⁶⁸. Las medidas para solucionar la infrautilización pueden ser:

- **Incrementar la capacidad necesaria:** mediante la asignación de carga de periodos en los que existía sobreutilización. De esta manera se actúa sobre las necesidades y originará una variación del Plan de Carga, lo que suele implicar cambios en el Plan de Materiales.
- **Reducir la capacidad disponible en determinados periodos:** mediante la programación de vacaciones, tiempos dedicados al mantenimiento, etc. Lo cual permite ajustar los recursos mediante cambios en el Plan de Capacidad.

Otro procedimiento utilizado para equilibrar el Plan de Capacidad, que puede hacer frente tanto a la sobreutilización como a la infrautilización de los Centros de Trabajo, consiste en cambiar el tamaño de los lotes. A veces se puede observar que la emisión de lotes de un determinado tamaño produce, de forma continua, desajustes en determinados periodos. En tal caso, el planificador deberá estudiar la posibilidad de reducir su tamaño para poder conseguir un Plan de Materiales factible⁶⁹. No obstante, se debe prestar especial atención a las desviaciones negativas (carga mayor que capacidad), ya que, si no se subsanan, pueden derivar en la necesidad de cambiar el Programa Maestro de Producción. También es preciso reducir la infrautilización de los Centros de Trabajo, habida cuenta de los efectos perniciosos para la empresa. No se debe perder de vista, sin embargo, que en el horizonte de planificación es habitual que las desviaciones positivas y negativas se distribuyan entre los distintos periodos⁷⁰, siendo interesante minimizar la necesidad de ajustes, ya que los cambios en los niveles de capacidad de un Centro de Trabajo originan mayores costes para la empresa. Entre otros,

⁶⁸ Véase Smoulin (1986, p. 18).

⁶⁹ La relación de los tamaños de lotes con los desajustes de capacidad puede verse en Harl (1984, p. 24), Harl y Ritzman (1985, p. 310) o Blackstone (1989, pp. 100-105).

⁷⁰ Si todas las desviaciones son negativas puede estar indicando la necesidad de un incremento estructural de la capacidad, mientras que la infrautilización continuada de los Centros de Trabajo puede reflejar problemas que deriven en una contracción de la capacidad.

coste de reubicación del trabajador, horas extras, uso de rutas alternativas o subcontratación.

El procedimiento de equilibrado de carga y capacidad puede llevarse a cabo mediante el apoyo de sistemas que permitan la elección de la alternativa más adecuada, en función de los objetivos y costes de las diferentes actuaciones posibles, ya que la empresa deberá ajustarse a una serie de factores que limitarán sus alternativas⁷¹. Entre otros, se pueden utilizar procedimientos heurísticos, como el aplicado por Harl (1984) en el que se diferenciaban distintas alternativas que actuaban sobre el equilibrio de la carga o sobre los ajustes de requerimientos.

2.4.5. Salidas del CRP

Los Planes de Carga y de Capacidad engloban las salidas principales o básicas, obtenidas mediante la Planificación de Necesidades de Capacidad, y tienen como finalidad reflejar la factibilidad del Plan de Materiales resultado del MRP y por ende, del Programa Maestro de Producción.

Junto a estas salidas, imprescindibles para la Planificación de Capacidad mediante CRP, existen otras a las que podemos otorgar el apelativo de secundarias, que dependen del software aplicado. Por ejemplo, dentro de este grupo podemos encontrar⁷²:

- Gráficos de barras: que distinguen entre distintos tipos de órdenes (en proceso, emitidas y planificadas) o entre diferentes orígenes de las cargas (separando las provocadas por la ejecución de las operaciones y las derivadas del ajuste de las instalaciones).
- Comparación entre la planificación obtenida mediante la programación hacia atrás y la programación hacia delante.

⁷¹ Como pueden ser:

“- Limitaciones del entorno en el que la empresa se desenvuelve.

- Las políticas de la empresa.

- El plazo disponible para ponerlas en marcha y corregir el desajuste.

- El tipo y volumen de la divergencia capacidad disponible y carga.” Domínguez y otros (1995b, p. 52).

⁷² Véase Monks (1985, p. 264) o Scott (1994, pp. 161-162).

- Información sobre los niveles de utilización de los Centros de Trabajo.
- Diferentes alternativas para hacer frente a los desajustes de capacidad.

La información que se obtiene de la aplicación de la técnica CRP, ya sea a través de fuentes primarias o secundarias, será utilizada por el planificador para la evaluación de las alternativas de ajuste de capacidad que ayuden a hacer frente a las posibles desviaciones⁷³.

2.4.6. Ventajas de la aplicación de la técnica CRP

Muchos de los beneficios que se pueden obtener de la aplicación de la técnica CRP (por supuesto, siempre que la información proporcionada se ajuste a la realidad), provienen de su capacidad de simulación⁷⁴, la cual se ve facilitada por el uso de ordenadores para su aplicación, si bien, éstos *“sólo hacen que el sistema funcione mas rápidamente”* (Smolin, 1986, p. 20).

El hecho de que inicialmente se asigne a cada periodo toda la carga que se origine en él (característica propia de las técnicas de capacidad infinita), permite descubrir sobrecargas o subempleos de capacidad que podrán catalogarse como coyunturales o crónicas, lo cual quedaría oculto con el uso de la reprogramación automática, propia de las técnicas finitas. En el caso de que se produzcan sobrecargas en uno o varios Centros de Trabajo, el planificador actuará reasignando las cargas o añadiendo capacidad extra temporalmente, cuando sea un desajuste coyuntural, o bien, en caso contrario se plantearán medidas de incremento de capacidad con efectos más prolongados. La infrautilización de los Centros de Trabajo justificará las medidas de recorte de capacidad y ayudará a planificar los periodos de vacaciones o los destinados al mantenimiento de los equipos productivos.

Dado que para la búsqueda del equilibrio entre capacidad y carga, se parte de más opciones que las consideradas en las técnicas de capacidad finita (como variaciones en la fuerza de trabajo, las máquinas, las herramientas, el uso de rutas alternativas, subcontratación, etc.), el plan resultante se adaptará mejor a los

⁷³ Como puede ser la contratación o despido de personal en aquellos Centros de Trabajo con desviaciones crónicas de capacidad, cambios en la técnica de asignación de la capacidad originada por los bajos niveles de servicio o, en el otro extremo, por altos costes de almacenamiento, etc.

⁷⁴ Véase, por ejemplo, Connor (1986, p. 19) o Smolin (1986, p. 20).

objetivos de la empresa que el calculado con otras técnicas que no toman en cuenta el componente humano en las decisiones de ajuste.

2.4.7. Inconvenientes de la técnica CRP

El principal inconveniente que presenta la técnica CRP es la vinculación de la representatividad de los Planes de Carga y Capacidad elaborados, con la precisión de las estimaciones de la gran cantidad de variables aleatorias que son necesarias para los cálculos, cuyo volumen es proporcional a la complejidad del proceso productivo. Basándonos en el procedimiento utilizado por CRP, observamos que, a menos que tomen valores constantes (cosa muy improbable en la práctica), es preciso estimar los promedios de:

- Tiempos de confección de pedido de todos los ítems con los que trabaja la empresa (productos finales y componentes comprados del exterior o fabricados por la empresa).
- Tiempos de desplazamientos de los distintos materiales hasta los Centros de Trabajo en que se desarrollan cada una de las operaciones en las que puedan estar implicados.
- Tiempos de cola en todos los Centros de Trabajo.
- Tiempo de ejecución unitario de todas las operaciones que se realizan en la empresa.
- Tiempo de preparación medio, por Centro de Trabajo, para realizar una nueva operación.
- Tiempo de espera, en cada Centro de Trabajo, para el desplazamiento del lote.
- Tiempo de inspección unitario de cada ítem, en las distintas etapas del proceso de fabricación.
- Factor de defectuosas de cada una de las operaciones de la empresa.
- Factor de eficiencia de cada Centro de Trabajo.

- Factor de utilización de cada Centro de Trabajo.

Como se puede apreciar, el número de variables aleatorias empleadas por esta técnica para la Planificación de la Capacidad, es muy alto, lo cual constituye un importante problema, que además está en la base de otros problemas importantes, por ejemplo, en el hecho de que la probabilidad de cumplimiento del plan elaborado de CRP, suela ser muy baja. Es obvio que la exactitud de la planificación elaborada con la técnica CRP depende de la precisión de estas estimaciones (Classen y Malstrom, 1982; Cheng, 1986; Bernard, 1990), por lo que, como afirma Ptak *“sólo cuando el tiempo de preparación, tiempo de ejecución y la capacidad disponible son extremadamente exactos y realizables el proceso funcionará bien”*⁷⁵. Dada la importancia de este inconveniente de CRP, como ya comentamos en el Apartado 1.2., es uno de nuestros objetivos demostrar analíticamente esta cuestión. De hecho, una vez analizada la probabilidad de cumplimiento del plan elaborado mediante esta técnica en el Apartado 4.4., se podrá comprobar que dicha probabilidad será muy baja para los recursos y esfuerzo que requiere, salvo que los valores de las probabilidades de que los valores medios estimados de todas las variables aleatorias que emplea, sean muy cercanos a la unidad o, lo que es igual, que estemos trabajando en un universo prácticamente cierto. Sin embargo, esto raramente ocurrirá en la realidad, donde la Planificación de Capacidad deberá desarrollarse en un universo aleatorio.

A todo ello hay que unir las características propias de la empresa en general, así como la variabilidad de la demanda de los distintos ítems. Es decir, la complejidad de los productos, reflejada por un mayor número de operaciones, componentes comunes a diferentes ítems, la necesidad de transitar por varios Centros de Trabajo para la elaboración de un ítem, etc., inciden en la complejidad del proceso productivo y, por ende, en la variabilidad de la Planificación de Capacidad, acentuando así el inconveniente anteriormente descrito.

Además, el procedimiento de cálculo de la técnica CRP conlleva la consideración de una serie de simplificaciones que pueden llegar a provocar diferencias significativas entre la planificación elaborada y la realidad, incidiendo con ello en la representatividad de los planes:

- Se considera fijo el tiempo de suministro para cada tipo de ítem. En realidad, realmente suele variar con el tamaño del lote. Existen programas más sofisticados, que permiten adaptarlo parcialmente, calculando el tiempo de ejecución en función del tamaño del lote. Sin

⁷⁵ Ptak (1997, pp. 173-174).

embargo, deja fijo el resto de elementos que componen el tiempo de suministro.

- Utiliza un tiempo de preparación medio para cada Centro de Trabajo. No obstante, este valor puede variar en función de la operación a realizar y de la ejecutada con anterioridad, por lo que habría que disponer de información de todos los tiempos necesarios para el ajuste de las instalaciones.
- No tiene en cuenta la disciplina de cola a la entrada ni a la salida del Centro de Trabajo, lo cual incidirá sobre el tiempo de cola, sobre el tiempo de espera y sobre la frecuencia con la que será necesario tiempo de preparación.
- El factor de utilización es habitualmente calculado por Centro de Trabajo. Sin embargo, sobre él incidirán las características propias de las diferentes operaciones que se realicen en el Centro. Si bien es común que las variables ambientales de un Centro de Trabajo coincidan en las distintas operaciones que allí se llevan a cabo (intensidad de la luz, calidad del aire, grado de humedad, etc.), puede haber diferencias con respecto al grado de concentración necesario, la postura o posición utilizada para ejecutar la operación (que puede conllevar, por ejemplo, un mayor riesgo de absentismo por enfermedad), la necesidad de levantar peso o hacer uso de la fuerza, etc.
- La técnica CRP, al igual que otras técnicas de Planificación de Capacidad, no toma la capacidad disponible como dinámica y variable.

Tomando como base las consideraciones anteriores, podemos decir que de las características propias del proceso de cálculo se derivan serios inconvenientes, tales como:

- La gran cantidad de información que precisa (tiempos de carga, de desplazamiento, de preparación, de inspección, rutas, eficiencia y utilización de los Centros de Trabajo, etc.), la cual ha de ser muy exacta para obtener un resultado realista en los planes obtenidos.
- Los cálculos a realizar que, si bien no son complejos, son muy numerosos, lo que, unido a que, como hemos comentado, emplean un gran volumen de información, hacen que se requieran altos tiempos de computación.

- Las dos cuestiones anteriores, provocan que sea una técnica bastante costosa.
- Es necesaria una importante formación del personal y una gran disciplina en la generación, ejecución y seguimiento de los planes generados, lo que hace que sea una técnica bastante compleja de implementar para lograr buenos resultados.
- Una vez desarrollada, si el Plan de Carga obtenido genera sobrecargas en uno o varios Centros de Trabajo, es casi imposible apreciar qué las provocan, debido a que las cargas de los Centros de Trabajo en cada período, se derivan de distintos pedidos de diferentes ítems. Las simulaciones de prueba y error para corregir las desviaciones pueden ser muchas, además de lentas y costosas.
- La técnica CRP no calcula la secuencia en la que deben realizarse las operaciones en cada Centro de Trabajo para alcanzar los objetivos en este nivel de planificación (como pueden ser: reducir los costes, aumentar el servicio al cliente o mejorar el aprovechamiento de la capacidad de las instalaciones).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, E. E. y EBERT R. J. (1991), *Administración de la producción y las operaciones: conceptos, modelos y funcionamiento*, Prentice-Hall, México.
- ADAMS, F. P. y COX, J. F. (1985), "Manufacturing resource planning: An information systems model", *Long Range Planning*, Vol. 18, No. 2, pp. 86-92.
- BAKKE, N. A. y HELLBERG, R. (1993), "The challenges of capacity planning", *International Journal of Production Economics*, Vol. 30-31, pp. 243-264.
- BERNARD, P. (1990), "Inaccurate Schedules? Check Your CRP Logic", *Production & Inventory Management Review & Apics News*, Vol. 10, No. 1, pp. 37-40.
- BICHENO, J. y ELLIOT, B. (1997), *Operations Management*, Blackwell, Malden, Massachusetts.
- BLACKSTONE, J. H., JR (1989), *Capacity Management*, South-Western Publishing, Cincinnati.
- BROWNE, J., HARHEN, J. y SHIVNAN, J. (1996), *Production Management Systems: An integrated perspective*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

- BURCHER, P. G. (1992), "Effective Capacity Planning", *Management Services*, Vol. 36, No. 10, pp. 22-25.
- BURMAN, R. (1995), *Manufacturing Management: Principles and System*, McGraw-Hill, Berkshire, England.
- CHENG, T. C. E. (1986), "Capacity requirements planning by stochastic linear programming", *Mathematical Modelling*, Vol. 7, No. 2-3, pp. 443-448.
- CLASSEN, R. J. y MALSTROM, E. M. (1982), "Effective Capacity Planning for Automated Factories Requires Workable Simulation Tools and Responsive Shop Floor Controls", *Industrial Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 73-77.
- COMPANYS PASCUAL, R. y COROMINAS SUBIAS, A (1995), *Organización de la Producción II*, Edicions UPC, Barcelona.
- CONNOR, S. (1986), "The Value-Added Equation", *Manufacturing Systems*, Vol. 4, No. 12, pp. 19-22.
- CORRELL, J. G. y EDSON, N. W. (1998), *Gaining Control: Capacity Management and Scheduling*, John Wiley & Sons, New York.
- DÍAZ, A. (1993), *Producción: Gestión y Control*, Ariel, Barcelona.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A., DURBÁN OLIVA, S. y MARTÍN ARMARIO, E. (1990), *El Subsistema Productivo de la Empresa*, Pirámide, Madrid.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A., y otros (1995a), *Dirección de Operaciones. Aspectos estratégicos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A., y otros (1995b), *Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- ERSCHLER, J. y otros (1986), "Consistency of the Dissagregation Process in Hierarchical Planning", *Operations Research*, Vol. 34, No. 3, pp. 464-469.
- FOGARTY, D. W., BLACKSTONE, J. H. JR y HOFFMANN, T. R. (1991), *Production & Inventory Management*. APICS. Cincinnati.
- GARCÍA GONZÁLEZ, S. y GARCÍA GRAGERA, J. A. (1996): "Medición de la capacidad en configuraciones productivas por funciones: los tiempos de carga unitarios", *Alta Dirección*. Nº 186 y 187. pp. 111-120 y 201-209.
- GELDERS, L. F. y VAN WASSENHOVE, L. N. (1982): "Hierarchical Integration in Production Planning: Theory and Practice", *Journal of Operations Management*, Vol.3, No. 1, pp. 27-35.
- GIBSON, P., GREENHALGH, G. y KERR, R. (1995), *Manufacturing Management. Principles and concepts*, Chapman & Hall, Cornwall.
- GODDARD, W. (1984), "Shop Floor Control: Its Role in Manufacturing", *Modern Materials Handling*, Vol. 39, No. 12, pp. 51-58.
- GODDARD, W. E. (1986), "Capacity Planning: Ten Steps to Better Operating Control", *Industrial Management*, Vol. 10, No. 4, pp. 22-27.
- GOLDRATT, E. y COX, J. (1986), *La Meta: un proceso de mejora continua*, Editorial Taular.

- GREENE, J. H. (1997), *Production And Inventory Control Handbook*, McGraw-Hill, New York.
- HARL, J. E. (1984), "Alternative Heuristics for Large Scale Capacitated Requirements Planning Systems", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 4, No. 3, pp. 22-35.
- HARL, J.E. y RITZMAN, L. P. (1985), "A heuristic algorithm for capacity sensitive requirements planning", *Journal of Operations Management*, Vol. 5, No. 3, pp. 309-326.
- HAYES, R. H. y WHEELWRIGHT, S. C. (1984), *Restoring our competitive edge: competing through manufacturing*, John Wiley and Sons, Nueva York.
- HEIZER, J. y RENDER, B. (2001), *Dirección de la Producción. Decisiones Tácticas*, Prentice-Hall, Madrid.
- JOHNSON, A. (1986), "MRP? MRPII? OPT? CIM? FIS? JIT? Is any system letter perfect?" *Management Review*, Vol. 75, No. 9, pp. 22-27.
- JONSSON, P. y MATTSSON, S. (2002), "Use and applicability of capacity planning methods", *Production and Inventory Management*, Vol. 43, No. 3/4, pp. 89-95.
- JONSSON, P. y MATTSSON, S. (2003), "The implications of fit between planning environments and manufacturing planning and control methods", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 23, No. 8, pp. 872-900.
- KHUMAWALA, B. M., HIXON, C. y LAW, J. S. (1986), "MRP II in the Service Industries", *Production and Inventory Management*, Vol. 27, No. 3, pp. 57-64.
- LANDVATER D. V. (1993), *World Class Production and Inventory Management*, Oliver Wight, Vermont.
- LANKFORD, R. (1990), "Capacity Management in Complex Production Environments", *Production & Inventory Management Review & Apics News*, Vol. 10, No. 5, pp. 40-43.
- LARRAÑETA, J. C. y otros, (1988), *Métodos modernos de Gestión de la Producción*, Alianza Universidad.
- LUNN, T. y NEFF, S. A. (1992), *MRP Integrating Material Requirements Planning And Modern Business*, Irwin, New York.
- MACKULACK, G. T. y otros (1980), "Computerized Hierarchical Production Control in Steel Manufacturing", *International Journal of Production Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 455-466.
- MARKLAND, R., VICKERY, S. y DAVIS, R. (1995), *Operations Management. Concepts in Manufacturing and Services*, West Publishing, St. Paul, Massachusetts.
- MCCARTHY, S. W. y BARBER, K. D. (1990), "Medium to short term finite capacity scheduling: a planning methodology for capacity constrained workshops", *Engineering Costs and Production Economics*, Vol. 19, pp. 189-199.

- MELNYK, S. A. y DENZLER, D. R. (1996), *Operations Management*, Irwin, New York.
- MEREDITH, J. R. (1992), *The Management of Operations: a conceptual emphasis*, John Wiley and Sons.
- MONKS, J.G. (1985), *Administración de Operaciones*, McGraw-Hill, Naupalcan de Juárez, Mexico.
- NARASIMHAN, S. L., MCLEAVEY, D. W. y BILLINGTON, P. J. (1996), *Planeación de la Producción y Control de Inventarios*, Prentice Hall, Naupalcan de Juárez, Mexico.
- ODEN, H. W., LANGENWALTER, G. A. y LUCIER, R. A. (1987), "Integrating Manufacturing Resources Planning (MRP II) with Flexible Manufacturing Systems (FMS)", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 13, No. 1-4, pp. 107-111.
- ODEN, H. W., LANGENWALTER, G. A. y LUCIER, R. A. (1993), *Handbook of Material & Capacity Requirements Planning*, McGraw-Hill, New York.
- ORLICKY, J. (1975), *Material Requirements Planning*, McGraw Hill, New York.
- PANDEY P. C., YENRADEE P. y ARCHARIYAPRUEK S. (2000), "A finite capacity material requirements planning system", *Production Planning and Control*, Vol. 11, No. 2, pp. 113-121.
- TAAL, M y WORTMANN, J. C. (1997), "Integrating MRP and finite capacity planning", *Production Planning & Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 245-254.
- PLENERT, G. (1992), "What Does a Decision Support System (DSS) Do for Manufacturing?", *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 33, No. 1, pp. 17- 19.
- PLENERT, G. (2002), *International Operations Management*, Copenhagen Business School Press, Copenague.
- PLENERT, G. y BEST, T., (1986), "MRP, JIT, and OPT what's best?", *Production and Inventory Management*, Vol. 27, No. 2, pp. 22-29.
- PLENERT, G. y KIRCHMIER, B. (2000), *Finite Capacity Scheduling. Management, Selection and Implementation*, John Wiley & Sons, Nueva York.
- PLOSSL G. W. y WIGHT, O. W. (1973), *Capacity Planning and Control*, *Production and Inventory Management*, Vol. 14, No. 3, pp. 30-67.
- POPE, J. A. y WERMUS, M. (1993), "The university in an MRP framework: The administration perspective", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 13, No. 2, pp. 36-46.
- PTAK, C. (1991), "MRPII, OPT, JIT and CIM-Succession, evolution, or necessary combination", *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 32, No. 2, pp. 7-11.
- PTAK, C. A. (1997), *MRP and Beyond*, McGraw-Hill, New York.
- SCHMITT, T. G., BERRY, W. L. y VOLLMANN, T. E. (1984), "An Analysis of Capacity Planning Procedures for a Material Requirements Planning System", *Decision Sciences*, Vol. 15, No. 4, pp. 522-541.

- SCOTT, B. (1994), *Manufacturing Planning System*, McGraw-Hill, Berkshire, England.
- SLACK, N. (1997), *The Blackwell Encyclopedic Dictionary of Operations Management*, Blackwell, Oxford.
- SMOLIN, C. R. (1986), "CRP: Who Needs It ... And Why", *Manufacturing Systems*, Vol. 4, No. 12, pp. 14-16.
- STEVENSON, W. J. (1990), *Production/Operations Management*, Irwin, Lugar.
- THOMPSON, K. (1983), "MRP II in the Repetitive Manufacturing Environment", *Production and Inventory Management*, Vol. 24, No. 4, pp. 1-14.
- VOLLMANN, T. E., BERRY, W. L. y WHYBARK, D. C. (1995), *Sistemas de Planificación y Control de Producción*, Irwin, Mexico.
- WACKER, J. G. (1985), "Effective Planning and Cost Control for Restaurants: Making Resource Requirements Planning Work", *Production and Inventory Management*, Vol. 26, No. 1, pp. 55-70.
- WALTERS, C. D. J. (1991), *An Introduction to Operations Management*, Addison Wesley.
- WEMMERLÖV, U. (1979), "Design Factors in MRP Systems: a Limited Survey", *Production and Inventory Management*, Vol. 20, No. 4, pp. 15-34.
- WEMMERLÖV, U. (1984), *Capacity Management Techniques. For Manufacturing Companies with MRP Systems*, American Production and inventory Control Society, Cincinnati, Ohio.
- WOODWARD, J. (1965), *Industrial organization: theory and practice*, Oxford University Press, Londres.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- ADAM, N. y SURKIS, J., (1977), "A comparison of capacity planning techniques in a job shop control system", *Management Science*, Vol. 23, No. 9, pp. 1044-1015.
- ALEY, P. N. y ZIMMER, G. H. (1974), "Capacity planning", *Industrial Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 16 -19.
- AQUILANO, N., CHASE, R. y DAVIS, M. (1995), *Fundamentals of Operations Management*, Irwin, Homewood, Illinois.
- BAHL, H. C. y RITZMAN, L. P. (1983), "An Empirical Investigation of Different Strategies for Material Requirements Planning", *Journal of Operations Management*, Vol. 3, No. 2, pp. 67 - 77.
- BAHL, H. C. y RITZMAN, L. P. (1984), "An Integrated Model for Master Scheduling, Lot Sizing and Capacity Requirements Planning", *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 35, No. 5, pp. 389 - 399.

- BELT, B. (1976): Integrating Capacity Planning and Capacity Control, *Production and Inventory Management*, Vol. 17, No. 1, pp. 9-16.
- BERRY, W. L., SCHMITT, T. G. y VOLLMANN, T. E. (1982), "Capacity Planning Techniques for Manufacturing Control Systems: Information Requirements and Operational Features", *Journal of Operations Management*, Vol. 3, No. 1, pp. 13-25.
- BITRAN, G. R. y HAX, A. C. (1977), "On the Design of Hierarchical Production Planning Systems", *Decision Sciences*, Vol. 8, No. 1, pp. 28-55.
- BLACKSTONE JR., J. H. (1985), "Tutorial on Capacity Planning", *Annual International Conference Proceedings - American Production and Inventory Control Society 28th*, pp. 105-107.
- CHAN, J. W. K. (2005), "Competitive strategies and manufacturing logistics: An empirical study of Hong Kong manufacturers", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 35, No. 1, pp. 20.
- CHEN, J., FAN, Y. y CHEN, C. (2009), "Capacity requirements planning for twin Fabs of wafer fabrication", *International Journal of Production Research*, Vol. 47, No. 16, pp. 4473-4496.
- CHUNG, S., HUANG, C. y LEE, A. (2008), "Heuristic algorithms to solve the capacity allocation problem in photolithography area (CAPPA)", *OR Spectrum*, Vol. 30, No. 3, pp. 431.
- CHUNG, S., LEE, A., HUANG, C. y CHUANG, C. (2008), "Capacity pricing mechanism for wafer fabrication", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 55, No. 3, pp. 647.
- COLLIER, D. A. (1980), "A Comparison of MRP Lot Sizing Methods Considering Capacity Change Costs", *Journal of Operations Management*, Vol. 1, No. 1, pp. 23-28.
- CORRELL, J. (1984), "A Case for Capacity Management", *ICP Interface*, Vol. 9, No. 3, pp. 21 - 22.
- CREPEAU, E. A. (1995), "CRP: manage your capacity...or it will manage you!", *Annual*, pp. 134-136.
- FATTAHI, P., SAIDI MEHRABAD, M. y JOLAI, F. (2007), "Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 18, No. 3, pp. 331-342.
- FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, E. y VAZQUEZ ORDAS, C.J. (1994), *Dirección de la Producción. II. Métodos Operativos*, Civitas, Madrid.
- FISK, J. C. (1979), "A Goal Programming Model for Output Planning", *Decision Sciences*, Vol. 10, No. 4, pp. 593-603.
- FOLEY, M. J. (1988), "The Winds of Change Are Blowing for MRP II Users", *Datamation*, Vol. 34, No. 3, pp. 19 - 21.
- FRAZER, J. D. y NAKHAI, B. (1992), "The Problems with MRP on Microcomputer Spreadsheets", *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 1 - 5.

- GALLOWAY, R. L. (1994), *Principles of Operations Management*, Routledge, Kent.
- GREENE, J. H. (1997), *Production And Inventory Control Handbook*, McGraw-Hill, New York.
- HOLSTEIN, W. (1968), "Production Planning and Control Integrated", *Harvard Business Review*, Vol. 46, No. 3, pp. 121-140.
- HOPEMAN, R.J y (1973), *Producción. Conceptos, análisis y control*, Compañía Editorial Continental, Calz. De Tlalpan, Mexico.
- HOUGHTON, E y PORTOUGAL. V. (1995), "A planning model for just-in-time batch manufacturing", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 9, pp. 9-26.
- HUNG Y. F. y CHIEN K. L. (2000), "A multi-class multi-level capacitated lot sizing model", *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, No. 11, pp. 1309-1318.
- IWATA, Y., TAJI, K. y TAMURA, H. (2003), "Multi-objective capacity planning for agile semiconductor manufacturing", *Production Planning and Control*, Vol. 14, No. 3,
- JAYARAMAN, V. y SRIVASTAVA, R. (1996), "Expert systems in production and operations management. Current applications and future prospects", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 16, No. 12, pp. 27-44.
- JONES, W. J. (1992), "Rough-cut capacity planning and CRP, which method suits your company?", *Annual International Conference Proceedings - American Production and Inventory Control Society*, pp. 629-632.
- JUSTICE, K. (1985), "Tailored MRP", *ICP Manufacturing Software*, Vol. 10, No. 2, pp. 14 - 16.
- KARNI, R. (1982), "Capacity Requirements Planning - A Systematization", *International Journal of Production Research*, Vol. 20, No. 6, pp. 715-739.
- KASILINGAM, R. G. (1991), "Mathematical Modeling of the AGVS Capacity Requirements Planning Problem", *Engineering Costs and Production Economics*, Vol. 21, No. 2, pp. 171 - 175.
- KEKRE, S., RAO, U., SARTHI, S. y YI, J. (2004), "Risk-Based Integration of Strategic and Tactical Capacity Planning", *Annals of Operations Research*, Vol. 132, No. 1-4, pp. 85.
- KREPCHIN, I. P. (1986), "How We Got to Class A MRP Status in One Year", *Modern Materials Handling*, Vol. 41, No. 14, pp. 107 - 109.
- KREPCHIN, I. P. (1989), "Using Computers for Planning and Control", *Modern Materials Handling*, Vol. 44, No. 13, pp. 68-71.
- KULONDA, D. J. (1983), "Using CRP Output: What Have You Done For Your Plant Manager Lately?", *Annual International Conference Proceedings - American Production and Inventory Control Society 26th.*, pp. 324-326.

- LEE, C. Y. (1993), "A recent development of the integrated manufacturing system: A hibrid of MRP and JIT", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 13, No. 4, pp. 3-18.
- LEMEN, Z. y ZHANG, Z. (2004), "Research about Basic Data Related to CRP and Problem Improvement for ERP Implementation", *Computer Engineering*, Vol. 30, No. 12, pp. 434-436.
- MANJI, J. F. (1990), "MRP Adapts to Forging Dies", *Automation*, Vol. 37, No. 8, p. 56.
- MASKELL, B. (1987), "Just-in-Time Manufacturing", *Industrial Management + Data Systems*, Vol. 87, No. 9, pp. 17 - 20.
- MATSUURA, H. y TSUBONE, H. (1993), "Setting planned leadtimes in capacity requirements planning", *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 44, No. 8, pp. 809 - 816.
- MIKE, T. Z. y otros (2007), "Hierarchical capacity Planning With Reconfigurable Kits in Global Semiconductor Assembly and Test Manufacturing", *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 543-552.
- MUSSELMAN, K., O' REILLY, J. y DUKET, S. (2002), "The role of simulation in advanced planning and scheduling", *Proceedings of 2002 the Winter Simulation Conference*, pp. 1825-1830.
- NAHMIAS, S. (1999), *Análisis de la producción y las operaciones*, Compañía Editorial Continental, Colonia San Juan Tlihuaca.
- NAYLOR, J. (1999), *Operations Management*, Pitman Publishing, Glasgow.
- NOORI, H. y RADFORD, R. (1997), *Administración de Operaciones y Producción*, McGraw-Hill, Santafé de Bogotá.
- PARASKEVOPOULOS, D., KARAKITSOS, E. y RUSTEM, B. (1991), "Robust Capacity Planning under Uncertainty", *Management Science*, Vol. 37, No. 7, pp. 787-800.
- PÉREZ GOROSTEGUI, E. (1989), *Economía de la Empresa (Introducción)*, Centro de Estudios Ramón Areces.
- PILLAI, V. y CHANDRASEKHARAN, M. (2008), "An absorbing Markov chain model for production systems with rework and scrapping", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 55, No. 3, pp. 695.
- PLENERT, G. (1999), "Focusing material requirements planning (MRP) towards performance", *European Journal of Operations Research*, Vol. 119, pp. 91-99.
- PLOSSL, G.W. (1988), "Throughput time control", *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 493-499.
- RAO, A. y SCHERAGA, D. (1988), "Moving From Manufacturing Resource Planning To Just-In-Time", *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 29, No. 1, pp. 44 - 49.
- REITER, S. (1966), "A System for Managing Job-Shop Production", *The Journal of Business of the University of Chicago*, Vol. 39, pp. 371-393.

- ROBB, D. (2005), "Up to Capacity", *Computerworld*, Vol. 39, No. 35, pp. 24-26.
- RUSSELL, R. y TAYLOR, B. (1995), *Production and Operations Management*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- SARMENTO COSTA, R y JARDIM, E. G. M. (1998), "Total punctuality approach for the jobbing industry", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 18, No. 3, pp. 260-270.
- SCHROEDER, R. (1992), *Administración de Operaciones*, McGraw-Hill, México.
- SNYDER, C. (1985), "Bright New Promise: Micro MRP II Moves into the Mainstream", *ICP Manufacturing Software*, Vol. 10, No. 2, pp. 11 - 13.
- SNYDERS, J. (1982), "Inventory Control: It's Like Money in the Bank", *Computer Decisions*, Vol. 14, No. 6, pp. 54 - 62.
- STONEBRAKER, P. W. y LEONG, G. K. (1994), *Operations Strategy*, Allyn & Bacon, Needham Heights, Massachusetts.
- THOMPSON, M. B. (1993), "Simulation-based capacity planning and sheduling with autoshed", *Proceedings of the 1993 Winer Simulation Conference*, pp. 255-262.
- TOOMEY, J. W. (1996), *MRP II Planning for Manufacturing Excellence*, Chapman & Hall, New York.
- TOYE JR., C. A. (1990), "Let's update capacity requirements planning logic", *Annual International Conference Proceedings - American Production and Inventory Control Society*, pp. 215-221.
- TRINO, J. (1990), "The Competitive Advantage Is Provided By Integrated Informa", *Industrial Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 36 - 38.
- TURBIDE, D. A. (1994), "What's so new about execution systems?", *3X/400 Systems Management*, Vol. 22, No. 3, pp. 130 - 131.
- VONDEREMBSE, M. A. y WHITE, G. P. (1996), *Operations Management*, West Publishing, St. Paul, Minneapolis.
- WALLACE, T. ed. (1987), *APICS Dictionary*, American Production and inventory Control Society, Falls Church.
- WEIL M. y (2000), "Meeting diverse demands", *Manufacturing Systems*, Vol. 18, No. 4, pp. 30-34.
- WEMMERLÖV, U. (1980), "A Note on Capacity Planning", *Production and Inventory Management*, Vol. 21, No. 3, pp. 85-89.
- WENYI, Y., JIAN, L., JUNBIN, Y., JIANHUA, P. y XIAOQIANG, W. (2007), "A study of the method of capacity requirements planning", *Proceedings IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, GSIS*, pp. 1363-1369.
- WIGHT, O. W. (1981), *MRP II, Unlocking America's Productivity Potential*, CBI Publishing, Mass, Boston.
- WILLIAMS, B. R. (1995), *Manufacturing for Survival*, Addison-Wesley Publishing, Massachusetts.
- WORTMAN, J. C., EUWE, M. J., TAAL, M. y WIERS, V. C. S. (1996), "A review of capacity planning techniques within standard software packages", *Production Planning and Control*, Vol. 7, No. 2, pp. 117-128.

ZOBOLAS, G. I., TARANTILIS, C. D. y IOANNOU, G. (2008), "Extending capacity planning by positive lead times and optional overtime, earliness and tardiness for effective master production scheduling", *International Journal of Production Research*, Vol. 46, No. 12, pp. 3359-3386.

PARTE III

ANÁLISIS DE LA EFICACIA Y UTILIZACIÓN DE CRP

CAPÍTULO

3

LA INFLUENCIA DE LA ALEATORIEDAD DEL TIEMPO DE SUMINISTRO SOBRE EL PLAN DE CARGA

3.1. INTRODUCCIÓN

Como ya se precisó en el Apartado 2.3., la planificación de la capacidad tiene como objetivo la determinación de la capacidad necesaria (carga) para llevar a la práctica un determinado plan o programa de producción, así como la asignación de aquella a periodos concretos del horizonte de planificación. En consecuencia, obviamente, las desviaciones entre la carga planificada para un determinado plan o programa de producción y la carga real que se derive de su ejecución, pueden tener dos orígenes: las variaciones relativas al periodo en el que se asigna la carga y las diferencias en el volumen de ésta.

La primera de las fuentes de variación mencionadas (la asignación de la carga), depende directamente del tiempo de suministro del ítem cuya carga se planifica y de los componentes del mismo, lo cual ya nos da una idea de la importancia de estos elementos de cara a los objetivos del presente trabajo. Además, dicha importancia se intensifica si tenemos en cuenta que el tiempo de carga, segunda fuente de desviación, es uno de los elementos que componen el tiempo de suministro.

Por todo ello resulta fundamental analizar el tiempo de suministro, separando los elementos que lo componen, para centrarnos en sus distintas formas de cálculo, las cuales pueden afectar a la aleatoriedad de la estimación que, en definitiva, será la que origine las desviaciones en el Plan de Carga elaborado.

3.2. EL TIEMPO DE SUMINISTRO INTERNO

El tiempo de suministro o plazo de entrega, se define como el “*intervalo de tiempo que transcurre entre que se solicita un pedido y el instante de su llegada*” (Domínguez y otros, 1990, p. 620). Esto implica que, en función de que el pedido se solicite a proveedores (ítems adquiridos en el exterior) o que funcione como orden de fabricación (ítems fabricados por la propia empresa), se pueden distinguir dos tipos de tiempo de suministro: el externo y el interno.

En el primer caso, una vez realizado el pedido, se pierde el control sobre él, dependiendo principalmente de los proveedores; su incumplimiento puede retrasar el comienzo de la fabricación de un componente, pero no afectará a la determinación de las cargas del Plan de Capacidad.

El segundo, el tiempo de suministro interno (también llamado tiempo de suministro de fabricación, *manufacturing lead time*) “*comprende el tiempo necesario para transportar, preparar y montar o procesar cada componente*” (Heizer y Render, 2001, p. 157). Como el pedido es solicitado a la misma empresa, se puede mantener cierto control sobre él. Eso sí, **incidirá de manera determinante** sobre la Planificación de Capacidad, dado que afectará al cálculo y cumplimiento de las cargas (puesto que incluye los tiempos de ejecución y de preparación) y a los momentos en que éstas se producen en los diferentes Centros de Trabajo.

Es por eso que, a partir de aquí, nos centraremos en el presente capítulo en el tiempo de suministro interno. Además, dado que CRP es aplicado fundamentalmente en configuraciones productivas por lotes¹, procederemos a estudiarlo en el caso de dicha configuración.

Como vimos en el Apartado 2.4.2.4., el tiempo de suministro interno (en adelante tiempo de suministro), en configuraciones por lotes, sería la suma de los tiempos de: confección de pedido, cola, preparación, ejecución, espera,

¹ Véase, por ejemplo, Oden, Langenwaller y Lucier (1993, p. 179), Landvater (1993, pp. 167-168), Domínguez y otros (1995b, p. 155) o Bicheno y Elliot (1997, p. 439).

desplazamiento e inspección. No obstante, de todos ellos, sólo genera carga el tiempo de procesamiento, el cual está compuesto por el tiempo dedicado a la preparación de las instalaciones y el tiempo de ejecución de una operación a todas las unidades del lote, siendo esta última actividad la única que genera valor añadido, aún cuando, según estudios², sólo comprende entre un cinco y un veinte por ciento del tiempo de suministro. De hecho, otros trabajos subrayan la importancia de los tiempos de espera, que pueden llegar a suponer más del ochenta por ciento del plazo de entrega³.

Centrándonos en el caso de la configuración por lotes (una empresa que fabrica diversos lotes de productos a partir de componentes comprados y/o fabricados por ella), hemos de partir del hecho de que, cada uno de los ítems que elabora (sean productos finales o componentes), requiere una serie de operaciones, de forma que cada operación está codificada y se realiza en un determinado orden y Centro de Trabajo, componiendo así su ruta. Es evidente, que una misma operación podría ejecutarse a varios ítems e, incluso, realizarse en varios Centros de Trabajo diferentes para dotar de mayor flexibilidad al sistema. En estos casos, para facilitar la formulación, la operación se codificará con otro número distinto. Por ejemplo, en una empresa de ebanistería la operación de cortar un tablón de 1 m² se denotará con un número distinto en función del ítem al que va destinado dicho tablón (una mesa de escritorio, de salón, etc.).

En términos generales, la empresa desarrollaría I operaciones diferentes, para cada una de las cuales emplearía uno de los M Centros de Trabajo de que dispone (encargado de realizar al menos una operación), obteniendo J ítems con códigos distintos. Basándonos en el hecho de que los elementos que conforman el tiempo de suministro suelen actuar, en general, como variables aleatorias, podríamos calcular el valor medio del tiempo de suministro interno de un lote emitido de Q unidades del artículo j (ya sea un componente fabricado por la empresa o un producto final), en unidades reales ($\overline{TS_{Qj}}$), como⁴:

$$\begin{aligned} \overline{TS_{Qj}} = & \overline{Tconf_j} + \overline{Tdm_{Qj}} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Td_{Qijk}} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} + \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tc_{Qijk}} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tesp_{ijk}} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tinsp_{Qijk}} \end{aligned} \quad (3.1)$$

² Plossl (1988, p. 495), Narasimhan, Mcleavy y Billington (1996, p. 414) o Plenert (1999, pp. 95-96).

³ Véase, por ejemplo Hopp, Spearman y Woodruff (1990), Gibson, Greenhalgh y Kerr (1995, p. 126), Domínguez y otros (1995b, p. 20) o Haskose, Kingsman y Worthington (2002, p. 272).

⁴ Basándonos en Oden, Langenwalter y Lucier (1993, p. 192) y Domínguez y otros (1995b, p. 22).

Donde:

$\overline{Tconf_j}$ = tiempo medio de confección de un pedido de artículo j .

$\overline{Tdm_{Qj}}$ = tiempo medio de desplazamiento de los materiales necesarios para elaborar un lote de tamaño Q del artículo j , desde su zona de almacenamiento hasta el primer Centro de Trabajo de su ruta.

$\overline{Td_{Qijk}}$ = tiempo medio de desplazamiento, de un lote de Q_j unidades, desde el Centro de Trabajo k , donde se ejecuta la operación i , hasta el siguiente Centro de Trabajo o hasta la zona de almacenamiento, si la operación i es la última de su ruta.

$\overline{Tcola_{ijk}}$ = tiempo de espera medio en cola, en el Centro de Trabajo k , para que se le realice la operación i a un lote de artículo j .

$\overline{Tc_{Qijk}}$ = tiempo de carga de un lote emitido de tamaño Q del artículo j , para el procesamiento de la operación i en el Centro de Trabajo k a todas las unidades que lo componen⁵.

$\overline{Tesp_{ijk}}$ = tiempo medio de espera, a la salida del Centro de Trabajo k , una vez realizada la operación i al lote de artículo j , para su traslado al Centro de Trabajo donde se le realizará la operación siguiente, o al almacén si el lote está completado.

$\overline{Tinsp_{Qijk}}$ = tiempo medio dedicado a la inspección de un lote de Q_j unidades del artículo j , tras haber realizado la operación i .

Como se puede observar, en el cálculo del tiempo de suministro se ven involucradas distintas variables de tiempo que necesitan de una adecuada estimación, ya que utilizaremos sus valores medios. Así, para el cálculo del tiempo de confección, preparación, ejecución, desplazamiento e inspección, es necesario

⁵ Donde se refleja el efecto del tiempo de ejecución de la operación i (te_i), entendido éste como el tiempo necesario para desarrollar una vez dicha operación; y el tiempo de preparación del Centro de Trabajo k para realizar la operación i (tp_{ik}).

utilizar alguna de las técnicas de Medición del Trabajo⁶, ya que en todos ellos se realiza una tarea. De hecho, según el estudio realizado por Jonsson y Mattsson (2002, pp. 91-92) en empresas suecas, los datos de tiempos de ejecución y preparación utilizados en CRP son resultado, en un setenta y uno por ciento de los casos, de técnicas de Medición del Trabajo.

Otro tratamiento distinto recibiría el tiempo de espera, ya sea en cola a la entrada del Centro de Trabajo, o aguardando el momento del traslado al Centro de Trabajo siguiente en su ruta, o al almacén. Debido a las características intrínsecas de este tipo de tiempo, es más preciso utilizar la Teoría de Colas⁷ para su estimación. Sin embargo, en este caso no suele dar tan amplia utilización de las técnicas disponibles como en el de los tiempos de confección, preparación, ejecución, desplazamiento e inspección. El mismo estudio citado en el párrafo anterior de Jonsson y Mattsson (2002, pp. 91-92), pone de manifiesto que los datos de los tiempos de cola y desplazamientos precisos para la planificación CRP son obtenidos de manera intuitiva en un setenta y ocho por ciento de las compañías encuestadas.

La elección de la técnica de Medición del Trabajo puede incidir en la bondad de la estimación, por lo que creemos oportuno, para analizar la aleatoriedad del tiempo de suministro, estudiar inicialmente las fuentes de variación originadas por la estimación del tiempo para, posteriormente, desarrollar las características de los elementos que componen el tiempo de suministro, centrándonos en el origen de su variabilidad.

3.3. INCIDENCIA DE LAS TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL TRABAJO EN LA ALEATORIEDAD DEL TIEMPO

La aleatoriedad del tiempo de una tarea se aprecia claramente en el caso de operaciones manuales, puesto que la realización de la misma depende de la pericia, experiencia y habilidad del trabajador, además de la variabilidad de las condiciones en las que se desempeña el trabajo. La ejecución de operaciones mecanizadas tampoco escapa al efecto de la aleatoriedad, ya que se ven afectadas por la

⁶ “Aplicación de técnicas para determinar el tiempo que invierte un trabajador cualificado en llevar a cabo una tarea definida efectuándola según una norma de ejecución establecida” (British Estándar Glossary of Terms in Work Study, citada en Hill, 1991, p. 300).

⁷ “Conjunto de conocimientos sobre las colas de espera” (Heizer y Render, 2002, p. 386).

necesidad de mantenimiento y reparación de equipos, lo que le confiere variabilidad. Estos motivos obligan a calcular valores medios, que serán los que se incluyan en el tiempo de suministro.

El análisis del primero de los casos es más complejo ya que, a diferencia de las operaciones totalmente automatizadas, para poder averiguar el tiempo de una tarea en la que influya el trabajo humano, habrá que basarse en un valor medio que pueda ser alcanzado por un trabajador cualificado⁸; es decir, se debe establecer un estándar.

Un estándar de tiempo se puede definir como “*la cantidad de tiempo que requiere un trabajador capacitado⁹, trabajando a ritmo normal con un método establecido, para realizar una tarea*” (Fernández y Vázquez, 1994, p. 189). El tiempo elemental o tiempo tipo tiene en cuenta, además, los retrasos inevitables, pudiendo definirse como “*el tiempo normal más un margen para considerar los retrasos personales y retrasos inevitables y la fatiga*” (Niegel, 1996, p. 461).

Para la determinación de los valores medios originados en la realización de las distintas tareas que componen el proceso productivo, nos basaremos en las técnicas de Medición del Trabajo, siendo las de uso más común: la estimación, los estándares predeterminados de tiempos, los tiempos estándar o datos normalizados, el estudio de tiempos y el muestreo de trabajo. La elección de una técnica u otra afectará, no sólo a los costes en los que incurrirá la empresa, sino a la calidad de la estimación. Es éste el motivo por el que nos interesa realizar un somero estudio de cada una de ellas, centrándonos en la precisión que se puede conseguir con su aplicación, ya que incide directamente sobre la aleatoriedad de la estimación de los tiempos.

3.3.1. La estimación

El cálculo del tiempo dedicado a una tarea, mediante esta técnica, se cimienta en el conocimiento y experiencia del analista, basado éste, generalmente,

⁸ Hay otra línea de pensamiento que considera que el tiempo fijado por la empresa debe ser tal que pueda ser alcanzado por más del 90 % de los trabajadores. Véase, por ejemplo, Adam y Ebert (1991, p. 344), Domínguez y otros (1995a, p. 198).

⁹ Según la Organización Internacional del Trabajo, un trabajador capacitado o cualificado es “*aquel de quien se reconoce que tiene aptitudes físicas necesarias, que posee la requerida inteligencia e instrucción y que ha adquirido la destreza y conocimientos necesarios para efectuar el trabajo en curso según normas satisfactorias de seguridad, cantidad y calidad*” (OIT, 1977, p. 240).

en datos históricos. La precisión obtenida se puede mejorar si las tareas se dividen en elementos más pequeños y se calcula el tiempo de cada uno de ellos por separado, o si se compara con tareas similares. No obstante, el resultado es bastante subjetivo, puesto que se encuentra a merced de la pericia del analista.

El valor calculado a partir de la estimación, si bien es fácil y barato de obtener, puede tener un entre un diez y un veinte por ciento de errores¹⁰. Además, entre otros inconvenientes podemos citar que no considera las mejoras o cambios en el proceso y que no tiene en cuenta el ritmo o rapidez con la que un trabajador puede realizar la tarea.

3.3.2. Los estándares predeterminados de tiempos

Para el cálculo del tiempo de una tarea mediante tiempos predeterminados, se parte de la división de ésta en elementos muy pequeños, en particular, en movimientos básicos y grupos de movimientos llamados micromovimientos. Los sistemas de tiempos predeterminados están formados por un “*conjunto de tablas de movimientos y tiempos, con reglas e instrucciones explicativas acerca del uso de los valores de tiempo para los movimientos*” (Niebel, 1996, p. 509). El tiempo dedicado a una tarea se calcula como la suma de los tiempos de los elementos que la forman.

El desarrollo de estos sistemas es una tarea ardua y costosa para cualquier empresa, por lo que se suele recurrir a alguno de los muchos comercialmente disponibles¹¹. El tiempo calculado a partir de la aplicación de uno u otro de estos

¹⁰ Véase Fraxanet (1990, p. 71) y Domínguez y otros (1995a, p. 210).

¹¹ Según la clasificación de Sellie (citada en Niebel, 1996, p. 511), estos sistemas se pueden agrupar en tres bloques:

- Sistemas de aceleración y desaceleración: que consideran que durante la ejecución de un movimiento no se mantiene una velocidad constante. Este tipo de sistemas son los menos utilizados para el cálculo de estándares de tiempos, aunque están bien valorados en el análisis de métodos de trabajo. Un ejemplo de este sistema es el Análisis de Tiempos de Movimientos (MTA).
- Sistemas de movimientos promedio: donde se tiene en consideración las dificultades de los movimientos medios de las operaciones industriales. Dentro de este grupo, el más conocido es el conjunto de sistemas MTM (Methods Time Measurement, gestionado por el *Internacional MTM Directorate*).
- Sistemas aditivos: parten de valores de tiempo básicos a los que se les aplica suplementos por dificultades en el movimiento. Uno de los sistemas aditivos más importante es el Factor-Trabajo (Work-Factor, marca registrada comercialmente por la *Science Management Corporation*).

sistemas, por un analista especializado, puede dar un resultado distinto. Esto es debido a que el concepto de *actuación normal* que se utiliza para el desarrollo de los estándares puede haber sido diferente. Por otro lado el resultado obtenido por distintos analistas, aun utilizando una misma técnica puede variar, ya que deben estimar el grado de esfuerzo para aplicar las tolerancias y suplementos adecuados. Incluso podría ser conveniente el considerar un coeficiente de corrección aplicable a los tiempos calculados en las tablas, en función del país. No obstante, según Fraxanet, el resultado obtenido mediante alguno de los sistemas de tiempos predeterminados puede llegar a tener una precisión de ± 3 por 100¹².

3.3.3. Tiempos estándar o datos normalizados

Este método, como el analizado en el apartado anterior, también utiliza bancos de datos para calcular el tiempo estándar, pero no se refiere a elementos tan pequeños como en aquél.

Los datos estándares se toman de estudios de tiempos (técnica de Medición del Trabajo que se analizará en el apartado siguiente), realizadas con anterioridad y que han resultado satisfactorios o de datos de tiempos predeterminados. Esta información debidamente tratada se transforma en tablas, fórmulas y gráficos aplicables a distintas situaciones dentro de un mismo trabajo.

En el proceso de cálculo del tiempo de una tarea con esta técnica, se deben calcular por separado dos tipos de elementos: los constantes, independientes de las características del artículo que recibe la tarea, y los variables, directamente relacionado con él. Posteriormente el analista aplicará los suplementos que estime apropiados a las condiciones en las que se ejecutará la tarea.

Las variaciones de los tiempos estimados con respecto a los realmente originados pueden venir tanto del origen de los datos (obtenidos de estudios anteriores, con un determinado nivel de precisión), como de la subjetividad del analista al calcular los suplementos.

¹² Véase Fraxanet (1990, p. 49).

3.3.4. Estudio de tiempos

El estudio de tiempos utiliza un método directo para la estimación de tiempos. En concreto, se basa en el uso del cronómetro para la toma de los datos necesarios para los cálculos. Se puede definir como *“una técnica de medición para registrar el tiempo y el ritmo de trabajo correspondientes a los elementos de una tarea definida y realizada en condiciones determinadas, así como para analizar los datos con el fin de averiguar el tiempo requerido para efectuar la tarea en un nivel de ejecución preestablecido”* (Prokopenko, 1989, p. 140).

El cálculo del tiempo estándar se basa en una muestra, que debe ser representativa. Para ello se decidirá la precisión y nivel de confianza que se desee obtener en el estudio, lo cual ya nos refleja que existe un riesgo de error en la estimación.

Se parte del cronometraje de los tiempos de cada una de las operaciones elementales en que se divide la tarea objeto de estudio, estimando, para cada observación, el ritmo de trabajo que lleva el trabajador. En esta estimación tiene gran importancia la capacitación y experiencia del analista encargado del estudio, ya que determinar la velocidad o factor de actividad de un trabajador es muy subjetivo¹³. No obstante se considera que un analista debe tener la suficiente pericia como para estimar el nivel de actividad con un grado de error del 5 por 100¹⁴.

Otra posible fuente de error se puede generar en el momento de la observación del tiempo destinado a una tarea. En este sentido, el procedimiento de la toma de datos mediante el cronometraje puede originar desviaciones que varían en función de si el método utilizado ha sido la técnica de regreso a cero o la lectura continua. En el primer caso se lee el cronómetro una vez ejecutado un elemento de la tarea estudiada, colocando de nuevo la manecilla en cero para la lectura del siguiente elemento. Sin embargo en este proceso se originaría una pérdida de

¹³ No obstante, los valores del ritmo de trabajo no son totalmente subjetivos, estando especificadas sus cotas por la Sociedad para el Desarrollo de la Dirección (*Society for the Advancement of Management*). Así, por ejemplo, *“una actividad normal corresponde a un hombre de 1,68 m de estatura, que anda con pasos de 0,75 m, sin carga, por un suelo horizontal y sin obstáculos, en condiciones normales de ambiente, a una velocidad de 1,25 m/seg”* (Martínez, 1984, p. 18). Para más información véase, por ejemplo, también Ruíz (1991, pp. 36-38) o Niebel (1996, pp. 413-423).

¹⁴ *“En general se espera que el analista de tiempos sea capaz de establecer regularmente sus estándares dentro de más o menos el 5 por 100 de la calificación verdadera, cuando estudia operarios que actúan dentro de un intervalo de 0,70 a 1,30 de lo normal”*. Cuando la actuación está fuera de este intervalo *“se puede esperar del analista experimentado un error mucho mayor”*. Niebel (1996, p. 427). Véase también, por ejemplo, Fraxanet (1990, p. 50).

tiempo que, según Niebel¹⁵, podría provocar un error del 3,8 por 100 en un elemento que durase 0,10 min¹⁶. Sin embargo los nuevos cronómetros digitales reducen este error a niveles muy bajos. El otro método de cronometraje, con lectura continua, no incluye paradas del cronómetro; el proceso consiste en apuntar el momento de comienzo y final de cada elemento y calcular el tiempo de éste por diferencias. Por lo tanto el método de lectura continua, a diferencia de la técnica de regreso a cero, no provoca riesgo de aumentar la aleatoriedad de la estimación del tiempo.

Existe otra posible variación del valor del estándar establecido, que proviene de la aplicación de suplementos o márgenes de tolerancia al resultado de la estimación inicial, ya que es necesario reflejar el tiempo en el que realmente se está trabajando. Las tolerancias se aplican para tener en consideración tres tipos de demoras: las personales, originadas por causas fisiológicas¹⁷, la fatiga (dentro de la cual se considera la reducción de la productividad del trabajador a lo largo de la jornada y la provocada por las condiciones físicas y psíquicas del trabajo¹⁸) y las demoras inevitables, aglutinando en este último grupo las interrupciones para el mantenimiento y reparación de maquinaria, paradas por falta de materiales y otros retrasos ineludibles que pudieran originarse¹⁹.

El suplemento a aplicar puede estimarse mediante varios métodos, siendo los de uso más frecuente: la utilización de tablas de tolerancias²⁰, los estudios del proceso de producción (donde el analista registra la duración y motivo de las demoras), y la aplicación de un muestreo de trabajo (que será analizado en el epígrafe siguiente).

Tomando en consideración todas las fuentes de variabilidad originadas en el proceso de estimación de los tiempos (ritmo, cronómetro y tolerancias), se puede concluir que el resultado del estudio es una variable aleatoria cuya representatividad dependerá, en gran medida, de los valores de precisión y nivel de confianza utilizados para el muestreo, así como de la pericia del analista en la

¹⁵ Niebel (1996, p. 375).

¹⁶ Los errores de lectura de cronómetro también pueden verse en Ruiz (1991, p. 22).

¹⁷ Véase, por ejemplo, Ruíz (1991, p. 68) o Domínguez y otros (1995a, p. 204).

¹⁸ Véase, por ejemplo, Alford, Bangs y Hagemann (1964, pp. 550-565) o Ruíz (1991, pp. 62-65).

¹⁹ Véase, por ejemplo, Ruíz (1991, pp. 70-71) o Domínguez y otros (1995a, p. 204).

²⁰ Como la que edita la Oficina Internacional del Trabajo, véase, por ejemplo en Niebel (1996, p. 443).

aplicación de los suplementos. No obstante, según Fraxanet²¹ con este método se puede alcanzar una exactitud de ± 5 por 100.

3.3.5. Muestreo de trabajo

Esta técnica estima el tiempo de una tarea a través del número de veces que se realiza durante un lapso de tiempo. Para que el resultado del estudio sea representativo es muy importante que el periodo sobre el que se realice refleje las típicas condiciones de trabajo.

El muestreo de trabajo tiene en común con el estudio de tiempos que ambas son técnicas directas y que toman en consideración el ritmo de trabajo o actividad del trabajador, en el momento de realizar la observación. Será necesario, por tanto, mantener las mismas precauciones a las que nos referimos anteriormente con respecto a la exactitud de esta estimación.

El tamaño de la muestra que se tome, es decir el número de observaciones que se realicen, indicará la exactitud, siendo necesario establecer el nivel de confianza y el error máximo absoluto permitido. Si a lo anterior le unimos el margen de error de la estimación del ritmo de trabajo realizada por el analista, nos encontramos que, citando a Fraxanet²², el nivel de incumplimiento obtenido con la aplicación de esta técnica suele ser aproximadamente del 10 por 100.

3.3.6. Vigencia y uso de los tiempos tipo

Consideradas todas las fuentes de error que afectan a la precisión de la técnica elegida para la estimación del tiempo de una tarea, aún queda por incluir otra posible variación originada por el transcurso del tiempo y los cambios que puedan ir sucediendo a lo largo de la vida de una planta productiva.

Una vez que la empresa haya establecido un tiempo tipo para cada operación, a través de algún método de Medición del Trabajo, deberá comprobar su vigencia a lo largo del tiempo. El motivo de esta preocupación se debe a que las

²¹ Fraxanet (1990, p. 50).

²² Ídem.

condiciones para las que se realizó el estudio pueden variar, entre otras causas, debido al efecto aprendizaje, cambios en los métodos, máquinas o herramientas, variación de la calidad de las materias primas, etc.

Por otro lado, no se debe perder de vista que el nivel de exactitud de las técnicas directas (estudio de tiempos y muestreo de trabajo), depende en gran medida de la elección de los trabajadores apropiados para realizar el estudio y de la pericia y experiencia del analista, ya que éste debe estimar el ritmo de actividad y los suplementos a considerar en función de las condiciones de trabajo.

La elección de la técnica de Medición del Trabajo depende directamente de los costes en los que desee incurrir la empresa y de la exactitud que pretenda alcanzar. No obstante, hay técnicas que pueden ser más adecuadas en determinados tipos de trabajos²³. En la práctica, para la elaboración de un estándar de tiempo se suelen emplear varias técnicas, de forma que se verifique el resultado de unas con otras, aumentando así la precisión del estudio. Así, por ejemplo, en un estudio realizado por Burcher²⁴ se pone de manifiesto que una misma empresa suele utilizar varias técnicas de Medición del Trabajo para la determinación de los tiempos destinados a las distintas tareas que componen el proceso productivo. Los porcentajes de aplicación de dichas técnicas, resultado del estudio de Burcher, son los siguientes:

- Tiempos estándar (53,9 %).
- Estudio de tiempo con cronómetro (50,6 %).
- Estimación (36,5 %).
- Muestreo del trabajo (26,1 %).
- Estándares predeterminados de tiempos (20,3 %).
- Otros (19,8 %).

²³ Véase, por ejemplo, Barnes (1980), Hill (1991), Markland, Vickery y Davis (1995) y Niebel (1996).

²⁴ Burcher (1992, pp. 22-25).

3.4. ESTIMACIÓN DE LOS TIEMPOS DE ESPERA A TRAVÉS DE LA TEORÍA DE COLAS

Las técnicas de Medición del Trabajo son adecuadas para el análisis de los tiempos dedicados a las distintas tareas que componen el tiempo de suministro. Sin embargo, dentro de éste hay que incluir también los tiempos de espera originados durante el proceso productivo y que, para su estimación, resulta más adecuado el uso de la Teoría de Colas.

En el tiempo de suministro están incluidos dos tipos de tiempos de espera: el tiempo de cola y el tiempo de espera a la salida de un Centro de Trabajo (en adelante nos referiremos a él simplemente como tiempo de espera). En este epígrafe intentaremos reflejar cómo estimar sus valores medios, incidiendo en todas las variables que influyen en el cálculo, para intentar reflejar la aleatoriedad del resultado.

La Teoría de Colas estudia el sistema generado por la espera, entendido éste como el conjunto formado por la cola de espera y el total de Centros o máquinas donde se puede realizar una operación. Si se desea estudiar el tiempo de cola a la entrada del Centro de Trabajo, se considerará que los lotes que van llegando para que se les realice una operación son las entradas al sistema; las salidas son representadas por los lotes que ya han sido procesados. Estos últimos serán considerados como entradas a efecto del estudio del tiempo de espera, mientras que las salidas las conforman los lotes que son desplazados a su siguiente destino.

Debido a la similitud en el comportamiento de los tiempos de cola y espera, centraremos nuestro análisis en el primero de ellos, ya que, para el segundo caso, no habrá más que cambiar de enfoque y considerar que, por un lado, la llegada a un Centro de Trabajo para el tiempo de cola, se corresponde con la salida del Centro de Trabajo en el tiempo de espera y, por otro lado, las salidas del Centro de Trabajo en el estudio del tiempo de cola se equiparan con los desplazamientos que se consideran para el cálculo del tiempo de espera.

El tiempo de cola, o tiempo que deberá esperar un lote de artículo j , que llegue al Centro de Trabajo k , para que se le realice la operación i , dependerá de:

- El número de Centros de Trabajo y máquinas en los cuales se le pueda realizar la operación.
- El total de unidades que se encuentren en espera a la llegada del lote.

- El orden de entrada en el Centro de Trabajo de los lotes situados en la línea de espera.
- El tiempo de procesamiento o de carga de los lotes que se estén procesando en el momento de llegada y de los que vayan a entrar en el Centro de Trabajo con anterioridad al lote recién llegado.

En consecuencia, se podría decir que el tiempo de espera para un lote determinado, a la entrada de un Centro de Trabajo, sería el resultado de la suma de:

- Los tiempos de procesamiento de las unidades a las que, encontrándose en cola a la llegada del lote, se les realizará la operación para la que esperan con anterioridad a éste (depende de la prioridad).
- El tiempo que le resta al Centro de Trabajo para terminar de realizar la operación al lote que esté procesando en el momento de llegada del nuevo.

Para poder calcular el tiempo medio de cola o el tiempo medio de espera, es necesario conocer las características del sistema originado por la cola de espera. Este motivo es el que nos lleva a estudiar, a continuación, los parámetros fundamentales de una cola.

3.4.1. Parámetros fundamentales de una cola de espera

En el estudio de las colas de espera es necesario disponer de “*una descripción del sistema que proporciona una base suficiente para predecir probabilísticamente su comportamiento futuro*” (Ackoff y Sasieni, 1971, p. 282), lo cual se puede conseguir a partir del conocimiento de las siguientes características:

- Tamaño de la población.
- Pauta de llegada de las unidades.
- Conducta de la población o actitud ante el tamaño de la cola de espera.
- Longitud máxima que puede alcanzar la línea de espera.
- Número de máquinas en las cuales se le pueda realizar una misma operación (llamadas canales o servidores).

- Número de fases o etapas necesarias para acabar el producto.
- Criterio de entrada en el canal.
- Pauta de salida o de servicio de los productos.

A continuación analizaremos someramente, cada uno de los parámetros que caracterizan la estructura de un sistema de colas, centrándonos en el caso de configuraciones productivas por lotes.

3.4.1.1. Tamaño de la población

Con respecto al tamaño de la población que puede formar parte de un sistema de cola, es preciso determinar, en primer lugar, si ésta es finita o infinita, es decir, definir si el número de posibles elementos que pueden llegar al sistema es limitado o ilimitado. En el primero de los casos será necesario además, precisar el número de elementos que componen la población.

En una empresa con una configuración productiva por lotes, la población potencial estará compuesta por el total de lotes de artículos (productos o componentes), que pueden llegar al Centro de Trabajo donde se produce la cola de espera, el cual, a lo largo del tiempo de funcionamiento de la empresa, es ilimitado, por lo que se asumirá que la población es infinita.

3.4.1.2. Pauta de llegada de las unidades

Para estudiar la cola de espera es necesario conocer el intervalo de tiempo que transcurre entre la llegada de dos unidades consecutivas. Este dato puede ser conocido con certeza o en términos aleatorios y, en este último caso, es preciso, además, averiguar su distribución de probabilidad. Para el estudio analítico se utiliza como indicador del ritmo o tasa de llegada, el número de unidades que llegan al Centro de Trabajo por unidad de tiempo. Llamaremos λ_{ik} a la tasa de llegada de un lote al Centro de Trabajo k para que se le realice la operación i , calculándose como:

$$\lambda_{ik} = \frac{1}{\text{tiempo medio entre llegadas}}$$

Dado que un Centro de Trabajo, en configuraciones por lotes, suele ser utilizado para la ejecución de distintas operaciones, interesa conocer el valor de la tasa media de llegada en el Centro de Trabajo k , que se calcularía como:

$$\lambda_k = \sum_{i=1}^I \lambda_{ik} \quad (3.2)$$

Así, por ejemplo, si en un Centro sólo se realizan dos operaciones, con tasas de llegada 10 lotes/hora y 20 lotes/hora, respectivamente, ello implica que llegarán, cada hora, 30 lotes.

En las empresas que trabajan en entornos MRP, no es común que el ritmo de llegada sea constante (lo cual es habitual en configuraciones continuas), ya que la demanda y la producción suelen tener un comportamiento discreto, por lo que, para calcular los tiempos de cola habrá que utilizar valores medios ($\overline{\lambda_{ik}}$).

Basándonos en que para la determinación del Programa Maestro de Producción y del Plan de Materiales, no se toma en consideración la longitud de las colas de espera, tomaremos la tasa media de llegadas como independiente del estado del sistema; es decir, no influenciada por la longitud de la cola (podría ser inversamente proporcional al tamaño de la línea de espera, lo cual es común en el caso de poblaciones finitas).

En la Teoría de Colas es frecuente considerar que el tiempo entre llegadas se distribuye según una función exponencial²⁵ y, por tanto, que su probabilidad es independiente del tiempo, lo cual simplifica mucho los cálculos. En este caso, podemos decir que el número de llegadas para un periodo específico, se distribuye siguiendo una función de Poisson²⁶. Otras distribuciones a las que se suele ajustar

²⁵ Las características de las llegadas aleatorias en este caso son:

- La probabilidad de que se sitúen n elementos en cola (P_n) en el momento t , no depende del instante inicial, es decir, el fenómeno es estacionario.
- La probabilidad de dos llegadas en el mismo tiempo es cercana a cero.
- La probabilidad de que llegue una unidad en un intervalo de tiempo Δt , muy pequeño, es igual a la tasa media de llegadas por el intervalo.

²⁶ Ver, por ejemplo Domínguez y otros (1995a, p. 388), Heizer y Render (2002, p. 391) y Fernández y Vázquez (1994, p. 472). Según el estudio de Ackoff y Sasieni (1964, p. 285) la adecuación del patrón de las llegadas a una distribución de Poisson es muy común en la mayoría de los procesos, existiendo dos casos donde su suposición puede que no dé buenos resultados:

- Cuando la llegada de los clientes ha sido programada y existen niveles bajos de error en comparación con el intervalo de planificación.
- Cuando no se justifique la suposición de que las llegadas son equiprobables, porque dependan del tiempo.

este tiempo son la distribución constante y la de k-Erlang²⁷. No obstante, para comprobar si la tasa de llegada sigue una distribución determinada, es necesario realizar un contraste de hipótesis.

3.4.1.3. Conducta de la población

La actitud o conducta ante la longitud de la cola de espera depende de las características de la población objetivo. Así, si se estudian las llegadas de un producto a un Centro de Trabajo, lo lógico es que se considere que, una vez situado en la cola, no va a variar su posición voluntariamente (a no ser que intervenga la decisión humana²⁸).

3.4.1.4. Longitud máxima que puede alcanzar la línea de espera

La longitud de la línea de espera, o número de unidades que se encuentran en espera en el Centro de Trabajo, está directamente relacionada con el valor y distribución de las tasas de llegada y salida de las operaciones²⁹ que se realicen en el Centro de Trabajo; en definitiva, con la capacidad de éste.

La cola de espera puede tener un tamaño limitado o ilimitado. Una cola se considerará limitada cuando su longitud se vea restringida por las condiciones físicas (espacio disponible para la localización de los elementos en espera), por ley o por la actitud de la población objetivo (un límite máximo a partir del cual no se colocan en cola). Se suele considerar infinita o ilimitada una cola de espera, cuando llegada una unidad al sistema, puede esperar en él hasta que haya recibido el servicio y nunca va a ser rechazada. Dado que en la mayoría de los procesos

²⁷ Véase Aguaron y otros (1993, p. 145) y Rodríguez y otros (2002, p. 208).

²⁸ Pudiendo darse el caso de que, tras una amplia espera y, viendo aún lejano el momento de procesamiento, se decida abandonar la cola o cambiar a otra donde se estime un tiempo de espera inferior.

²⁹ La tasa de salida, que mide el número de lotes procesados en un Centro de Trabajo por unidad de tiempo, se estudiará en el Apartado 3.4.1.8.

productivos a las unidades que llegan a un Centro de Trabajo no se les niega el servicio, ni rehúsan tras observar la longitud de la cola, para nuestro estudio habremos de considerar que la línea de espera es infinita.

3.4.1.5. Número de canales o servidores

En la Teoría de Colas se denomina canal o servidor al “*elemento que produce el bien o servicio*” (Fernández y Vázquez, 1994, p. 470). Este elemento puede ser una o varias máquinas, una o más personas o una combinación de ambas. El número de canales de un Centro de Trabajo (c) queda determinado por el total de lotes que pueden ser atendidos simultáneamente. Así, si sólo existe un elemento destinado a realizar la operación que desea el cliente, estaremos refiriéndonos a un sistema con un solo servidor. Por el contrario, si la operación se puede realizar en varios elementos (por ejemplo varias máquinas de un mismo Centro de Trabajo), nos encontramos con un sistema multicanal o con múltiples servidores, el cual implica cálculos más complejos para la estimación del tiempo de cola.

3.4.1.6. Número de fases necesarias para acabar el producto

Las fases son las distintas etapas por las que tiene que pasar un producto para que se le realicen las operaciones que componen su proceso productivo. En este sentido, la Teoría de Colas, divide los sistemas en función de que sean de fase única o multifase.

El número de canales y fases determinará el diseño de la cola de espera. Todas las rutas de fabricación compuestas por más de una operación, originan una red de colas³⁰ y, por lo tanto, se definen como sistema multifase, ya que están compuestas por varias operaciones que se realizan en diferentes Centros o servidores. El proceso productivo, en este caso, implica que un ítem se traslada de un Centro de Trabajo a otro para ir sometándose a las distintas operaciones

³⁰ Véase Sarabia (1996, pp. 388-390), De la Fuente y Pino (2001, pp. 89-97), Cao (2002, pp. 179-202) o Pazos, Suárez y Díaz (2003, pp. 137-160).

necesarias hasta su completa fabricación, momento en que abandona el sistema. En una red de colas el ritmo de llegada a un Centro de Trabajo dependerá de la tasa de servicio de los Centros desde los que pueden proceder las unidades.

3.4.1.7. Disciplina de cola o criterio de entrada en el canal

El orden o secuencia de entrada de las unidades que se encuentran en cola afecta al momento en que cada una de ellas pasará por el Centro de Trabajo y, por tanto, al tiempo de espera. La disciplina de cola puede ser:

- Entrada por orden de llegada o FCFS (*First Come First Served*)³¹.
- Elección aleatoria entre las unidades que se encuentren en espera.
- Separación de los lotes en categorías con distinta prioridad (en función del cliente o mercado al que va dirigido, el tipo de producto, si es un componente o un producto final, etc.).
- Orden de entrada basado en alguna Técnica de Secuenciación.

La secuencia de entrada más utilizada en los estudios de la Teoría de Colas es la fabricación por orden de llegada (FCFS – *First Come First Served*-), si bien la empresa puede tener en funcionamiento otras disciplinas, no siendo necesario mantener el mismo criterio para toda la ruta de fabricación.

Por otro lado, para el desarrollo de la Secuenciación existen múltiples técnicas, siendo de las más utilizadas en las configuraciones por lotes las Reglas de Prioridad (*Priority Rules*). Se trata de una metodología ampliamente conocida, a la cual se han dedicado muchas investigaciones a partir de los años 50, desde su aparición (Inves y Lambrecht, 1996, p. 252). La realidad es que han sido muchas las propuestas realizadas por diferentes autores de empleo de nuevas reglas basadas en muy diversos criterios y técnicas, tales como modelos borrosos³², de simulación

³¹ Conocida también como método FIFO (*First In First Out*).

³² Véase Petroni y Rizzi (2002).

informatizados³³, basados en teoría de Cadenas de Markov³⁴, en Multiplicadores de Lagrange³⁵, heurísticos³⁶, matemáticos no-lineales³⁷, de programación orientada a objetos³⁸, etc. Pero la verdad es que, como hemos comentado, en la literatura sobre la materia (y pensamos que en la práctica, aunque no podemos constatarlo), no han tenido especial repercusión, manteniéndose escasas variaciones en las Reglas de Prioridad descritas desde los años 80 hasta la actualidad; y es que, como ya afirmaban Melnyk, Shawnee y Carter³⁹, para que haya una respuesta operativa a la utilización de una Regla de Prioridad, es necesario, entre otras cosas, que sea simple de utilizar, transparente y válida.

Existen multitud de Reglas de Prioridad, en función del objetivo prioritario para la empresa (cumplir fechas de entrega, aprovechar mejor la capacidad, etc.)⁴⁰. Sobre la bondad, ventajas e inconvenientes de las Reglas de Prioridad más comunes, se han realizado múltiples estudios comparativos, pero los resultados no son coincidentes en cuanto al mejor comportamiento de unas que de otras, lo cual dependerá de las circunstancias concretas de cada caso⁴¹. Sin querer ser exhaustivos, hemos recogido en la Tabla 3.1, las Reglas de Prioridad más utilizadas en la fabricación por lotes.

Nos parece adecuado hacer una mención especial a otra Regla de Prioridad que, si bien, no es ampliamente utilizada, nos resulta interesante para nuestro estudio (ya que su uso origina variación en el valor del tiempo de carga unitario); nos referimos a la Regla de minimización del tiempo de preparación. Esta disciplina de cola se basa en la colocación de los lotes que van llegando a un Centro de Trabajo en el lugar inmediatamente posterior al último de los lotes a los

³³ Lee y Pinedo (1997).

³⁴ Agliari, Diligente y Zavanella (1995).

³⁵ Khosla (1995).

³⁶ Volgenant y Teerhuis (1999).

³⁷ Park y Kim (1999).

³⁸ Dessouky y otros (1993).

³⁹ Melnyk, Shawnee y Carter (1986).

⁴⁰ Ver, por ejemplo, Ploosl (1983), Domínguez y otros (1995a), Schroeder (2000), Chase, Aquilano y Jacobs (2001) o Stevenson (2002).

⁴¹ Véase, por ejemplo, Bock y Patterson (1990), Webster (1993), Hunsucker y Shah (1994), Caffrey y Hitchings (1995), Selladurai y otros (1995), Jensen y otros (1995), Alidaee y Ramakrishnan (1996) o Veral y Mohan (1999).

que se vaya a realizar la misma operación, en cuyo caso no necesitaría tiempo de preparación. En caso contrario, se situará en la última posición de la cola de espera⁴².

Operación más corta (OMC): conocida también como SOT (Shortest Operation Time) o SIO (Shortest Inminent Operation). El lote que entra en el Centro de Trabajo es aquél que necesite menor tiempo de procesamiento o tiempo de servicio.	Menor tiempo restante (MRT): o SRT (Shortest Remaining Time). El lote que entra primero en el Centro de Trabajo es el que disponga de menos tiempo hasta la fecha de entrega planificada.
Operación más larga (OML): sus siglas en inglés son LOT (Longest Operation Time) o LIO (Longest Inminent Operation). El próximo lote es el que necesite mayor tiempo de servicio de entre los que se encuentren en cola.	Menor tiempo de holgura (MTH): en inglés conocido como DS (Dinamic Slack) o simplemente SLACK. El orden de entrada de los lotes depende de la holgura dinámica de que disponga cada uno. Esta holgura es la diferencia entre el tiempo que le resta para la fecha de entrega menos el tiempo necesario para acabar de procesar completamente el lote.
Lote más corto (TMC): también conocido como SRPT (Shortest Remaining Procesing Time). Se elegirá el lote, de los que están en cola, al que le falte menor tiempo de servicio sobre el total de operaciones necesarias.	Menor tiempo de holgura por operación restante (MTHOR): DS/RO (Dinamick Slack per Remaining Operation) o SLACK/RO. Se considera a la hora de entrar en el Centro de Trabajo, la holgura por operaciones restante. Es decir, se calcula el cociente entre la holgura dinámica y el número de operaciones que le resten para terminar los productos que componen el lote.
Lote más largo (TML): denominado también LRPT (Longest Remaining Procesing Time). El lote siguiente será aquél que necesite mayor tiempo de servicio restante.	

Tabla 3.1. Principales Reglas de Prioridad.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.8. Pauta de salida o de servicio de los productos

Para determinar el tiempo de cola medio es necesario conocer la tasa de servicio, que indica el número de lotes servidos o procesados por unidad de tiempo. Los valores de esta tasa pueden ser conocidos con certeza o con aleatoriedad, siendo conveniente, en este último caso, identificar la función de distribución a la

⁴² Véase Benjaafar y Sheikhzadeh (1996, p. 2787), Missbauer (1997, p. 136) y García, Rabadán y Gessa (2003, pp. 85-95).

que se ajusta mejor. El valor de esta tasa puede ser distinto en función de cada uno de los servidores de los que consta un Centro, es decir, puede ocurrir que, cuando existan varias máquinas que realicen una operación, alguna sea más eficaz que otra. Para el cálculo del tiempo de cola medio, consideramos que cada uno de los canales o máquinas del Centro de Trabajo tienen la misma tasa de servicio, si el tiempo de carga para una operación es idéntico e independiente de la máquina elegida.

La tasa de servicio de la operación i en el Centro de Trabajo k , μ_{ik} , indica cuántos lotes a los que se les ha ejecutado la operación i , saldrían por unidad de tiempo, en el caso de que el Centro de Trabajo se dedicara a realizar únicamente esta operación. Este valor dependerá del tiempo que necesite un lote para que se le realice la operación, por la que espera en el Centro de Trabajo k , a todas las unidades que lo componen. Es decir, vendrá determinado por el tiempo de carga unitario y por el tamaño de lote, que es variable. Así, si llamamos tiempo de carga de un lote, para realizarle la operación i en el Centro de Trabajo k (Tc_{Qijk}), al tiempo de procesamiento de todas las unidades que lo componen, se estaría incluyendo el tiempo de preparar el Centro de Trabajo para realizar la operación i y el tiempo dedicado a llevar a cabo la operación a cada una de las unidades del lote. La idiosincrasia del tiempo de carga se verá más ampliamente en el Apartado 3.5.4.

Cuando no se dispongan de series históricas con datos relativos a las tasas de salida, o si éstas han quedado anticuadas, la empresa podría estimar la tasa media de servicio en función del tiempo de carga preciso para los distintos lotes y la proporción de cada tipo de operación, sobre el total. En el caso de que un Centro se dedique a la ejecución de más de una operación, será preciso calcular el tiempo medio de carga de los distintos lotes ($\overline{Tc_k}$), para lo cual sería conveniente hacer una media ponderada, de acuerdo al número de veces que se repite cada operación, relacionado con las tasas de llegada de éstas (las cuales dependen del mix de productos):

$$\overline{Tc_k} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{\lambda_{ik}})}{\sum_{i=1}^I \overline{\lambda_{ik}}} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{\lambda_{ik}})}{\overline{\lambda_k}} \quad (3.3)$$

Donde $\overline{Tc_{Qijk}}$ refleja el tiempo medio necesario para el procesamiento de la operación i , en el Centro de Trabajo k , para un lote de tamaño medio del ítem j . Lógicamente, si una operación no se ejecuta en dicho Centro, su tiempo de carga será cero.

Análogamente a lo referido en el Apartado 3.4.1.2, si conociéramos con certeza la tasa de salida de cada operación, la tasa media la denotaríamos como μ_k . Sin embargo, en el caso de que sea preciso partir de las tasas medias de salida para cada operación, el valor de ésta para el Centro de Trabajo k es el promedio de los valores medios; nos referiremos a ella como $\overline{\mu_k}$ y la consideraremos independiente de la longitud de la cola.

La tasa de servicio deberá indicar el número de lotes que salen del Centro de Trabajo por periodos medidos en tiempo real⁴³ (a diferencia del tiempo productivo y el estándar), dado que el tiempo de suministro, y con él el tiempo de cola, utilizarán esta unidad de medida. Bajo esta consideración, para calcular la tasa de servicio media de un ítem en un Centro de Trabajo k para una operación i , tomaremos el tiempo de carga para un lote de tamaño medio, en unidades reales ($\overline{Tc_{Qijk}}$), por lo que, de acuerdo a la expresión (3.3), resultará:

$$\overline{\mu_k} = \frac{1}{\overline{Tc_k}} = \frac{\sum_{i=1}^I \overline{\lambda_{ik}}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{\lambda_{ik}})} = \frac{\overline{\lambda_k}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (\overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{\lambda_{ik}})} \quad (3.4)$$

La salida de lotes del Centro de Trabajo, una vez que se le ha realizado la operación correspondiente, es indicadora de la tasa de servicio y nos pondrá de manifiesto la capacidad del Centro.

Partimos de la hipótesis de que el Centro de Trabajo tiene capacidad suficiente para cubrir la llegada de los lotes para valores medios. En el caso de un único canal, esto supone que la tasa de llegada de los ítems tiene un valor inferior a la tasa de servicio, ya que en caso contrario la cola de espera se alargaría indefinidamente y el sistema estaría en situación de inestabilidad. Por ello consideramos que la tasa media de servicio del Centro de Trabajo k (μ_k) es superior a la tasa media de llegada al Centro de Trabajo k (λ_k), por lo que la utilización del sistema ($\rho = \lambda_k / \mu_k$) tomará valores menores que uno⁴⁴.

⁴³ Igualmente la tasa de llegada vendrá dada en tiempo real.

⁴⁴ En términos generales, para el caso de que se disponga de c canales o servidores, independientemente de la forma de distribución de las tasas de llegada y salida, podemos decir que un sistema es estable cuando se cumple simultáneamente que:

- La tasa media de llegadas por canal (λ_k/c) es menor a la tasa media de servicio por canal (μ_k).
- Las probabilidades de observar una situación determinada no dependen del tiempo.

Los principales modelos analíticos de sistemas de colas suponen que el tiempo de servicio sigue una distribución exponencial⁴⁵, aunque, tal y como comentamos en el estudio del patrón de llegada (Apartado 3.4.1.2.), para mantener esta premisa sería necesario realizar un contraste de hipótesis. Otras distribuciones a las que se suele ajustar la distribución del tiempo entre llegadas son la función de k-Erlang⁴⁶ y la distribución constante.

3.4.2. El tiempo de cola medio

Una vez analizados los parámetros o características fundamentales de la línea de espera generada, ya sea a la entrada o salida de un Centro de Trabajo, estaremos en disposición de determinar el tiempo de espera originado en el sistema.

Ciñendo el estudio al caso que nos concierne, de una configuración productiva por lotes, consideraremos que, tanto la población como la longitud máxima de la cola, son ilimitadas y que, una vez situado un lote en una línea de espera, no va a dejar el sistema hasta que se le hayan ejecutado todas las operaciones que componen su ruta. El resto de determinantes del sistema (tasas de llegada y salida, criterio de entrada y número de canales), podrán variar según los Centros de Trabajo que lo componen.

Es preciso diferenciar, en este nivel de análisis, entre el tiempo de espera en la línea de cola y el tiempo de espera en el sistema, ya que debemos decantarnos por aquél que represente el nivel de detalle indicado en la expresión (3.1), que refleja los componentes del tiempo de suministro. El primero de los conceptos, espera en la cola (W), muestra el tiempo transcurrido desde su llegada al Centro de Trabajo hasta el momento de procesarlo, mientras que el segundo representa el lapso entre la entrada y la salida del sistema, es decir, incluye el tiempo necesario para el procesamiento. Dado que, para nuestro estudio, se ha considerado

⁴⁵ Según Eppen y otros (2000, p. 596) resulta adecuada la consideración de esta distribución para el tiempo de servicio cuando:

- Hay muchos individuos potenciales (tamaño de población considerada infinita).
- Cada unidad llega por decisión independiente del resto.
- Cada unidad selecciona su tiempo de llegada al azar.
- Los tiempos de servicio son pequeños y una gran proporción de lotes (aproximadamente 2/3 del total) necesitan un tiempo de servicio corto.

⁴⁶ Véase Aguaron y otros (1993, p. 145) y Rodríguez y Gámez (2002, p. 208).

conveniente la diferenciación entre los tiempos de cola y carga, a la entrada del Centro de Trabajo, y los tiempos de espera y desplazamiento a la salida de aquél, este apartado se centrará en el análisis del tiempo de espera medio en línea por Centro de Trabajo (W_k), obteniendo así un mayor nivel de detalle.

Bajo el contexto de configuraciones por lotes, la forma de cálculo de W_k está influenciada por el número de canales y la disciplina de cola. Así, con respecto a este último caso, podemos decir que, en aquellos Centros de Trabajo donde existan prioridades de entrada (distinta de la fabricación por orden de llegada o First Come First Served –FCFS–), el tiempo W_k será distinto para cada categoría o nivel de prioridad. Esto es debido a que los lotes que pertenezcan a una clase preferente se procesarán antes que otros que, aún estando en cola con anterioridad, tengan asignada una prioridad inferior, y con ello un mayor tiempo de espera. Esto conlleva que, para averiguar los tiempos de espera de un lote, sea necesario estimar el número medio de unidades en cola que pertenecen a cada categoría y la tasa de llegada para cada clase de prioridad⁴⁷.

A partir del Teorema de Little⁴⁸ y la aplicación de la fórmula de Pollaczek-Khintchine⁴⁹, se puede deducir que, para el caso de un solo canal con criterio FCFS, tasa media de llegada al Centro de Trabajo k distribuida según una función de Poisson de parámetro $\bar{\lambda}_k$ (calculado como la suma del valor medio de las tasas de llegada de las operaciones⁵⁰) y cualquier tasa de servicio aleatoria⁵¹ con valor medio $\bar{\mu}_k$ (promedio de las tasas medias de salida de las operaciones que se realizan en el Centro de Trabajo k) y varianza σ_s^2 , el tiempo medio de espera en cola en un Centro de Trabajo k , se calcula de la siguiente manera⁵²:

⁴⁷ Para un análisis más profundo del procedimiento de cálculo del tiempo de cola con prioridades según categorías, véase Escudero (1972, pp. 157-177), De la Fuente y Pino (2001, pp. 98-103) o Pazos, Suárez y Díaz (2003, pp. 201-224).

⁴⁸ Little (1961).

⁴⁹ Véase, por ejemplo, Hillier y Lieberman (1989, p. 571), Cao (2002, pp. 205-207) o Pazos, Suárez y Díaz (2003, pp. 165-166).

⁵⁰ Si llegan lotes para que se realicen distintas operaciones, cada uno con una tasa de llegada distinta, la tasa de llegada al Centro es la suma de aquéllas. Por ejemplo, si sólo se realizan dos operaciones en un Centro, una de ellas con tasa media de llegada de dos lotes cada hora y la otra operación con una tasa media de llegada de cuatro lotes a la hora, el número medio de lotes que llegan por hora al Centro de Trabajo serán seis (suma de las tasas), y no tres (media de las tasas).

⁵¹ Estas características indican que el sistema de cola se corresponde con una cola M/G/1.

⁵² Véase, por ejemplo, Eppen y otros (2000, p. 582) o De la Fuente y Pino (2001, p. 21).

$$W_k = \frac{\overline{\lambda_k} \times \sigma_s^2 + \frac{\overline{\lambda_k}}{2}}{\frac{\mu_k}{2 \times (1 - \frac{\overline{\lambda_k}}{\mu_k})}} \quad (3.5)$$

Para el caso de colas con tasa de servicio ajustada a una distribución exponencial (sistema M/M/1) con media $\overline{\mu_k}$, se puede demostrar que el valor de su varianza es $\sigma_s^2 = 1/\overline{\mu_k}^2$. En este caso la ecuación (3.5) se reduce a⁵³:

$$W_k = \frac{\overline{\lambda_k}}{\overline{\mu_k}(\overline{\mu_k} - \overline{\lambda_k})} \quad (3.6)$$

Los sistemas compuestos por varios canales con la misma tasa de servicios, en los que la operación correspondiente puede ser realizada indistintamente en cada uno de ellos, precisan cálculos más complejos. Partiendo de la premisa de que la tasa de llegada sigue una distribución de Poisson y la tasa de servicios una exponencial (M/M/c), se puede establecer el tiempo medio de espera en cola en el Centro de Trabajo k a partir de la siguiente expresión⁵⁴:

$$W_k = \frac{P_0}{\overline{\mu_k} \times c_k \times (c_k!) \times \left[1 - \frac{\overline{\lambda_k}}{\overline{\mu_k} \times c_k} \right]^2} \times \left(\frac{\overline{\lambda_k}}{\overline{\mu_k}} \right)^{c_k} \quad (3.7)$$

Donde c_k es el número de canales de que dispone el Centro de Trabajo k , para el que se estudia el tamaño de cola, $\overline{\mu_k}$ es la tasa media de servicio por canal y P_0 es el valor de la probabilidad de que no haya ningún elemento en la cola de espera, calculándose esta última como⁵⁵:

⁵³ Véase, por ejemplo, Eppen y otros (2000, p. 582) o Cao (2002, p. 143).

⁵⁴ Para más información sobre el proceso de obtención de esta expresión véase Eppen y otros (2000, p. 584) o Cao (2002, pp. 147-150).

⁵⁵ Ídem.

$$P_0 = \frac{I}{\sum_{n=0}^{c_k-1} \frac{\left(\frac{\lambda_k}{\mu_k}\right)^n}{n!} + \left[\frac{\left(\frac{\lambda_k}{\mu_k}\right)^{c_k}}{c_k! \times \left(1 - \frac{\lambda_k}{\mu_k \times c_k}\right)} \right]}$$

Cuando el sistema no se ajuste a las hipótesis anteriormente mencionadas⁵⁶, se suele hacer uso de las técnicas de simulación, partiendo de la premisa de que cualquier sistema del que se pueda obtener datos de las tasas de llegada y de servicio se puede simular⁵⁷. Si bien este proceso solía ser arduo, actualmente existen multitud de programas informáticos que ayudan en esta labor.

3.5. LOS ELEMENTOS DEL TIEMPO DE SUMINISTRO Y SU ALEATORIEDAD

Como nos referimos en el Apartado 3.2., los tiempos que componen el tiempo de suministro suelen ser variables aleatorias cuyo valor medio es necesario estimar mediante la Medición del Trabajo o la Teoría de Colas. Una vez analizados estos procedimientos, la exactitud de las distintas técnicas y los datos necesarios para cada una de ellas, pasaremos a continuación a estudiar, por separado, los elementos que componen el tiempo de suministro⁵⁸, centrándonos en el análisis de su aleatoriedad.

3.5.1. El tiempo de confección del pedido

El tiempo de confección del pedido es el *“tiempo necesario para elaborar la documentación del mismo y enviarla al Centro de Trabajo. Ésta contendrá todas*

⁵⁶ Población y longitud de cola ilimitada, permanencia en cola hasta recibir la operación y tasa de llegada distribuida como una Poisson.

⁵⁷ Para más información sobre la aplicación de la simulación en la Teoría de Colas véanse, por ejemplo, Kaufman (1974, pp. 153-164), Adam y Ebert (1989, p. 464), Agaron y otros (1993, pp. 143-152), Niebel (1996, p. 685), Cao (2002, pp. 203-216).

⁵⁸ Recordemos que el tiempo de suministro está compuesto por los tiempos: de confección del pedido, desplazamiento, cola, carga, espera e inspección.

sus características, tales como ítem, tamaño, ruta, fechas previstas, materiales necesarios, etc.” (Domínguez y otros, 1995b, p. 20).

En entornos MRP, donde existen altos niveles de uso de ordenadores, el tiempo de confección de un pedido suele ser muy pequeño, incluso algunos autores ni siquiera lo consideran en el cálculo del tiempo de suministro⁵⁹.

Este tiempo también suele considerarse independiente del tamaño del lote del ítem emitido, e incluso podría tener el mismo valor para cualquier ítem. Esto es debido a que, el tiempo de lanzamiento de pedido suele depender de la automatización de este proceso, el cual, una vez instaurado en una empresa, suele utilizarse para todos los artículos que allí se fabrican⁶⁰.

Respecto a la aleatoriedad del tiempo de confección, si bien depende directamente de la complejidad del ítem que se desea fabricar, dado que se suele trabajar con valores de tiempo muy bajos, la variación con respecto al valor medio considerado será, generalmente, pequeña en términos cuantitativos.

3.5.2. El tiempo de desplazamiento

Los tiempos de desplazamiento de los materiales para la elaboración de un lote de Q_j unidades, al primer Centro de Trabajo (Tdm_{Q_j}), así como de los artículos de un Centro de Trabajo al siguiente de su ruta o a almacén ($Td_{Q_{ijk}}$), se ven afectados principalmente por la distribución en planta de las instalaciones. Nos referimos a la influencia que sobre ellos tienen las distancias entre Centros, el tiempo necesario por unidad de distancia y el número de manipulaciones⁶¹, estando estas últimas calculadas para un tamaño medio de lote, ya que cuanto mayor sea éste, más viajes habrá que realizar para trasladarlo.

⁵⁹ Véase por ejemplo, Gibson, Greenhalgh y Kerr (1995, p. 126) o Plossl (1995, p. 203).

⁶⁰ A diferencia de lo que puede ocurrir con los pedidos realizados al exterior, los cuales dependen del sistema de intercambio de datos que se mantenga con los proveedores, así como la exigencia de mayor o menor información relativa al ítem solicitado.

⁶¹ Las manipulaciones pueden entenderse como “la función que realiza un sistema compuesto de equipos, instalaciones y mano de obra al mover y almacenar material a fin de conseguir unos objetivos determinados, sujetos a condiciones de tiempo y lugar” (Vallhonrat y Coromías, 1991, p. 99).

Dado que el total de unidades que salen de un Centro de Trabajo tras habersele realizado una operación, generalmente, no suele coincidir a lo largo de su ruta (debido, por ejemplo, al efecto del factor de defectuosas), el número de manutenciones puede variar para un mismo tamaño de lote a lo largo del proceso productivo. Así llamaremos m_{iQ_j} al número de manutenciones necesarias para trasladar un lote emitido de Q_j , tras serle realizada la operación i , al Centro de Trabajo siguiente o al almacén. Aún podemos llegar más lejos en el estudio de las manutenciones, ya que incluso, podrían no tener siempre el mismo valor para una operación en concreto, puesto que la aleatoriedad del factor de aprovechamiento puede incidir sobre las unidades que salen de un Centro de Trabajo y, por ende, en el número de viajes necesarios para el traslado completo del lote. En este sentido podemos decir que la variabilidad de m_{iQ_j} dependerá del tamaño del lote, de la capacidad del elemento de transporte y de las variaciones del factor de defectuosas.

Con respecto al tiempo requerido por unidad de distancia, éste dependerá de las características del ítem trasladado (peso, volumen, etc.) y del factor encargado del transporte (en configuraciones *job shop*, los artículos suelen ser trasladados mediante elementos de transporte o directamente por el trabajador).

Los Centros de Trabajo que realizan varias operaciones, pueden necesitar ajustar el elemento de transporte utilizado o incluso tener que recurrir a uno distinto al usado en el traslado anterior, en el caso de que las diferencias con las características del lote desplazado con anterioridad así lo originen. En este sentido, puede ser necesario un tiempo de ajuste o preparación del elemento de transporte, para el traslado de un lote del ítem j , al que se le ha ejecutado la operación i , en el Centro de Trabajo k (tpd_{ijk}), en dos situaciones:

- Cuando se haya procesado un ítem diferente al anterior, que además, necesitaba unas condiciones de transporte distintas.
- Cuando el lote desplazado con anterioridad, aun siendo del mismo ítem, hubiera recibido una operación diferente, que le provoque tal variación en sus características que conlleve el ajuste del elemento de transporte.

Este tiempo de preparación suele ser independiente del tamaño del lote que se vaya a trasladar, y se verá afectado por el orden de salida de los artículos y el criterio de desplazamiento de las unidades ya procesadas. Cuando el Centro de Trabajo disponga de varios canales, la sucesión formada por los lotes que van saliendo de éste depende, no sólo del criterio de entrada sino también de la tasa de salida del canal. En el caso más simple, en el que se disponga de un único servidor o bien, aun existiendo varios, todos coincidan en su tasa de servicio, la disciplina de salida coincidirá con la de entrada.

En definitiva, el tiempo de ajuste se producirá si el lote trasladado con anterioridad necesitaba unas condiciones de transporte distintas. Teniendo en cuenta las consideraciones referidas, podemos decir que este tiempo suele comportarse como una variable aleatoria, por lo que será necesario estimar su valor medio⁶².

El tiempo medio de desplazamiento de un lote de un tamaño Q_j , desde el Centro de Trabajo k , donde se le ha ejecutado la operación i , hasta el siguiente Centro de Trabajo en su ruta o hasta el almacén, se podrá calcular como:

$$\overline{Td_{Qijk}} = \overline{td_{ijk}} \times d_i \times \overline{m_{iQ_j}} + \overline{tpd_{ijk}} \quad (3.8)$$

Donde:

$\overline{td_{ijk}}$ = tiempo medio de desplazamiento por unidad de distancia, necesario para el traslado del ítem j desde el Centro de Trabajo k , donde se le acaba de realizar la operación i , al siguiente de su ruta o al almacén en su caso.

d_i = distancia desde el Centro de Trabajo en el que ha recibido la operación i , hasta el lugar donde se le vaya a ejecutar la operación siguiente o al almacén, si el lote ha pasado ya por todas las operaciones de su ruta.

$\overline{m_{iQ_j}}$ = número de manutenciones medias necesarias para transportar un lote de tamaño Q_j , tras habérsele realizado la operación i .

$\overline{tpd_{ijk}}$ = tiempo medio de preparación para el desplazamiento de un lote del artículo j , en el caso de que éste sea necesario, tras serle realizada la operación i , cuando el traslado anterior ha sido de un ítem (puede ser también el artículo j) al que se le acaba de ejecutar una operación diferente.

Por otro lado, el tiempo de desplazamiento medio de los materiales para la realización de la primera operación de su ruta, a un lote de Q_j unidades del ítem j , se calculará de forma análoga a la referida en la expresión (3.8):

$$\overline{Tdm_{Qj}} = \overline{tdm_j} \times d_{mj} \times \overline{m_{mQ_j}} + \overline{tpdm_j} \quad (3.9)$$

⁶² El efecto de la Regla de Secuenciación sobre el tiempo de ajuste se verá más extensamente en el Apartado 3.5.4.2., donde se estudia el tiempo de preparación.

Donde:

$\overline{tdm}_j$ = tiempo medio de desplazamiento por unidad de distancia, necesario para el traslado hasta el Centro de Trabajo donde se le realizará la primera operación, de los materiales necesarios para elaborar un lote del ítem j .

d_{mj} = distancia desde el lugar donde estén almacenados los materiales hasta el Centro de Trabajo donde comenzará la ruta de fabricación del ítem j .

m_{mQ_j} = número de mantenencias necesarias para transportar los materiales precisos para la fabricación de un lote de tamaño Q_j .

$\overline{tpdm}_j$ = tiempo medio de preparación para el desplazamiento de los materiales que necesita un lote de artículo j , en el caso de que el traslado inmediatamente anterior constara de componentes distintos (para comenzar un lote de un ítem diferente del ítem j), y precisen de ajuste en el elemento de transporte.

En función de lo expresado anteriormente y a modo de resumen, podemos decir que la aleatoriedad del tiempo de desplazamiento está originada por:

- La incidencia de la variabilidad del tamaño de lote en el caso de tomar un número de mantenencias medio.
- La exactitud de las estimaciones del tiempo necesario para el desplazamiento de un ítem por unidad de distancia.
- El tiempo de preparación para el desplazamiento (variable en función del orden de traslado de los lotes, donde puede incidir el criterio de entrada de los lotes en el Centro de Trabajo y las diferencias entre las tasas de servicios de los distintos canales).

3.5.3. El tiempo de cola

El tiempo de cola es el destinado a la espera para la entrada en un Centro de Trabajo en el que se le debe realizar una operación concreta. Puesto que en el Apartado 3.4. se ha realizado un análisis más exhaustivo de la problemática de la

estimación de este tiempo, sólo nos referiremos aquí a las características comunes de cualquier sistema de cola. Así, el tiempo que deberá esperar un lote del artículo j , que llegue al Centro de Trabajo k , para que se le realice la operación i ($Tcola_{ijk}$), dependerá, según se desarrolló en el Apartado 3.4.1., de:

- El número de elementos o máquinas, pertenecientes al Centro de Trabajo k , en los cuales se le pueda realizar la operación, llamados canales o servidores.
- El total de unidades que se encuentren en espera a la llegada del lote.
- El orden de entrada en el Centro de Trabajo k de los lotes situados en la línea de espera, que dependerá de la Secuenciación o criterio de entrada en el canal.
- El tiempo de carga de los lotes que se estén procesando en el momento de llegada y de los que vayan a entrar en el Centro de Trabajo k con anterioridad.

De todo ello podemos deducir que para la estimación del tiempo de cola medio, es necesario partir de al menos cuatro variables aleatorias para cada una de las operaciones que se realizan en el Centro de Trabajo objeto de estudio: tasa de llegada, tamaño de lote, tiempo de ejecución unitario y tiempo de preparación. Además, según lo expuesto en el Apartado 3.4.2., se necesita conocer la función de distribución de la tasa de llegada y de servicio o, al menos, la media y desviación típica de esta última. La diferencia entre el tiempo medio de espera calculado y el real, suele ser por tanto, inevitable debido a los errores propios de la estimación.

La fórmula de Pollaczek-Khintchine, para el cálculo del tiempo de cola en sistemas M/G/1 [expresión (3.5)], es aplicada por Kuik y Tielemans (1999, pp. 436-437) para el caso del procesamiento de distintos lotes de ítems, que pueden tener diferentes tasas medias de llegada ($\overline{\lambda}_{ik}$), utilizando así los tiempos medios de carga de cada lote ($\overline{Tc_{Qijk}}$) para la estimación del tiempo de cola, obteniendo que:

$$\overline{Tcola_k} = \overline{Tcola_{ijk}} = \frac{\sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J (\overline{\lambda}_{ik} \times \overline{Tc_{Qijk}}^2)}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J (\overline{\lambda}_{ik} \times \overline{Tc_{Qijk}}) \right]} \quad (3.10)$$

Se puede observar que el tiempo de cola a la entrada de un Centro de Trabajo k depende de todas las operaciones que se realicen en él, las cuales componen el conjunto Rk .

3.5.4. El tiempo de carga

El tiempo de carga, tiempo de procesamiento u *operation time*, es “*el tiempo necesario para realizar una tarea, en el cual se incluye el tiempo de preparación que sea necesario*” (Fernández y Vázquez, 1994, p. 151).

El tiempo de carga que generaría la operación i para el artículo j en el Centro de Trabajo k (tc_{ijk}), vendrá condicionado por dos factores⁶³:

- El tiempo total de ejecución de la operación i (te_i), entendido éste como el tiempo necesario para desarrollar una vez dicha operación. Aparecerá cada vez que la operación se repita, es decir, una vez por cada unidad del lote a procesar.
- El tiempo de preparación del Centro de Trabajo k para realizar la operación i (tp_{ik}), que es independiente del tamaño de lote de artículo j al que se le vaya a realizar la operación. Se incurre en dicho tiempo antes de comenzar a ejecutar la operación i , y se tardará lo mismo sea cual sea el número de veces que ésta se vaya a repetir.

El segundo de los componentes mencionados, el tiempo de preparación, se incluye cuando éste implica un trabajo directo, generalmente realizado por los mismos trabajadores que ejecutan a continuación la operación para la que preparan el Centro de Trabajo. Sin embargo, en el caso de que la preparación sea una tarea realizada por personal especializado, generalmente no asignado en exclusiva a una máquina o Centro concreto, el tiempo de preparación puede considerarse tiempo de inactividad, no incluyéndose en la carga⁶⁴.

No obstante, Según Oden, Langenwalter y Lucier (1993, p. 204) la técnica de planificación CRP, que es la que nos ocupa, asume que todo el tiempo de preparación es interno, por lo que se considerará para el cálculo de la carga. En este

⁶³ Véase, por ejemplo, Blackstone (1989, p. 96), Fogarty, Blackstone y Hoffmann (1991, p. 438) o Fernández y Vázquez (1994, p. 151).

⁶⁴ Véase Oden, Langenwalter y Lucier (1993, p. 189).

sentido y, dado que uno de los elementos que lo componen se repite cada vez que se realiza la operación (o por cada unidad del lote), y en el otro sólo se incurre una vez para todo el lote (sea cual sea el tamaño de éste), para determinar el tiempo de carga unitario⁶⁵ originado por la operación i , realizada al ítem j en el Centro de Trabajo k , se considera tradicionalmente desde hace años⁶⁶, un tiempo de preparación unitario calculado como el cociente entre el tiempo de preparación y el tamaño de lote a procesar (Q_{ij}), de manera que dicho tiempo de carga unitario se determinaría como el resultado de la siguiente expresión:

$$tc_{ijk} = te_i + \frac{tp_{ik}}{Q_{ij}} \quad (3.11)$$

Donde debemos recordar que:

te_i = tiempo necesario para realizar la operación i una vez.

tp_{ik} = tiempo necesario para preparar el Centro de Trabajo k para la realización de la operación i , que dependerá, entre otras cosas, de la operación realizada inmediatamente antes.

Q_{ij} = número de unidades a procesar del artículo j , en la operación i .

Dado que el tiempo de ejecución y el de preparación no suelen tener un valor constante, se utilizarán sus valores medios, resultando un tiempo de carga unitario medio:

$$\overline{tc_{ijk}} = \overline{te_i} + \frac{\overline{tp_{ik}}}{\overline{Q_{ij}}} \quad (3.12)$$

Además, el tamaño de lote que se vaya a procesar de un ítem j puede variar. Para reducir el número de cálculos se suele emplear un tamaño de lote

⁶⁵ Dicho tiempo es fundamental para la gran mayoría de las técnicas de Planificación de Capacidad (Listas de Capacidad, Perfiles de Recursos, Planificación de Necesidades de Capacidad, en su versión simplificada, etc.). Este tiempo será el que, por uno u otro procedimiento, se multiplique por los tamaños de lotes a procesar para obtener la carga generada por cada lote en cada Centro de Trabajo. Ver, por ejemplo, Vollmann, Berry y Whybarck (1995, pp. 136 y ss.) o Domínguez y otros (1995b, pp. 31 y ss.).

⁶⁶ Véase, por ejemplo, Wemmerlöv (1984), Blackstone (1989), Vollmann, Berry y Whybarck (1995), etc.

medio⁶⁷. Para diferenciarlo del anterior, denotaremos a este tiempo de carga unitario simplificado como $\overline{tc_{ijk}}$, calculándose como:

$$\overline{tc_{ijk}} = \overline{te_i} + \frac{\overline{tp_{ik}}}{\overline{Q_{ij}}} \quad (3.13)$$

Es evidente que el uso de un tamaño de lote medio para la determinación del tiempo de carga unitario produce desviaciones con respecto a la carga real, la cual podría ser superior o inferior a la calculada en función de que el tamaño de lote a procesar sea menor o mayor que el tamaño medio utilizado en el cálculo del tiempo de carga unitario⁶⁸. Dicha desviación, lógicamente, se transmitirá a aquellas técnicas de Planificación de la Capacidad para las que tc_{ijk} es un elemento básico.

Debido a la importancia del tiempo de carga para la elaboración del Plan de Carga en la técnica CRP, pasamos a continuación a estudiar más detalladamente la aleatoriedad de los tiempos que lo componen: ejecución y preparación.

3.5.4.1. El tiempo de ejecución

Como hemos referido con anterioridad, el tiempo de ejecución unitario de una operación, es el tiempo necesario para realizarla una vez. Este proceso se ve afectado por múltiples factores, lo que hace que el tiempo necesario para llevarlo a cabo no sea constante, sino que, por el contrario, varíe con las circunstancias que se presentan cada vez que se realiza. Por ello, tomará diferentes valores con ciertas probabilidades de ocurrencia, comportándose así como una variable aleatoria. La dispersión que puede alcanzar ésta depende de las características propias de la tarea, como pueden ser el nivel de mecanización, el número de trabajadores que son necesarios para ejecutar la operación, las diferentes condiciones ambientales en las que puede ser desarrollada, etc.

El cálculo del tiempo de ejecución medio de una operación se puede realizar mediante varios métodos, de manera que la elección de éste influirá en la exactitud de la estimación (como ya se comentó en el Apartado 3.3.). El resultado

⁶⁷ Véase, por ejemplo, Wemmerlöv (1984), Blackstone (1989), Vollmann, Berry y Whybarck (1995), Domínguez y otros (1995b) o García y García (1996).

⁶⁸ Véase García y García (1996).

obtenido mediante la técnica elegida puede venir dado en tiempo real, productivo o estándar. Puesto que para la comparación de la carga y capacidad se utiliza el tiempo estándar, será preciso realizar la conversión, cuando no se obtenga este dato directamente, multiplicando por el factor eficiencia y, en su caso, también por el factor utilización (Apartado 2.4.3.). Todos ellos deben ser estimados, por lo que, inciden sobre la aleatoriedad del tiempo calculado. Estos factores pueden ser calculados para cada trabajador individualmente, para un Centro de Trabajo, un departamento o para toda la planta productiva, de manera que cuanto mas agregado sea el cálculo menor precisión tendrá el resultado.

3.5.4.2. El tiempo de preparación

El tiempo de preparación se puede definir como el conjunto de “*acciones que es preciso realizar al comienzo y a la terminación del trabajo y en ocasiones a lo largo de la serie de piezas o productos a fabricar*” (Ruiz, 1991, p. 126). El valor que tomará en el Centro de Trabajo k para realizar la operación i (tp_{ik}), es independiente del tamaño de lote de artículo j al que se le vaya a realizar aquélla y se ve condicionado por la operación realizada anteriormente. Sus valores pueden representarse mediante una matriz por cada Centro de Trabajo, con tantas filas y columnas como número de operaciones puedan realizarse en él. Así, por ejemplo, en el caso de que en un Centro de Trabajo k se realicen varias operaciones, los tiempos de preparación, de una operación i , en función de la operación realizada previamente, a la que notaremos con el subíndice l , sería tp_{il} . La Tabla 3.2. muestra la matriz para el caso de que en el Centro de Trabajo k se realicen tres operaciones (O1, O5 y O8).

i/l	O1	O5	O8
O1	0	tp_{15}	tp_{18}
O5	tp_{51}	0	tp_{58}
O8	tp_{81}	tp_{85}	0

Tabla 3.2. Matriz de tiempos de preparación para cada una de las operaciones O1, O5 y O8 realizadas en el Centro de Trabajo k .

Fuente: elaboración propia.

De esta forma el tiempo de preparación, para realizar la operación O1 después de haber realizado O5, sería tp_{15} . Se observa que la matriz tiene ceros en la diagonal debido a que en el caso de que la operación realizada con anterioridad en el Centro de Trabajo sea la misma (O1 después de O1), no se incurriría un tiempo

de preparación, ya que no habría que adaptar las máquinas. Es necesario precisar que, si fuese necesario ajustar el Centro de Trabajo aunque se hubiese realizado la misma operación con anterioridad (por ejemplo, para la limpieza de éste), habrá que diferenciar dos casos: cuando el tiempo sea independiente de la operación ejecutada (por lo que se puede considerar tiempo improductivo e incluirlo dentro del factor utilización) y por otro lado, cuando varíe en función de la operación ejecutada (lo que haría conveniente reflejar el valor del tiempo de preparación en la diagonal de la matriz).

En la Tabla 3.2. se han incluido únicamente las operaciones que se realizan en un determinado Centro de Trabajo. Sin embargo, se pueden incorporar todas las operaciones desarrolladas por la empresa, teniendo en cuenta que las que no se ejecuten en el Centro de Trabajo en cuestión, tendrían un tiempo de preparación igual a cero. El mismo ejemplo de la Tabla 3.2. para el Centro de Trabajo k (en el que sólo se realizan las Operaciones O1, O5 y O8), se recoge, con todas las operaciones desarrolladas por la empresa en la Tabla 3.3., siendo I el número de operaciones que desarrolla la empresa (O1 a OI) en los diferentes Centros de Trabajo. Seguimos considerando el caso más simple, en el que no es necesario ajustar las máquinas para volver a realizar la misma operación (la diagonal seguirá siendo cero).

	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9	...	OI
O1	0	0	0	0	tp ₁₅	0	0	tp ₁₈	0	...	0
O2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
O3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
O4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
O5	tp ₅₁	0	0	0	0	0	0	tp ₅₈	0	...	0
O6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
O7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
O8	tp ₈₁	0	0	0	tp ₈₅	0	0	0	0	...	0
O9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
OI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3.3. Matriz de tiempos de preparación del Centro de Trabajo k para todas las operaciones (O1 a OI) realizadas por la empresa.

Fuente: elaboración propia.

Hay que considerar además, que tampoco es constante el tiempo que se tarda en preparar el Centro de Trabajo para hacer una operación i , cada vez que

previamente se ha realizado antes la operación l . Por el contrario, intervienen muchos factores (absentismo, descansos, necesidad de operaciones de mantenimiento, desgastes de las máquinas por el número de piezas de la operación que se han procesado, extravío de herramientas, experiencia y habilidad de los operarios, etc.). Al estar trabajando en unidades estándar, muchos de estos elementos son considerados dentro de los factores de eficiencia y utilización, pero a pesar de ello el tiempo de preparación puede variar, por lo que cada tp_{il} constituye realmente una variable aleatoria.

No obstante, una vez contempladas todas las desviaciones debidas a los aspectos que incluyen los factores de eficiencia y utilización, así como las derivadas de cual sea la operación precedente que se haya realizado en el Centro de Trabajo, las variaciones en el tiempo de preparación deben ser mínimas. Si tomásemos éstas como despreciables, consideraríamos al tiempo de preparación como una variable aleatoria discreta, puesto que los valores que puede tomar son sólo los de la matriz de tiempos de preparación, que serán siempre iguales o mayores que cero.

En cuanto al valor del tiempo de preparación que deberá emplearse para la estimación de la carga unitaria [tc_{ijk} ; ver expresión (3.11)], deberá ser un valor medio para cada operación i en cada Centro de Trabajo k ($\overline{tp_{ik}}$). Su forma de determinación en la práctica puede adoptar dos opciones diferentes:

- Cociente entre el tiempo total dedicado a preparar el Centro de Trabajo y el número de lotes procesados de la operación i (incluiría los casos en los que un lote no originara tiempo de preparación).
- Cociente entre el tiempo total utilizado para preparar el Centro de Trabajo y el número de veces que hubo que ajustarlo para hacer la operación i .

Para el análisis de la aleatoriedad del tiempo de preparación, tomaremos como valor medio el promedio de los tiempos cuando éstos existan; es decir, elegimos la segunda de las opciones.

Para simplificar, partimos por tanto, de la hipótesis de que el tiempo de preparación es una variable aleatoria discreta, siendo los valores que puede tomar los de la matriz de tiempos de preparación (siempre iguales o mayores que cero). En tal caso la Esperanza Matemática de su valor vendrá condicionada por el hecho de que, para una operación i en un Centro de Trabajo k , su valor será igual al $\overline{tp_{ik}}$, siempre que la operación anterior realizada en k no haya sido la misma operación i (de haberlo sido, no se produciría tiempo de preparación), y que esa operación i se

realice en el Centro de Trabajo k (pues si se realiza en otro, el tiempo de preparación sería cero, como refleja la diagonal de la matriz). Por todo ello, la Esperanza Matemática del tiempo de preparación podría expresarse como:

$$E(tp_{ik}) = \overline{tp_{ik}} \times P(tp_{ik} > 0) + 0 \times P(tp_{ik} = 0) = \overline{tp_{ik}} \times P(tp_{ik} > 0) \quad (3.14)$$

Siendo $\overline{tp_{ik}}$ el promedio de los valores superiores a cero que conforman la fila O_i de la matriz de tiempos de preparación del Centro de Trabajo k .

Dado que el tiempo de ajuste del Centro afecta a la carga generada por un lote, ésta viene condicionada por las probabilidades de que el tiempo de preparación de la operación i en el Centro de Trabajo k sea mayor que cero y que sea igual a cero. Los casos en que esto último ocurre son, como antes comentábamos:

- Aquellos en que la operación i no se hace en k , por lo que no influye la secuenciación de lotes en el Centro de Trabajo.
- Cuando realizándose la operación en el Centro de Trabajo, se ha ejecutado previamente la misma operación i . Por lo que la carga se ve influida por el orden de procesamiento de los lotes y, por tanto la Regla de Prioridad empleada.

El criterio de entrada en el Centro de Trabajo puede tener un efecto importante sobre la asignación y el montante de la carga a través de la probabilidad de que sea necesario tiempo de preparación. Por ello creemos interesante analizar, desde el punto de vista del tiempo de preparación, cómo afectan al cálculo del tiempo de carga las Reglas de Prioridad⁶⁹. Por ello vamos a estudiar dos casos representativos: en primer lugar el uso del criterio de Fabricación por Orden de Llegada⁷⁰ (FCFS), que supone no aplicar ningún cambio en el orden de la cola de espera. En segundo lugar, la técnica de secuenciación que pretende obtener el menor valor del tiempo de carga (aunque ello suponga retrasos en las entregas), basándose en la minimización del tiempo de preparación de los lotes. Ello nos permitirá poner de manifiesto las desviaciones que una y otra provocan en dicho tiempo de preparación y, por ende, en el de carga.

⁶⁹ La carga calculada, sin tener en cuenta la Regla de Secuenciación, será siempre igual o superior a la que resultaría de la aplicación de la expresión (3.9), ya que los valores de la probabilidad están comprendidos entre uno y cero. Los criterios de entrada en un Centro de Trabajo se han analizado en el Apartado 3.4.1.7.

⁷⁰ Comúnmente utilizado en la Teoría de Colas.

3.5.4.2.1 Efecto del criterio de fabricación por orden de llegada sobre el tiempo de preparación

Con la Regla FCFS o fabricación por orden de llegada, será necesario un tiempo de preparación cuando a la entrada de un nuevo lote, éste se sitúe en la cola de espera, justo detrás de otro al que se le vaya a realizar una operación distinta, o en el caso de que, no existiendo ningún lote en cola, la última operación realizada sea diferente de la que espera el lote recién llegado.

Missbauer⁷¹ estima, mediante la Teoría de Colas, la probabilidad de que un lote se sitúe detrás de otro al que se le tenga que realizar la misma operación, suponiendo tasas de llegada distribuidas como una Poisson. Cuando esto ocurra, el tiempo de preparación será igual a cero (como ya vimos en el Apartado 3.5.4.2., no puede ser inferior a cero):

$$P(tp_{ik} = 0) = \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\sum_{i=1}^I \overline{\lambda_{ik}}} = \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}}$$

Donde:

$\overline{\lambda_{ik}}$ = tasa media de llegada al Centro de Trabajo k del ítem al que hay que hacerle la operación i .

$\overline{\lambda_k}$ = tasa media de llegada de lotes al Centro de Trabajo k , calculada como la suma de todas las tasas de llegada de las operaciones que se ejecutan en el Centro.

I = número total de operaciones que se pueden ejecutar en la empresa.

La probabilidad de que un lote se sitúe detrás de otro al que se le vaya a realizar una operación distinta de la suya y que, por tanto, se tenga que ajustar el Centro de Trabajo, necesitando tiempo de preparación, sería:

$$P(tp_{ik} > 0) = 1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \quad (3.15)$$

⁷¹ Missbauer (1997, p. 136).

A partir de aquí, sustituyendo en la expresión (3.14) el valor de la $P(tp_{ik} > 0)$ determinado en la expresión (3.15), obtendríamos que la esperanza matemática del tiempo de preparación para el caso de fabricación por orden de llegada sería:

$$E(tp_{ik}) = \overline{tp_{ik}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}}\right) \quad (3.16)$$

Se puede observar en la expresión anterior, que el valor medio del tiempo de preparación, depende de las tasas de llegada de todas las operaciones que se ejecuten en un Centro de Trabajo (debido a la incidencia de λ_k). Tomará un valor más pequeño cuanto mayor sea la tasa de llegada de la operación, lo que conlleva que será más habitual que se encuentre al final de la cola de espera un lote al que se le va a ejecutar la misma operación.

3.5.4.2.2. Efecto de la regla de minimización del tiempo de preparación

El procedimiento seguido por la Regla, que pretende conseguir la minimización del tiempo de preparación, consiste en que, llegado un lote a un Centro de Trabajo, se colocará en la cola de espera en el lugar inmediatamente posterior al último de los lotes a los que se vaya a realizar la misma operación, en el caso de que haya alguno que cumpla tal condición, con lo cual no generaría tiempo de preparación. En caso contrario, se situará en el último lugar de la cola de espera⁷².

Según esta Regla de lotes en cola, no se encuentre entre ellos ninguno al que se le vaya a realizar la misma operación. Missbauer⁷³ estima también la probabilidad de existencia de tiempo de preparación para este caso, que será:

$$P(tp_{ik} > 0) = (P_0 \times (1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}}) + \sum_{n=1}^{\infty} P_n \times (1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}})^n) \quad (3.17)$$

⁷² Véase, Benjaafar y Sheikhzadeh (1996, p. 2787), Missbauer (1997, p. 136) y García, Rabadán y Gessa (2003, pp. 85-95).

⁷³ Missbauer (1997, p. 136).

Donde:

$\overline{\lambda_{ik}}$ = tasa media de llegada al Centro de Trabajo k del ítem al que hay que hacerle la operación i .

$\overline{\lambda_k}$ = tasa media de llegada de lotes al Centro de Trabajo k .

n = número de lotes en espera de ser procesados en el Centro de Trabajo k .

P_0 = probabilidad de que ningún trabajo esté en cola de espera a la llegada del lote.

P_n = probabilidad de que haya n trabajos en cola de espera a la llegada del lote.

Así, la probabilidad de que el tiempo de preparación sea superior a cero, es la suma de las probabilidades de que:

- Al llegar el lote al Centro de Trabajo, no haya ningún lote en espera (P_0) y al lote tratado justo anteriormente se le realizase una operación distinta.
- Existiendo en cola n lotes (P_n), no haya ningún trabajo esperando a que se le realice la misma operación.

La dificultad de la estimación estribaría en el cálculo de estas probabilidades, ya que dependen de las características del sistema de cola. Podría realizarse un acercamiento a su valor a través de la aplicación de la Teoría de Colas, siendo necesario conocer la distribución de la tasa de llegada, el número de canales y si la longitud de la línea de espera se considera finita o infinita, entre otros datos. No obstante, para calcular un valor más exacto sería necesario utilizar técnicas de simulación, ya que para el caso que estamos estudiando no se cumple una de las premisas en la que se basan la mayoría de los cálculos de la Teoría de Cola; nos referimos a la entrada en el sistema por orden de llegada⁷⁴.

⁷⁴ Para mayor información sobre el efecto de las Reglas de Secuenciación sobre el tiempo de preparación, véase García, Rabadán y Gessa (2003, pp. 85-95).

3.5.4.3. El tiempo de carga de un lote

El tiempo de carga unitario es la suma de dos variables aleatorias: el tiempo de ejecución y el tiempo de preparación y, por tanto, se comporta como tal. Si calculamos su esperanza matemática, como indicador de su valor medio, a partir de la expresión (3.11) y sustituyendo el valor de (3.14) resultaría:

$$E(tc_{ijk}) = E(te_i) + E\left(\frac{tp_{ik}}{Q_{ij}}\right) = \overline{te_i} + \frac{E(tp_{ik})}{\overline{Q_{ij}}} = \overline{te_i} + \frac{\overline{tp_{ik}} \times P(tp_{ik} > 0)}{\overline{Q_{ij}}} \quad (3.18)$$

Como podemos observar, el tiempo de carga depende de la probabilidad de que sea necesario incurrir en un tiempo de preparación antes de ejecutar una operación, la cual varía en función de las características de la cola de espera que se genere a la entrada del Centro de Trabajo.

A tenor de lo expresado en el apartado anterior y considerando, el caso más simple, donde el criterio de entrada en el Centro de Trabajo k es FCFS y que las tasas de llegada se distribuyen como una Poisson, sustituyendo la expresión (3.15) en la (3.18), podemos expresar el tiempo de carga medio como:

$$\overline{tc_{ijk}} = E(tc_{ijk}) = \overline{te_i} + \frac{\overline{tp_{ik}} \times \left(1 - \frac{\lambda_{ik}}{\lambda_k}\right)}{\overline{Q_{ij}}} \quad (3.19)$$

No se debe perder de vista que las tasas de llegada (λ_{ik}), cuando se ejecutan varias operaciones en un mismo Centro de Trabajo, no suelen tener un valor constante, sino que se comportan como variables aleatorias, para las que habría que estimar su media.

Los valores del tiempo de ejecución y preparación, y con ello la carga unitaria, suelen calcularse en unidades estándar para poder comparar capacidad necesaria y disponible, para lo que habrá que tener en cuenta los factores eficiencia (E_k) y utilización (U_k), analizados en el Apartado 2.4.3. Sin embargo, cuando se desea calcular el tiempo de suministro, es necesario conocer el valor de la carga en unidades reales. Así, podemos decir, que el tiempo de carga (en unidades reales) originado por la realización de la operación i a todas las unidades que componen un lote medio del ítem j , se calcularía, teniendo en cuenta la expresión (3.19), de la siguiente manera:

$$\overline{Tc_{Qijk}} = \frac{\overline{tc_{ijk}} \times \overline{Q_{ij}}}{\overline{E_k} \times \overline{U_k}} = \frac{(\overline{te_i} \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times (1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}})}{\overline{E_k} \times \overline{U_k}} \quad (3.20)$$

Donde se ha sustituido el número de unidades a procesar de un lote del ítem j , en una operación i , por:

$$Q_{ij} = Q_j \times v_i$$

Siendo:

Q_j = lote emitido del ítem j .

v_i = aprovechamiento acumulado de la operación i .

Con respecto a v_i ⁷⁵, podemos decir que se ve afectado por los factores de aprovechamiento⁷⁶ de todas las operaciones que le siguen en su ruta, los cuales reflejan la proporción de unidades sin defectos que se obtienen al realizar cada una de las operaciones. Este valor depende, por tanto, de las características del ítem al que se le realiza la operación, la precisión de la maquinaria y/o trabajadores involucrados en la ejecución de ésta y, por supuesto, de la propia aleatoriedad del proceso productivo.

El motivo de la inclusión del factor de aprovechamiento en el cálculo de la carga de un lote, se debe a que la cantidad de unidades del mismo que se procesan en una determinada operación, no tiene porqué coincidir con el tamaño del lote emitido, ni siquiera con el número de unidades procesadas en una operación anterior o posterior de su ruta; y todo ello a causa de la pérdida de unidades originadas por el factor de defectuosas. La no consideración de este factor provocará que se calcule una carga superior a la real.

⁷⁵ El aprovechamiento acumulado de una operación se calcula como el producto de los aprovechamientos de la propia operación y del resto de operaciones que le siguen en su ruta. Así, por ejemplo, si una ruta de fabricación está compuesta por las operaciones O1, O2 y O3, con factores de aprovechamiento a_1 , a_2 y a_3 , respectivamente, el aprovechamiento acumulado para la operación O1 (v_1) será: $a_1 \times a_2 \times a_3$. Véase, por ejemplo, Domínguez y otros (1995b) o García y García (1996).

⁷⁶ Calculados como $a_i = (1 - de_i)$, considerando de_i como la fracción de defectuosas media obtenida al ejecutar la operación i al artículo j . Véase Domínguez y otros (1995b) o García y García (1996).

Análogamente a lo reflejado en la expresión (3.20), el cálculo del tiempo de carga de un lote de un tamaño (Q_{ij}), se calcularía como:

$$\overline{Tc_{Q_{ijk}}} = \frac{(\overline{te_i} \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times (1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}})}{\overline{E_k} \times \overline{U_k}} \quad (3.21)$$

Será necesario considerar, por tanto, para el cálculo del tiempo de carga que genera un lote, valores medios de la eficiencia, utilización y aprovechamiento, además de las tasas de llegada de las operaciones, lo cual añade mayor variabilidad al resultado.

3.5.5. El tiempo de espera

Llamaremos tiempo de espera del artículo j tras la operación i , al tiempo que transcurre desde que se ha procesado el lote de j , hasta que es desplazado al Centro de Trabajo donde se le realizará la siguiente operación de su ruta, o al almacén si ya se le han practicado todas las operaciones necesarias para su elaboración. Si el traslado es inmediato, el tiempo de espera sería cero. Sin embargo, esta situación no es común en las configuraciones por lotes, ya que el desplazamiento no suele ser automático. La espera, en estos casos, depende del tiempo necesario para el movimiento de todos los lotes que han utilizado el Centro de Trabajo anteriormente y aún no han sido trasladados. Las variables que afectan a su cálculo son: el total de máquinas y/o trabajadores destinados a la función de desplazamiento, los viajes necesarios para trasladar cada lote (depende del tamaño de éste y de las características del elemento de transporte), las distancias entre los Centros de Trabajo vinculados en las distintas rutas, y por supuesto, el número de lotes que esperan para ser desplazados, bien al Centro de Trabajo siguiente, bien al almacén.

A la salida del Centro de Trabajo se crea un sistema de cola similar al originado en la entrada pero, en este caso, es producido por los lotes que esperan para ser trasladados. Por ello, con objeto de calcular el tiempo de espera medio, sería preciso tomar todas las consideraciones referidas en el Apartado 3.4. Para el cálculo del tiempo de espera es preciso considerar la propiedad de equivalencia, la cual especifica que: para *“una instalación de servicio con ‘s’ servidores, un proceso de entrada Poisson con parámetro λ , y la misma distribución de los tiempos de servicio para cada servidor con parámetro μ (M/M/s), en donde*

$\rho = \lambda / s\mu < 1$ [...], la salida en estado estable de esta instalación es un proceso de Poisson de media λ ” (De la Fuente y Pino, 2001, p. 89).

Si partimos de la hipótesis de que la tasa de llegada a la cola de espera generada después del procesamiento, se distribuye como una Poisson, estamos considerando que la salida del Centro de Trabajo sigue también esta distribución. Con esta simplificación, tomando un único canal o elemento dedicado al transporte y que el criterio de elección de la entrada, como el del traslado, sea FCFS, el tiempo de espera medio, en unidades reales, una vez ejecutada la operación i , puede ser calculado basándonos en la expresión (3.10), sustituyendo el tiempo total de carga de esta expresión por el tiempo total de desplazamiento, del que depende la tasa de salida en este caso. De esta manera, el tiempo de espera medio sería:

$$\overline{Tesp}_k = \overline{Tesp}_{ijk} = \frac{\sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J (\overline{\lambda}_{ik} \times (\overline{Td}_{Qijk})^2)}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J (\overline{\lambda}_{ik} \times \overline{Td}_{Qijk}) \right]} \quad (3.22)$$

Donde $(\overline{Td}_{Qijk})$ es el tiempo medio de desplazamiento para un tamaño medio de lote. Para el cálculo nos hemos basado en la expresión (3.10) (para tasas de llegadas distribuidas como una Poisson y cualquier distribución de las tasas de salida), considerando el tiempo medio de desplazamiento como tiempo de servicio, componente del sistema de cola generado a la salida del Centro de Trabajo. Es decir, el ritmo al que van “procesándose” o trasladándose al siguiente destino, es determinante de la tasa de salida del sistema.

3.5.6. El tiempo de inspección

En el entorno económico actual, debido a la gran importancia alcanzada por los Sistemas de Calidad, las empresas necesitan reducir el número de artículos defectuosos para ser competitivas. Para ello utilizan técnicas de prevención, consideradas como una inversión, pero también precisan dedicar recursos a la inspección para evitar que los artículos no conformes lleguen al mercado. El tiempo de inspección que se incorpora al tiempo de suministro de un artículo dependerá de:

- El tiempo necesario para comprobar si una unidad del artículo cumple con las especificaciones o tiempo de inspección unitario. Llamaremos

tiu_{ijk} al tiempo necesario para inspeccionar una unidad de un ítem j , una vez que se la ha ejecutado la operación i , en el Centro de Trabajo k .

- El número de veces que se inspeccionará. Es preciso establecer si la inspección se realizará únicamente sobre el artículo terminado o en varias de las etapas del proceso productivo.
- El número de unidades estudiadas, es decir, el tamaño de la muestra⁷⁷, la cual variará en función de la técnica de control de proceso aplicada, así como del tamaño de los lotes en el momento en que se va a realizar la inspección. Para simplificar, consideraremos que se inspecciona una fracción f del lote⁷⁸.

La inspección, como tal, es una operación y, por consiguiente, para el cálculo del tiu_{ijk} es preciso tomar las mismas consideraciones que para la estimación del tiempo de ejecución (ver Apartado 3.5.4.1.), por lo que deberemos trabajar con valores medios debido a su comportamiento aleatorio. El tiempo medio de inspección, si ésta se realiza únicamente al final de la ruta, será:

$$\overline{T_{insp_{Q_j}}} = \overline{tiu_j} \times f \times Q_j \times \overline{A_j} \quad (3.23)$$

Donde:

$\overline{tiu_j}$ = tiempo medio de inspección unitario de un ítem j , al final de su ruta.

Q_j = tamaño del lote emitido del ítem j .

$\overline{A_j}$ = aprovechamiento de la ruta del ítem j . Calculado como el producto de los v_i de todas la operaciones que conforman la ruta el ítem.

Hay que considerar que tiu_{ijk} tomará valor cero cuando una operación no esté dentro de la ruta del ítem j , o bien cuando, aun siendo necesaria para su fabricación, no se realice ninguna inspección del lote una vez realizada dicha operación.

⁷⁷ Estamos suponiendo el caso más general en el que la inspección de todas las unidades suele suponer elevados costes, por lo que es común la utilización del muestreo.

⁷⁸ Que puede tomar valores de 0 a 1, implicando en el primer caso que no se inspecciona ninguna unidad y en el segundo, que se inspeccionan todas las unidades que componen el lote.

Si la comprobación de la conformidad de las unidades se realiza en varias etapas del proceso productivo, el tiempo medio de inspección de un lote, tras realizarle la operación i , siguiendo la misma lógica aplicada para el desarrollo de la expresión (3.23), sería:

$$\overline{T_{insp}_{Qijk}} = \overline{tiu_{ijk}} \times f \times Q_j \times \overline{v_i} \quad (3.24)$$

3.6. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE SUMINISTRO PLANIFICADO EN UNIVERSOS ALEATORIOS

Con el análisis realizado en los apartados anteriores, se ha puesto de manifiesto la dificultad de estimar el tiempo de suministro planificado, originada por las características de los elementos que lo componen, ya que es una suma de tiempos que se comportan como variables aleatorias y sobre las que inciden gran cantidad de factores. A modo de resumen, podemos decir que la planificación realizada del tiempo de suministro se verá afectada por distintas fuentes de aleatoriedad, como son:

- La elección de los trabajadores apropiados para la realización de la Medición del Trabajo; decisión que debe tomar el analista de tiempos.
- La aplicación de las tolerancias y suplementos más adecuados a las condiciones de trabajo en las que se ejecuten las tareas.
- La estimación del ritmo del trabajador, cuando se elija una técnica directa de Medición de Trabajo y del tiempo de la tarea objeto de estudio, cuando se aplique una técnica indirecta.
- Una adecuada división de la tarea en elementos, en el caso de la estimación del tiempo mediante el uso de los estándares predeterminados de tiempos, los datos normalizados o el estudio de tiempos.
- La elección del periodo que más se ajuste a las condiciones típicas en las que se realiza una tarea, cuando se estime su tiempo mediante el muestreo de trabajo.

- La variación de las características reales de la tarea, así como de las condiciones en las que se realice, con respecto a las tomadas para la Medición del Trabajo.
- La precisión que tiene cada técnica de Medición del Trabajo, debido a sus características propias.
- La elección del banco de datos que mejor se adecue a la empresa, en el caso de utilizar como método de estimación los estándares predeterminados de tiempos o los datos normalizados.
- La representatividad de la muestra tomada para el cálculo del tiempo de una tarea, cuando se utiliza el estudio de tiempos o el muestreo de trabajo para su estimación.
- La utilización de una tasa media de llegada de los lotes, para realizar las operaciones que se ejecuten en el Centro de Trabajo al que llegan (en vez de su valor real), así como la estimación de su función de distribución, lo cual suele conllevar cierto grado de error.
- La aplicación de una tasa de salida media y de una función de distribución estimadas (o de su varianza en el caso de un solo canal), las cuales, como se reflejó en el Apartado 3.4.1.8., dependen de los tiempos de carga de los lotes que se procesan, que también son aleatorios.
- La exactitud de la estimación del tiempo de espera, ya sea a la entrada o a la salida de un Centro de Trabajo, la cual depende de las características reales del sistema de cola que se origina.
- En el caso de que se genere un tiempo de espera, una vez realizada una operación, es necesario haber estimado adecuadamente la función de distribución de la tasa de desplazamiento y el valor medio de ésta.
- La consideración del criterio de entrada en el Centro de Trabajo o de desplazamiento, ya que influirá sobre la probabilidad de que se genere tiempo de preparación y sobre los tiempos de espera.
- La variedad de operaciones que pueda realizar un Centro de Trabajo (flexibilidad de las rutas), ya que afecta al tiempo de preparación. Esto es debido a que existirán más productos que se puedan fabricar en un mismo Centro de Trabajo y, por tanto, más probabilidad de que cuando

llegue un lote, se esté realizando una operación distinta a la que necesita el lote recién llegado.

- El número de mantenciones necesarias para el traslado de los materiales e ítems, que depende del tamaño del lote. Como se utiliza un número medio de mantenciones, en el caso de que el lote tenga un tamaño distinto al valor medio, el tiempo de desplazamiento planificado podría variar con respecto al real.
- La adecuada estimación de los factores de eficiencia y utilización.
- El acercamiento a la realidad de los factores de aprovechamiento de cada una de las operaciones, lo cual está directamente relacionado con el tamaño de muestra utilizado para su estimación.

Una vez hemos realizado el estudio pormenorizado de los diferentes elementos que componen el tiempo de suministro, creemos llegado el momento de trasladar las características de aquéllos al cálculo de éste. Es decir, se trataría de desarrollar la expresión simplificada (3.1) del cálculo del tiempo de suministro planificado que apuntábamos al principio del capítulo (ver Apartado 3.2.), donde dicho tiempo se estimaba como la suma de los tiempos de confección, desplazamiento, cola, espera e inspección, originados por las operaciones que componen la ruta de fabricación en los distintos Centros de Trabajo. Todo ello para identificar todos y cada uno de los elementos que condicionan dicho tiempo de suministro (y por ende, el Plan de Carga generado por CRP), así como en qué medida le afectan, información que consideramos básica, no sólo para el estudio de CRP, sino además para obtener una información fundamental, de cara a la toma de decisiones encaminadas a ajustar la capacidad y carga planificadas y reales.

Sin embargo, para hacer frente a este objetivo, debemos realizar una serie de consideraciones, a las que nos referimos a continuación.

En primer lugar, debemos mencionar la similitud, conceptualmente hablando, entre el tiempo de preparación para el desplazamiento (tpd_{ijk}) y el tiempo de preparación de un Centro de Trabajo, lo que nos lleva a la necesidad de aplicarle un tratamiento análogo, en lo referente a su probabilidad de existencia. Es decir, si bien en las expresiones (3.8) y (3.9), para el cálculo de los tiempos de desplazamiento hemos considerado la necesidad de ajuste del elemento de transporte, ésta sólo se origina en el caso de que la operación acabada de realizar sea diferente a la que ha recibido el último ítem trasladado. Sin embargo, esta situación no se produce siempre, por lo que, para un cálculo más exacto del tiempo de desplazamiento, tomaremos en consideración la probabilidad de que sea necesario tiempo de preparación para el desplazamiento.

Será necesario pues, estudiar las tasas de llegada al sistema que se origina a la salida del Centro de Trabajo, las cuales, tal y como nos referimos en el estudio del tiempo de espera (ver Apartado 3.5.5.), se corresponden con las tasas de entrada de dicho Centro (λ_{ik}). Si partimos de la misma hipótesis utilizada en aquel caso y basándonos en la expresión (3.15), calcularemos la probabilidad de que sea necesario tiempo de preparación para el desplazamiento como:

$$P(tpd_{ijk} > 0) = 1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}}$$

Con las consideraciones anteriores, la expresión (3.8), para el cálculo del tiempo de desplazamiento de un ítem j al que se le acaba de realizar la operación i en el Centro de Trabajo k , será sustituida por:

$$\overline{Td_{Qijk}} = \overline{td_{ijk}} \times d_i \times \overline{m_{iQ_j}} + \overline{tpd_{ijk}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}}\right) \quad (3.25)$$

La probabilidad de que se incurra en tiempo de preparación para el desplazamiento de materiales, a diferencia del caso anterior, resulta más complicada de calcular, ya que necesitamos conocer las tasas de salida del almacén. No debemos perder de vista que partimos de la consideración de que será preciso ajustar el elemento de transporte cuando los materiales vayan destinados a la fabricación de ítems distintos.

Otra consideración a realizar, que afectará a la forma de indicar matemáticamente los sumatorios de los tiempos de cola y espera, está originada por la independencia de dichos tiempos con respecto a la operación y al ítem al que se le va a realizar. Para hacer frente a la problemática planteada bastará con hacer presente la existencia de dos conjuntos de datos: el formado por las operaciones que se realizan en el Centro de Trabajo k , al que llamamos Rk (ya definido en el estudio del tiempo de espera) y el conjunto Rj , que engloba las operaciones que componen la ruta del ítem j .

De esta manera, obtendremos que el sumatorio del tiempo de cola quedará, a partir de las expresiones (3.10) y (3.21), como:

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} &= \sum_{i \in Rj} \overline{Tcola_{ijk}} = \sum_{ijk \in Rj} \frac{\sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J (\overline{\lambda_{ik}} \times (\overline{Tc_{Qijk}})^2)}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J (\overline{\lambda_{ik}} \times \overline{Tc_{Qijk}}) \right]} = \\
&= \sum_{ijk \in Rj} \left[\overline{\lambda_{ik}} \times \frac{\left((\overline{te_i} \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right)^2}{\overline{E_k} \times \overline{U_k}} \right] \\
&= \sum_{ijk \in Rj} \frac{\left[\overline{\lambda_{ik}} \times \frac{\left((\overline{te_i} \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right)^2}{\overline{E_k} \times \overline{U_k}} \right]}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J \left[\overline{\lambda_{ik}} \times \frac{\left((\overline{te_i} \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right)}{\overline{E_k} \times \overline{U_k}} \right] \right]}
\end{aligned} \tag{3.26}$$

Por otro lado, tras las dos consideraciones indicadas, podemos reflejar el sumatorio de los tiempos de espera, calculado a partir de la expresión (3.22), en la que se ha sustituido el tiempo de desplazamiento por el indicado en la fórmula (3.25):

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tesp_{ijk}} &= \sum_{ijk \in Rj} \overline{Tesp_{ijk}} = \frac{\sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J (\overline{\lambda_{ik}} \times (\overline{Td_{Qijk}})^2)}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J (\overline{\lambda_{ik}} \times \overline{Td_{Qijk}}) \right]} = \\
&= \sum_{ijk \in Rj} \left\{ \frac{\sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J \left[\overline{\lambda_{ik}} \times \left((\overline{td_{ijk}} \times \overline{d_i} \times \overline{m_{iQ_j}} + \overline{tpd_{ijk}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right)^2 \right]}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J \left[\overline{\lambda_{ik}} \times \left((\overline{td_{ijk}} \times \overline{d_i} \times \overline{m_{iQ_j}} + \overline{tpd_{ijk}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right) \right] \right]} \right\}
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Una vez tomadas las consideraciones referidas, podemos desagregar la fórmula de cálculo del tiempo de suministro, tomando como hipótesis la distribución de todas las tasas de llegada y salida como una Poisson, un único servidor por Centro de Trabajo y criterio de entrada FCFS (sistema M/M/1). En concreto, expresaremos el tiempo de suministro medio de un lote emitido del ítem j , de tamaño Qe_j , en unidades reales, partiendo de la expresión (3.1) y sustituyendo los valores del tiempo de desplazamiento de materiales (3.9), tiempo de

desplazamiento entre Centros de Trabajo o hasta el almacén (3.25), tiempo de cola (3.26), tiempo de espera (3.27), tiempo de carga (3.21) y tiempo de inspección (3.24).

$$\begin{aligned}
TS_{Q_j} = & \overline{Tconf_j} + (\overline{tdm_j} \times d_m \times m_{mQ_j} + \overline{tpdm_j}) + \\
& + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \left[\overline{td_{ijk}} \times d_i \times \overline{m_{iQ_j}} + \overline{tpd_{ijk}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right] + \\
& + \sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J \left[\overline{\lambda_{ik}} \times \frac{\left((\overline{te_i} \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right)^2}{\overline{E_k} \times \overline{U_k}} \right] + \\
& + \sum_{ijk \in Rj} \left[\frac{\sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J \left[\overline{\lambda_{ik}} \times \frac{\left((\overline{te_i} \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right)^2}{\overline{E_k} \times \overline{U_k}} \right]}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J \left[\overline{\lambda_{ik}} \times \frac{\left((\overline{te_i} \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right)^2}{\overline{E_k} \times \overline{U_k}} \right] \right]} \right] + \\
& + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \left[(\overline{te_i} \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right] + \\
& + \sum_{ijk \in Rj} \left\{ \frac{\sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J \left[\overline{\lambda_{ik}} \times \left((\overline{td_{ijk}} \times d_i \times \overline{m_{iQ_j}} + \overline{tpd_{ijk}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right)^2 \right]}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in Rk} \sum_{j=1}^J \left[\overline{\lambda_{ik}} \times \left((\overline{td_{ijk}} \times d_i \times \overline{m_{iQ_j}} + \overline{tpd_{ijk}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right)^2 \right] \right]} \right\} + \\
& + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \left[\overline{tiu_{ijk}} \times f \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i} \right]
\end{aligned} \tag{3.28}$$

3.7. CONCLUSIONES: FUENTES DE ALEATORIEDAD DEL TIEMPO DE SUMINISTRO Y EL PLAN DE CARGA

La importancia de la adecuada estimación del tiempo de suministro en la Planificación de Capacidad, proviene de la relevancia de éste para la asignación en los distintos periodos de tiempo y de la carga originada por los lotes emitidos. Es

ineludible, por tanto, estudiar su aleatoriedad, para conocer el nivel de exactitud que puede llegar a tener el Plan de Carga elaborado.

Para tal fin se ha realizado un análisis descriptivo de los distintos elementos que lo componen, centrándonos en los orígenes de la aleatoriedad de cada uno de ellos. En concreto, se han estudiado los tiempos de: confección del pedido, desplazamiento, cola, carga, espera e inspección. El procedimiento seguido ha implicado tanto el desarrollo de sus fórmulas de cálculo, como un análisis de la influencia de distintos métodos de estimación del tiempo (técnicas de Medición del Trabajo y Teoría de Colas) sobre la bondad del resultado obtenido.

La cantidad de variables aleatorias cuyos valores están vinculados con el plazo de entrega, así como las relaciones entre éstas, se han reflejado mediante el desarrollo del procedimiento de cálculo del tiempo de suministro planificado medio de un ítem. Tal y como hemos visto, dicho tiempo depende de la función de distribución de las tasas de llegada y salida, de cada uno de los Centros de Trabajo que conforman la ruta, y de la disciplina de cola que se aplique, tanto a la entrada como a la salida de dichos Centros. A este respecto, en este trabajo se han considerado, la distribución de Poisson para las tasas de llegada y salida y FCFS como criterio de entrada en todos los Centros de Trabajo. Si bien, en la práctica de las empresas, no se suelen dar todos estos supuestos a la vez⁷⁹, con nuestro estudio se ha pretendido realizar un análisis de una situación simplificada para extender el resultado a casos más complejos.

Partiendo de las hipótesis mencionadas se ha desarrollado la expresión (3.26), donde, como nos propusimos, hemos identificado todos y cada uno de los elementos que condicionan dicho tiempo de suministro (y por ende, el plan de carga generado por CRP). En dicha expresión se observa que las variables y parámetros que afectan al cálculo del tiempo de suministro planificado medio son:

- El tiempo medio de confección del pedido ($\overline{Tconf_j}$).
- Las distancias desde los Centros de Trabajo (d_i), que son utilizados para la elaboración de un ítem, y el siguiente en su ruta o el almacén, en el caso de la operación final, así como entre la zona de almacenamiento de materiales y el primer Centro de la ruta (d_m).

⁷⁹ Por ejemplo, para los distintos Centros de Trabajo pueden tener diferentes disciplinas de cola, en función de la Regla de Secuenciación aplicada.

- Los tiempos de desplazamiento medios ya sea para la obtención de materiales ($\overline{td_{mj}}$) o para los traslados de los ítems ($\overline{td_{ijk}}$).
- El número de mantenimientos necesarios por cada desplazamiento de materiales (m_{mQ_j}) o el valor medio de movimientos que se precisan para el traslado de los ítems ($\overline{m_{iQ_j}}$), los cuales dependen del tamaño real del lote y, por tanto, de la reducción que sufre con motivo de las unidades defectuosas.
- El tiempo medio de ajuste del elemento de transporte, en el caso de que sea necesaria una preparación de éste en función del material o ítem a desplazar ($\overline{tpd_{mj}}$ y $\overline{tpd_{ijk}}$).
- Las tasas medias de llegada de todas las operaciones que se realizan en los Centros de Trabajo que son utilizados para la elaboración de un ítem ($\overline{\lambda_{ik}}$).
- El tiempo de ejecución medio de todas las operaciones que se realizan en cada uno de los Centros de Trabajo que conforman la ruta ($\overline{te_i}$).
- Promedio del tiempo de preparación para la ejecución de todas las operaciones que se ejecutan en todos los Centros de Trabajo por los que debe pasar el ítem para procesarse ($\overline{tp_{ik}}$).
- El tamaño medio de lote de todos los ítems que se procesan en cada uno de los Centros de Trabajo que es necesario utilizar para elaborar el artículo al que se le desea calcular el tiempo de suministro ($\overline{Q_j}$).
- El valor de los factores de eficiencia ($\overline{E_k}$) y utilización ($\overline{U_k}$) medios, aplicables a cada Centro de Trabajo incluido en la ruta.
- Los factores medios de aprovechamiento (a_i) de cada una de las operaciones que son necesarias para la elaboración del ítem (componentes de $\overline{v_i}$).

- El tiempo de inspección unitario medio del ítem en cada una de las fases del proceso productivo ($\overline{tiu_{ijk}}$), así como las etapas en las que se inspeccionará.
- El tamaño de muestra que se utilice para la inspección.

Como se ha podido observar, la mayoría de esta información proviene de la estimación del valor medio de distintas variables aleatorias, cada una con diferentes niveles de dispersión y riesgos de error; las cuales pueden afectar en distinta medida sobre el tiempo de suministro.

El desarrollo de la formulación expuesta, nos permite además observar cómo no todas las desviaciones de las variables aleatorias que influyen en el cálculo del tiempo de suministro afectan en la misma medida, información que considerábamos fundamental determinar, no sólo para el estudio de CRP, sino además para obtener una información fundamental, de cara a la toma de decisiones encaminadas a ajustar la capacidad y carga planificadas y reales.

Por supuesto, para poder estudiar su influencia exacta, habría que realizar un análisis de sensibilidad en función de cada caso. No obstante, del estudio realizado en este capítulo, podemos extraer el sentido general en que algunas variables afectan al cálculo del tiempo de suministro.

Además, según se observa en la expresión (3.26), existen parámetros sobre los que la empresa puede actuar, cuya alteración originaría variaciones en el plazo de entrega. Nos referimos a:

- Los cambios en las distancias entre Centros de Trabajo (d_i) y la ubicación de la zona de materiales (que incide sobre d_m), que la empresa puede alterar a través de una adecuada distribución en planta, e inciden directamente sobre los tiempos de desplazamiento y espera.
- Las variaciones en la frecuencia de inspección y el tamaño de muestra que se utilizará para este análisis (dependiente de f), que están relacionadas con la política de calidad que mantenga la compañía y que afectan al tiempo de inspección.

Los cambios en las variables determinantes del tiempo de suministro provocarán variaciones en éste. Sin embargo, mientras que las alteraciones en algunas de ellas tan sólo afectan a uno de los distintos tiempos que componen el tiempo de suministro, otras pueden originar una alteración más que proporcional; es decir, tienen un efecto multiplicador.

Entre las primeras que tan sólo tienen un efecto directo sobre el tiempo de suministro, estarían:

- El tiempo de confección del pedido.
- Los componentes del tiempo de desplazamiento de materiales para un lote: tiempo de desplazamiento unitario de materiales, manutenciones necesarias y tiempo de preparación de los equipos para el traslado de los materiales.
- El tiempo de inspección unitario.

Obviamente, la relevancia de cara a la toma de decisiones en la Gestión de la Capacidad de las variables con efecto multiplicador, es bastante mayor debido a que las decisiones que les afectan pueden provocar mayores ajustes en el tiempo de suministro, tanto para reducirlo, como para controlarlo cuando existan indicios de crecimiento de éste. Este es el caso del tiempo de ejecución de las operaciones, tiempo de preparación, tamaño de lote medio, factores de aprovechamiento de las operaciones, tasas de llegada de los lotes, factores eficiencia y utilización, tiempo de desplazamiento unitario, manutenciones necesarias para el traslado y tiempo de preparación de los envíos.

Por supuesto, el efecto que provocan es diferente para unas que para otras. De hecho, podemos agrupar las variables con efecto multiplicador de acuerdo a la incidencia que tienen sus cambios sobre los tiempos básicos que componen el tiempo de suministro, obteniendo los siguientes grupos:

- **Variables que afectan de forma directa al tiempo de carga y tiempo de cola y, de forma inversa al tiempo de espera.** El tiempo de ejecución unitario y tiempo de preparación de cualquiera de los ítems que comparten Centro de Trabajo, y los factores eficiencia y utilización de tales Centros, tal y como se puede apreciar en la expresión (3.28), provocan efectos sobre el tiempo de carga en el mismo sentido de su variación. Así, la disminución de los valores de esas variables originan una reducción del tiempo de carga de cualquier ítem que se ejecute en alguno de los Centros de Trabajo donde se procesa el artículo j , al que se le desea calcular el tiempo de suministro, lo que generará un menor valor del sumatorio de los tiempos de carga y, por tanto, reducirá el tiempo de cola. Sin embargo, al aumentar la tasa de salida del Centro de Trabajo, se puede provocar un incremento en el tiempo de espera,

puesto que aumentará la cola para el desplazamiento. Si la disminución de la carga del ítem j , objeto de estudio, se ha producido individual o conjuntamente, con reducciones del tiempo de carga de otros ítems con Centros comunes, habrá que tener en cuenta, además, el descenso en el valor del tiempo de suministro proveniente del menor tiempo de carga del ítem.

- **Variables que afectan de forma directa al tiempo de espera y de desplazamiento del lote.** El tiempo de desplazamiento unitario, el número de mantenciones necesarias para el traslado entre Centros de Trabajo y el tiempo de preparación de los envíos, tal y como se puede apreciar en la expresión (3.28), provocan efectos sobre el tiempo de desplazamiento del lote en el mismo sentido de su variación. Una alteración en cualquiera de estas variables provoca un cambio en el tiempo de desplazamiento del lote, pudiéndose observar que esto afecta no sólo al traslado, sino también a la espera a la salida del Centro. Así, con una reducción de este tiempo, conseguiríamos disminuir el valor del plazo de entrega por una doble vía. Para ello se podría incidir en: el tiempo de desplazamiento por unidad de distancia, a través de una mejora de los métodos o simplemente un cambio en el elemento de transporte; menor número de mantenciones necesarias por lote, mediante un cambio en el volumen de unidades que se pueden trasladar en cada desplazamiento (originado, principalmente, por ajustes en el elemento de transporte o con la reducción del tamaño de los lotes); o la reducción del tiempo de preparación para el desplazamiento, a través de cambios en los métodos de ajuste o en la disciplina de cola.
- **Variables que afectan de forma directa al tiempo de cola y de forma inversa al tiempo de carga.** La relevancia del grado de exactitud de las tasas de llegada se debe a que incide en el tiempo de suministro planificado por una doble vía: a través del tiempo de cola y mediante el efecto de todos los tiempos de carga que son utilizados para su cálculo. Así, un aumento de la tasa de llegada de un ítem (*ceteris paribus*) reduce la probabilidad de que se origine tiempo de preparación y, por tanto provoca la disminución del tiempo de carga. Sin embargo, el tiempo de cola, en general, se verá incrementado por el mayor número de unidades que tendrán que esperar para ser procesadas. Lógicamente, el efecto final sobre el plazo de entrega dependerá del valor del resto de variables utilizadas para el cálculo de los tiempos de carga y cola. En este sentido, los ritmos de llegada a los distintos Centros de Trabajo se

pueden alterar por la variación en el mix de productos de la empresa o la proporción de productos que se fabrican sobre el total. Así, por ejemplo, un aumento de la cantidad de un ítem j , con respecto al resto de artículos fabricados por la empresa, provocará la reducción, no sólo del tiempo de suministro, sino también del tiempo de carga y de desplazamiento (mediante la menor necesidad de tiempo de preparación de los Centros de Trabajo y de los elementos de transporte). Por otro lado, un aumento en las tasas de llegada del resto de los ítems que comparten el Centro de Trabajo provocará que la proporción de los ritmos de llegada se altere (λ_{ik}/λ_k), resultando el mismo efecto que una reducción en la tasa del ítem al que se le está calculando el tiempo de suministro.

- **Variables que afectan de forma directa al tiempo de carga, de cola, de espera, de desplazamiento e inspección.** Entre ellas estarían:
 - El factor de defectuosas. La variación que se produzca en la estimación del factor de defectuosas de las operaciones afecta al tamaño de lote que se procese. En este sentido, cuanto mayor número de unidades defectuosas tenga un lote, será necesario realizar más veces una operación para conseguir una unidad sin defectos y será necesario trasladar e inspeccionar más ítems durante el proceso productivo. Por este motivo, las mejoras en las máquinas o en los procesos de fabricación, que logren reducciones del factor de defectuosas, originarían una reducción del tiempo de carga (con efecto sobre el tiempo de cola), del tiempo de desplazamiento de los ítems (si el mayor tamaño de lote en proceso genera una disminución del número de manutenções, lo cual incidiría en el tiempo de espera) y del tiempo de inspección de los lotes. En el caso que la mejora del factor aprovechamiento se produzca en la ruta de fabricación de algún ítem que tiene Centros de Trabajo comunes con el producto al que se le calcula el tiempo de suministro, la reducción del tiempo de carga del primero generará una disminución de la cola de espera del Centro común.
 - El tamaño de lote medio de cualquiera de los ítems que comparten un Centro de Trabajo. Las variaciones de los tamaños medios de lote de cualquiera de los ítems que tienen algún Centro de Trabajo en común con el artículo j (utilizados para los cálculos del tiempo $\overline{Tc_{Qijk}}$, en el tiempo de cola), pueden aumentar o reducir el tiempo

de suministro real, en función de los valores del resto de variables que componen el tiempo de cola y espera y, además, podrían incidir sobre el tiempo de desplazamiento de los ítems en el caso de que la variación en el tamaño de los lotes originase alteraciones en el número de mantenuciones necesarias para su traslado.

A modo de resumen, la Tabla 3.4. presenta el efecto que tiene un aumento de valor en las variables y parámetros de los que depende el tiempo de suministro, observándose el sentido en el que producen las alteraciones en los tiempos básicos que afectan al plazo de entrega⁸⁰.

También se puede deducir del análisis realizado en los apartados anteriores, que para realizar una adecuada estimación del tiempo de suministro, no sólo es necesario manejar gran cantidad de información referente al ítem que se desea estudiar, sino también sobre otros artículos de la empresa, de ahí el alto riesgo de incumplimiento de la estimación del tiempo de suministro planificado. En concreto, esta vinculación se observa ante la necesidad de conocer las tasas de llegada, los tiempos de carga (tamaño lote, tiempos de ejecución, tiempo de preparación y factor de defectuosas) y desplazamiento (tiempo desplazamiento unitario, distancias, mantenuciones y tiempo de preparación para el desplazamiento) medios de todos los ítems con los que tiene algún Centro de Trabajo en común. No sería acertado, por tanto, calcular los tiempos de suministro de los distintos artículos por separado o de forma independiente.

Los cambios en el valor de las variables que influyen en el resultado final del tiempo de suministro, pueden ser originados por una falta de exactitud de las estimaciones o por la aleatoriedad de las propias variables. Sin embargo, existen otros casos en los que los cambios son previsibles, ya sea porque tienen origen en variaciones en el volumen o características de la demanda, o bien porque pueden ser más o menos controlables por la empresa. Así, en la Tabla 3.5., se ofrecen los efectos que producirían cambios en la demanda o en algunas políticas de la empresa, sobre los parámetros y variables que inciden en el tiempo de suministro, indicando qué variable de tiempo se ve afectada, pudiéndose observar el efecto más que proporcional de determinadas decisiones sobre el valor del tiempo de suministro.

⁸⁰ Nos referimos a las variables tiempo básicas que componen el tiempo de suministro, es decir, los tiempos de confección de pedido, desplazamiento de materiales, desplazamiento de los ítems, cola, carga, espera e inspección.

Aumento del parámetro o variable		Variable tiempo
Tiempo de confección (T_{conf_i})		Δ Tiempo de confección
Distancias entre zona de almacenaje y primer Centro de Trabajo (d_m)		Δ Tiempo de desplazamiento de materiales
Tiempo de desplazamiento unitario de los materiales (td_{mi})		
Número de mantenencias de los materiales (m_{mOi})		
Tiempo de preparación para el desplazamiento de los materiales (tpd_{mi})		
Distancias entre Centros de Trabajo (d_i)		Δ Tiempo de desplazamiento Δ Tiempo de espera
Tiempo de desplazamiento unitario de los ítems (td_{ijk})		
Número de mantenencias de los ítems (m_{iOi})		
Tiempo de preparación para el desplazamiento de los ítems (tpd_{ijk})		
Proporción de las tasas de llegada (λ_{ik}/λ_k)		∇ Tiempo de carga ∇ Tiempo de cola ∇ Tiempo de desplazamiento ∇ Tiempo de espera
Tiempo de ejecución (te_i)	Del ítem al que se le calcula el tiempo de suministro	Δ Tiempo de carga Δ Tiempo de cola
Tiempo de preparación de un lote (tp_{ik})		
Tiempo de ejecución (te_i)	De otros ítems con los que comparte Centro de Trabajo	Δ Tiempo de cola
Tiempo de preparación de un lote (tp_{ik})		
Eficiencia (E_k)		∇ Tiempo de cola
Utilización (U_k)		
Tamaño del lote medio ($\overline{Q_j}$) de cualquier ítem que comparta Centro de Trabajo		Δ Tiempo de cola Δ Tiempo de espera Δ Tiempo de desplazamiento
Factor de aprovechamiento (a_{ijk})	Del ítem al que se le calcula el tiempo de suministro	∇ Tiempo de carga ∇ Tiempo de cola ∇ Tiempo de inspección ∇ Tiempo de espera ∇ Tiempo de desplazamiento
	De otros ítems con los que comparte Centro de Trabajo	∇ Tiempo de cola
Tiempo de inspección unitario (tiu_{ijk})		Δ Tiempo de inspección
Fracción de análisis de la muestra (f)		

Tabla 3.4. Posibles efectos del aumento de valor de los parámetros y variables aleatorias sobre los tiempos que componen el tiempo de suministro.
Fuente: elaboración propia.

Cambios	Parámetro o variable	Variable tiempo
Mix de productos	- Tasas de llegada (λ_{ik})	- Carga - Cola - Desplazamiento - Espera
Volumen de demanda de los ítems	- Tamaño de lote medio ($\bar{Q}_j$) - Número de mantenencias entre Centros de Trabajo (m_{iOj})	- Cola - Desplazamiento - Espera
Distribución en planta	- Distancias entre Centros de Trabajo (d_i)	- Desplazamiento - Espera
Equipos y procesos de producción	- Tiempo de ejecución (te_i) - Factor de aprovechamiento (a_{ijk}) - Tiempo de preparación de un lote (tp_{ik})	- Carga - Cola - Inspección - Espera - Desplazamiento
Capacidad de los equipos utilizados para el traslado de los ítems	- N° de mantenencias para el traslado de los ítems (m_{iOj})	- Desplazamiento - Espera
Formación y efecto aprendizaje	- Eficiencia (E_k) - Tiempo de ejecución (te_i) - Tiempo de preparación de un lote (tp_{ik})	- Cola - Carga
Productividad	- Utilización (U_k) - Tiempo de ejecución (te_i) - Tiempo de preparación de un lote (tp_{ik})	- Cola - Carga
Equipos de desplazamiento de ítems	- Tiempo de desplaz. unit. de ítems (td_{ijk}) - N° de mantenencias de los ítems (m_{iOj})	- Desplazamiento - Espera
Disciplina de cola en entrada y salida de los Centros de Trabajo	- Tiempo de preparación de un lote (tp_{ik}) - Tiempo de preparación para el desplazamiento de los ítems (tpd_{ijk})	- Carga - Desplazamiento - Espera
Procedimiento para la inspección de los ítems	- Tiempo de inspección unitario (tiu_{ijk})	- Inspección
Política de mantenimiento de maquinaria	- Tiempo de ejecución (te_i) - Factor de aprovechamiento (a_{ijk}) - Tiempo de preparación de un lote (tp_{ik})	- Carga - Cola - Inspección - Desplazamiento - Espera
Procedimiento de confección de pedido	- Tiempo de confección ($Tconf_j$)	- Confección
Gestión de almacenes	- Tiempo de desplazamiento de materiales (td_{ijk})	- Desplazamiento de materiales
Capacidad de los equipos de traslado de materiales	- N° de mantenencias para el traslado de los materiales (m_{mOj})	- Desplazamiento de los materiales

Tabla 3.5. Posibles relaciones entre algunos orígenes de cambios en las variables y parámetros que inciden en el tiempo de suministro.
Fuente: elaboración propia.

La gran cantidad de datos necesarios para el cálculo del tiempo de suministro, así como la variabilidad de éstos, influenciada por las características del entorno, nos lleva a pensar que la probabilidad de cumplimiento del valor calculado será muy baja, ya que, si bien pueden producirse variaciones simultáneas de distinto signo, originadas por diferentes variables, no será habitual que se compensen totalmente. Por este motivo, en el capítulo siguiente profundizaremos en el estudio de la probabilidad de cumplimiento del tiempo de suministro, incidiendo en la influencia de éste sobre la exactitud del Plan de Carga elaborado mediante CRP.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ACKOFF, R. y SASIENI, M. (1971), *Fundamentos de Investigación de Operaciones*, Limusa-Wiley, Mexico.
- ADAM, E.E. y EBERT, R.J. (1991), *Administración de la Producción y las Operaciones. Conceptos, modelos y funcionamiento*, Prentice-Hall, Naupalcan de Juárez, Mexico.
- AGLIARI, A., DILIGENTI, M. y ZAVANELLA, L. (1995), "Variable priority dispatching rules: an analytical approach", *International Journal of Production Economics*. Vol. 41, No. 1, pp. 51-58.
- AGUARÓN JOVEN, J., CALVETE FERNÁNDEZ, H., LASALA CALLEJA, P., MORENO JIMÉNEZ, J. M. y PLO ALUSTUÉ, F. (1993), *Simulación*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza.
- ALFORD, L.P., BANGS, J.R. y HAGEMANN, G.E. (1969), *Manual de la Producción*, Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, Barcelona.
- ALIDAEI, B. y RAMAKRISHNAN, K. (1996), "A computational experiment of COVERT-AU class of rules for single machine tardiness scheduling problem", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 201-209.
- BARNES, R. M. (1980), *Motion and Time Study Design and Measurement of Work*, John Wiley & Sons, New York.
- BENJAAFAR, S. y SHEIKHZADEH, M. (1996), "Relationships between batch sizes, scheduling policies, and lead times in manufacturing systems", *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minnesota, pp. 2787-2791.
- BICHENO, J. y ELLIOT, B. (1997), *Operations Management*, Blackwell, Malden, Massachusetts.
- BLACKSTONE, J. H., JR (1989), *Capacity Management*, South-Western Publishing, Cincinnati.

- BOCK, D.B. y PATTERSON, J.H. (1990), "A Comparison of Due Date Setting, Resource Assignment and Job Preemption Heuristics for the Multiproject Scheduling Problem", *Decision Sciences*, Vol. 21, No. 2, pp. 387-402.
- BURCHER, P. G. (1992), "Effective Capacity Planning", *Management Services*, Vol. 36, No. 10, pp. 22-25.
- CAFFREY, J. y HITCHINGS, G. (1995), "Makespan distribution in flow shop scheduling", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 3, pp. 50-58.
- CAO ABAD, R. (2002), *Introducción a la Simulación y a la Teoría de Colas*, Netbiblo, La Coruña.
- CHASE, R. B., AQUILANO, N. J. y JACOBS, F. R. (2001), *Operations Management for Competitive Advantage*, McGraw-Hill/Irwin, New York.
- DE LA FUENTE GARCÍA, D. y PINO DÍEZ, R. (2001), *Teoría de Líneas de Espera. Modelos de colas*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo.
- DESSOUKY, Y.M., BEAUMARIAGE, T.G., ROBERTS, C.A. y MICHAEL, K. (1993), "An intelligent system for batch scheduling for the process industry", *Computers in Industry*, Vol. 22, No. 3, pp. 233-247.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A. y otros (1995a), *Dirección de Operaciones. Aspectos estratégicos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A. y otros (1995b), *Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A., DURBÁN OLIVA, S. y MARTÍN ARMARIO, E. (1990), *El Subsistema Productivo de la Empresa*, Pirámide, Madrid.
- EPPEN, G.D. y otros (2000), *Investigación de Operaciones en la ciencia administrativa*, Pearson, México.
- ESCUDERO, L. F. (1972), *Aplicaciones de la Teoría de las Colas*, Deusto, Bilbao.
- FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, E. y VAZQUEZ ORDAS, C.J. (1994), *Dirección de la Producción. II. Métodos Operativos*, Civitas, Madrid.
- FOGARTY, D. W., BLACKSTONE, J. H. JR y HOFFMANN, T. R. (1991), *Production & Inventory Management*, APICS, Cincinnati.
- FRAXANET DE SIMÓN, M (1990), *Organización y Gestión de la Producción*, CDN Ciencias de la Dirección, Madrid.
- GARCÍA GONZÁLEZ, S, RABADÁN MARTÍN, I. y GESSA PERERA, A. (2003), "El efecto de la regla de secuenciación sobre el tiempo de carga de las instalaciones en configuraciones por lotes", *Papers Proceedings 2003, AEDEM XIII Congreso Hispano-Francés*, Bordeaux, Francia, pp. 85-95
- GARCÍA GONZÁLEZ, S. y GARCÍA GRAGERA, J. A. (1996), "Medición de la capacidad en configuraciones productivas por funciones: los tiempos de carga unitarios", *Alta Dirección*, No. 186 y 187, pp. 111-120 y 201-209.

- GIBSON, P., GREENHALGH, G. y KERR, R. (1995), *Manufacturing Management. Principles and concepts*, Chapman & Hall, Cornwall.
- HASKOSE, A., KINGSMAN, B. G. y WORTHINGTON, D. (2002), "Modelling flow and jobbing shops as a queueing network for workload control", *International Journal of Production and Economics*, Vol. 78, No. 3, pp. 271-287.
- HEIZER, J. y RENDER, B. (2001), *Dirección de la Producción. Decisiones Tácticas*, Prentice-Hall, Madrid.
- HILL, T. (1991), *Production/Operations Management. Text and Cases*, Prentice Hall, New York.
- HILLIER, F.S. y LIEBERMAN, G.J. (1999), *Introducción a la Investigación de Operaciones*, McGraw-Hill, México D.F.
- HOPP, W.J., SPEARMAN, M.L. y WOODRUFF, D.L. (1990), "Practical Strategies for lead time reduction", *Manufacturing Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 78-84.
- HUNSUCKER, J.L. y SHAH, J.R. (1994), "Comparative performance of priority rules in a constrained flow shop with multiple processors environment", *European Journal of Operational Research*, Vol. 72, No. 1, pp. 102-114.
- INVES, P. y LAMBRECHT, M. (1996), "Extending the shifting bottleneck procedure to real-life applications", *European Journal of Operational Research*, Vol. 90, No. 2, pp. 252-268.
- JENSEN, J.B., PHILIPOOM, P.R. y MALHOTRA, M.K. (1995), "Evaluation of scheduling rules with commensurate customer priorities in job shops", *Journal of Operations Management*, Vol. 13, No. 3, pp. 213-228.
- JONSSON, P. y MATTSSON, S. (2002), "Use and applicability of capacity planning methods", *Production and Inventory Management*, Vol. 43, No. 3/4, pp. 89-95.
- KAUFMANN, A. (1974), *Métodos y Modelos de la Investigación de Operaciones*, Compañía Editorial Continental, Calz. De Tlalpan, Mexico.
- KHOSLA, I. (1995), "The scheduling problem where multiple machines compete for a common local buffer", *European Journal of Operational Research*, Vol. 84, No. 2, pp. 330-342.
- KUIK, R. y TIELEMANS, P. (1999), "Lead-time variability in a homogeneous queueing model of batching", *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, No. 1-3, pp. 435-441.
- LANDVATER D. V. (1993), *World Class Production and Inventory Management*, Oliver Wight, Vermont.
- LEE, Y.H. y PINEDO, M. (1997), "Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times", *European Journal of Operational Research*, Vol. 100, No. 3, pp. 464-474.
- LITTLE, J.D.C. (1961), "A proof of the queueing formula $L = A W$ ", *Operations Research*, Vol. 9, pp. 383-389.

- LUNN, T. y NEFF, S. A. (1992), *MRP Integrating Material Requirements Planning And Modern Business*, Irwin, New York.
- MARKLAND, R., VICKERY, S. y DAVIS, R. (1995), *Operations Management. Concepts in Manufacturing and Services*, West Publishing, St. Paul, Massachusets.
- MARTÍNEZ, R. (1984), *Cómo rentabilizar la producción*, Ediciones Deusto, Bilbao.
- MELNYK, S.A., SHAWNEE, K y CARTER, P.L. (1986), "Scheduling, Sequencing and Dispatching: Alternative Perspectives", *Production and Inventory Management*, Vol. 27, No. 2, pp. 58-6
- MISSBAUER, H. (1997), "Order release and sequence-dependent setup times", *International Journal of Production Economics*, Vol. 49, No. 2, pp. 131-143.
- NARASIMHAN, MCLEAVEY, D. W. y BILLINGTON, P. J. (1996), *Planeación de la Producción y Control de Inventarios*, Prentice Hall, Naupalcan de Juárez, Mexico.
- NIEBEL, B.W (1996), *Ingeniería Industrial. Métodos, Tiempos y Movimientos*, Alfaomega, México.
- ODEN, H. W., LANGENWALTER, G. A. y LUCIER, R. A. (1993), *Handbook of Material & Capacity Requirements Planning*, McGraw-Hill, New York.
- OIT (1971), *Introducción al Estudio del Trabajo*, OIT, Ginebra.
- PARK, M.W. y KIM, Y.D. (1999), "A heuristic algorithm for a production planning problem in an assembly system", *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 50, No. 2, pp. 138-147.
- PAZOS ARIAS, J. J., SUÁREZ GONZÁLEZ, A. y DÍAZ REDONDO, R. P. (2003), *Teoría de Colas y Simulación de Eventos Discretos*, Prentice-Hall, Madrid.
- PETRONI, A. y RIZZI, A. (2002), "A fuzzy logic based methodology to rank shop floor dispatching rules", Vol. 76, No. 1, pp. 99-108.
- PLENERT, G. (1999), "Focusing material requirements planning (MRP) towards performance", *European Journal of Operations Research*, Vol. 119, pp. 91-99.
- PLOSSL, G. W. (1988), "Throughput time control", *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 493-499.
- PLOSSL, G. W. (1995), *Orlicky's Material Requirements Planning*, McGraw-Hill, New York.
- PROKOPENKO, J (1989), *La Gestión de la Productividad, Manual Práctico*, Oficina Internacional del Trabajo, Ginebra.
- RODRÍGUEZ HUERTAS, R. y GÁMEZ MELLADO, A. (2002), *Investigación Operativa. Teoría, ejercicios y prácticas con ordenador*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, Cádiz.
- RUÍZ RECIO, R. (1991), *Cómo calcular los tiempos de trabajo*, Deusto, Bilbao.

- SARABIA VIEJO, A. (1996), *La Investigación Operativa*, Publicaciones de la Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- SCHROEDER, R. G. (2000), *Operations Management, Contemporary Concepts*, McGraw-Hill/Irwin, New York.
- SELLADURAI, V. y otros (1995), "Dynamic simulation of job shop scheduling for optimal performance", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 7, pp. 106-120.
- STEVENSON, W. J. (2002), *Operations Management*, McGraw-Hill/Irwin, New York.
- VALLHONRAT, J. M. y COROMIAS, A. (1991), *Localización, Distribución en Planta y Manutención*, Marcombo, Barcelona.
- VERAL, E. A. y MOHAN, R. P. (1999), "A two-phased approach to setting due-dates in single machine job shops", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 36, No. 1, pp. 201-218.
- VOLGENANT, A. y TEERHUIS, E. (1999), "Improved heuristics for the n-job single-machine weighted tardiness problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 26, No. 1, pp. 35-44.
- VOLLMANN, T. E., BERRY, W. L. y WHYBARK, D. C. (1995), *Sistemas de Planificación y Control de Producción*, Irwin, Mexico.
- WEBSTER, S. T. (1993), "A priority rule for minimizing weighted flow time in a class of parallel machine scheduling problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 70, No. 3, pp. 327-334.
- WEMMERLÖV, U. (1984), *Capacity Management Techniques*, APICS, Falls Church, VA.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- AQUILANO, N., CHASE, R. y DAVIS, M. (1995), *Fundamentals of Operations Management*, Irwin, Homewood, Illinois.
- BELT, B. (1976), "Integrating Capacity Planning and Capacity Control", *Production and Inventory Management*, Vol. 17, No. 1, pp. 9-25.
- BERRY, W. L., SCHMITT, T. G. y VOLLMANN, T. E. (1982), "Capacity Planning Techniques for Manufacturing Control Systems: Information Requirements and Operational Features", *Journal of Operations Management*, Vol. 3, No. 1, pp. 13-25.
- BROWNE, J., HARHEN, J. y SHIVNAN, J. (1988), *Production Management Systems, A CIM Perspective*. Addison Wesley. England.
- BURMAN, R. (1995), *Manufacturing Management: Principles and System*, McGraw-Hill, New York.

- CLASSEN, R. J. y MALSTROM, E. M. (1982), "Effective Capacity Planning for Automated Factories Requires Workable Simulation Tools and Responsive Shop Floor Controls", *Industrial Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 73-77.
- CORRELL, J. G. y EDSON, N. W. (1999), *Gaining Control: Capacity Management and Scheduling*, John Wiley & Sons, New York.
- DÍAZ, A. (1994), *Producción: gestión control*. Ariel. Madrid.
- DILWORTH, J.B. (1993), *Production and Operations Management. Manufacturing and Service*, McGraw Hill, New York.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A. y GARCÍA GONZÁLEZ, S. (1991), "Del MRP al MRP II: evolución, descripción y precisión conceptual", *Alta Dirección*, No. 155. pp. 13 -20.
- DUPON, A., VAN NIEUWENHUYSE, I. y VANDAELE, N. (2002), "The impact of sequence changes on product lead time", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, pp. 327-333.
- EVANS, J. R. (1997), *Production/Operations Management. Quality, Performance and Value*, West Publishing Co. New York.
- GARAVELLI, A. C. (2001), "Performance analysis of a batch production system with limited flexibility", *International Journal of Production Economics*, Vol. 69, No. 1, pp. 39-48.
- GREENE. J. H. (1997), *Production And Inventory Control Handbook*, McGraw-Hill, New York.
- GRUBBSTROM, R. W. y TANG, O. (2000), "An Overview of Input-Output Analysis Applied to Production-Inventory Systems", *Economic Systems Research*, Vol. 12, No. 1, pp. 3-26.
- HASKOSE, A., KINGSMAN, B. G. y WORTHINGTON, D. (2002), "Modelling flow and jobbing shops as a queueing network for workload control", *International Journal of Production and Economics*, Vol. 78, No. 3, pp. 271-287.
- MELNYK, S. A. y DENZLER, D. R. (1996), *Operations Management*, Irwin, New York.
- MEREDITH, J.R. (1992), *The Management of Operations: a conceptual emphasis*. John Wiley and Sons.
- MONKS, J.G. (1988), *Administración de Operaciones*. McGraw-Hill. Madrid.
- NAYLOR, J. (1999), *Operations Management*, Pitman Publishing, Glasgow.
- NOORI, H. y RADFORD, R. (1997), *Administración de Operaciones y Producción*, McGraw-Hill, Santafé de Bogotá.
- ORLICKY, J. (1975), *Material Requirements Planning*, McGraw Hill.
- PLOSSL, G. y WIGHT, O. W. (1973), Capacity Planning and Control, *Production and Inventory Management*, Vol. 14, No. 3, pp. 31-68.
- PLOSSL, G.W. (1983), *Production and Inventory Control Applications*, George Plossl Educational Services. Atlanta. Georgia.
- PTAK, C. A. (1997), *MRP and Beyond*, McGraw-Hill, New York.

-
- RUSSELL, R.S. y TAYLOR, B.W. (1995), *Production and Operations Management. Focusing on Quality and Competitiveness*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- SCHMITT, T. G., BERRY, W. L. y VOLLMANN, T. E. (1984), "An Analysis of Capacity Planning Procedures for a Material Requirements Planning System", *Decision Sciences*, Vol. 15, No. 4, pp. 522-541.
- SCOTT, B. (1994), *Manufacturing Planning System*, McGraw-Hill, Berkshire.
- TOOMEY, J. W. (1996), *MRP II Planning for Manufacturing Excellence*, Chapman & Hall, New York.
- VONDEREMBSE, M. A. y WHITE, G. P. (1996), *Operations Management*, West Publishing, St. Paul, Minneapolis.
- WATERS, D. (1996), *Operations Management. Producing Goods & Service*, Addison-Wesley Publishing Co, New York.
- WEMMERLÖV, U. (1980), "A Note on Capacity Planning", *Production and Inventory Management*, Vol. 21, No. 3, pp. 85-89.
- WIGHT, O. W. (1981), *MRP II, Unlocking America's Productivity Potential*, CBI Publishing, Mass.
- WILLIAMS, B. R. (1995), *Manufacturing for Survival*, Addison-Wesley Publishing, Massachusetts.

CAPÍTULO

4

EFICIENCIA DE LOS PLANES ELABORADOS MEDIANTE LA TÉCNICA CRP

4.1. INTRODUCCIÓN

Como ya comentamos en los capítulos anteriores (ver Apartados 1.1. y 2.4.7.), uno de los aspectos que más puede incidir en que CRP no haya adquirido la difusión práctica esperada, puede estar en la eficiencia del Plan de Carga que desarrolla; es decir, en la existencia de importantes desviaciones entre las cargas que determina para cada uno de los periodos del horizonte de planificación y las que realmente se producen, obviamente, en ambos casos para el mismo Plan de Materiales. Como ya comentamos, es el tiempo de suministro el período durante el que se distribuye la carga calculada por CRP para un lote y, como concluíamos en el Capítulo 3 (tras haber formulado la determinación del tiempo de suministro planificado en configuraciones por lotes en entornos aleatorios), debido a la gran cantidad de datos necesarios para el cálculo de dicho tiempo (y por tanto, para la distribución de la carga en CRP), así como a la variabilidad (por la aleatoriedad) de éstos, se hace harto difícil que la probabilidad de cumplimiento del valor calculado sea muy alta. Por ello resulta necesario profundizar en este capítulo en el estudio de la probabilidad de cumplimiento del tiempo de suministro (y por ende, de la distribución de la carga en el tiempo que realiza CRP), incidiendo en la influencia de éste sobre la exactitud del Plan de Carga elaborado mediante CRP.

Comencemos precisando que las desviaciones entre la planificación de la capacidad realizada mediante la técnica CRP y la realidad, pueden derivarse de variaciones en el Plan de Carga o de cambios en el Plan de Capacidad elaborado. En relación al primer motivo, dichas diferencias provienen de dos fuentes de variación: las relativas al periodo en el que se asigna la carga y las que afectan al montante de ésta. Por otro lado, los cambios en el Plan de Capacidad sólo proceden de variaciones de la capacidad disponible.

Para poner de manifiesto la aleatoriedad de los Planes elaborados mediante CRP, procederemos al estudio analítico e individualizado de sus probabilidades de cumplimiento para, posteriormente, analizar el nivel de fiabilidad de la planificación elaborada, considerando el cumplimiento simultáneo de los Planes de Carga y Capacidad.

4.2. LAS DESVIACIONES DEL PLAN DE CARGA

El hecho de que el Plan de Carga calculado se cumpla, depende tanto del establecimiento acertado del valor de las cargas generadas en cada Centro de Trabajo por las operaciones que hay que realizar a cada lote del Plan de Materiales, como de si éstas han sido adecuadamente asignadas a los momentos concretos en que han de producirse.

En este sentido, vamos a realizar una aproximación a los orígenes de las desviaciones provocadas en el cálculo del Plan de Carga, elaborado con CRP, estudiando por separado las dos posibles causas:

- De un lado, las diferencias originadas en el valor del tiempo de carga de un lote.
- De otro, la asignación de los tiempos de carga (una vez estimados correctamente), a momentos de tiempo diferentes a aquéllos en los que debería producirse realmente dicha carga, debido a variaciones en el resto de los elementos que componen el tiempo de suministro.

La elaboración del Plan de Carga, tal y como ya se explicó en el Apartado 2.4.3.1., se inicia con el cálculo de la capacidad necesaria para el procesamiento de cada uno de los lotes (emitidos y en proceso), diferenciando el Centro de Trabajo en el que se originarán. A continuación, se procede a la asignación de las cargas a los periodos de tiempo en el que se producirán, para cuyo conocimiento se tomará la información que nos ofrece el tiempo de suministro. Por consiguiente, tal y

como hemos referido anteriormente, las desviaciones entre la planificación de la capacidad elaborada mediante la técnica CRP y la realidad, provienen de dos fuentes: desajustes relativos al período en el que se asigna la carga y variaciones en el montante de ésta.

Si bien el Plan de Carga incluye la capacidad necesaria para la terminación de los lotes que se encuentran en proceso, dada la amplia variedad de situaciones que se pueden originar con respecto a éstos, centraremos nuestro estudio de la probabilidad en los lotes emitidos, incluidos en el Plan de Materiales. Teniendo en cuenta que la proporción de ítems en proceso sobre el total de lotes que se gestionan normalmente, en el horizonte de planificación utilizado en CRP, suele ser pequeña, la no consideración de éstos en nuestro análisis no originará grandes diferencias en la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga, provocando, en su caso, una menor fiabilidad de éste (debido a la inclusión de más variables aleatorias).

Para nuestro estudio, se considerará que se ha realizado una buena Planificación de Capacidad, cuando la carga prevista originada por todos los lotes emitidos, coincide en valor (estableciéndose unos márgenes de variación aceptables) y periodo, con la capacidad realmente necesaria. No se tomará como aceptable un Plan de Carga que, aunque adolezca de desajustes en la capacidad requerida para cada Centro de Trabajo y periodo, esto se deba a compensaciones entre variaciones de las cargas de los distintos lotes. Esta consideración parte de la base de que la Planificación de Capacidad no debe cumplirse por casualidad, puesto que ello no se debe a unos cálculos adecuados y, por tanto, no implica que se pueda predecir correctamente la carga a lo largo del tiempo, objetivo principal de las técnicas de Planificación de Capacidad.

En consecuencia, en este apartado nos dedicaremos, en primer lugar, a analizar por separado las dos fuentes de variación del Plan de Carga para, posteriormente, reflejar el efecto conjunto de éstas a través de la probabilidad de cumplimiento de la planificación realizada para cada uno de los lotes emitidos, utilizando la programación hacia delante para la asignación de cargas¹.

¹ Recordemos que la programación hacia delante organiza las actividades comenzando en el momento de emisión del pedido, siendo éste el instante a partir del cual se empezará a contar el tiempo de suministro. Algunos autores consideran este tipo de programación como la aplicada en el CRP. Véase, por ejemplo, Wemmerlöv (1984, p. 32), Connor (1986, p. 21), Cheng (1986, p. 443), Oden, Langenwaller y Lucier (1993, p. 195), Scott (1994, p. 162), Companys y Coromias (1995, p. 276) y Slack (1997, p. 22).

4.2.1. El valor de la carga asignada a un periodo

El procedimiento de cálculo de CRP, como se analizó en el Apartado 2.4.3., se inicia elaborando un Plan de Carga a partir de los pedidos planificados y en curso, determinando la capacidad necesaria para cada Centro de Trabajo, en cada periodo de tiempo del horizonte temporal considerado. Para un análisis más exhaustivo de las variables condicionantes de la aleatoriedad de la carga, se ha incorporado a la fórmula general de cálculo del tiempo de carga, el efecto que pueden tener las unidades defectuosas y el criterio de entrada en el Centro de Trabajo; en concreto, se han tomado dos hipótesis habituales en la Teoría de Colas²: que las tasas de llegada al Centro de Trabajo se distribuyan como una Poisson³ y que se produzca la entrada en el Centro de Trabajo por orden de llegada. El cálculo del tiempo medio de carga de un lote se calculará, en unidades estándar y según la expresión (3.20), como:

$$\overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} = (\overline{te_i} \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times (1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}}) \quad (4.1)$$

Donde recordemos que:

$\overline{Tc_{Qijk}}$ = tiempo de carga medio, en unidades reales, necesario para la realización de la operación i , en el Centro de Trabajo k , a todas las unidades que conforman el lote de Q unidades del artículo j .

$\overline{E_k}$ = factor de eficiencia media del Centro de Trabajo k , utilizado para reflejar los distintos ritmos de actividad de los diferentes trabajadores o máquinas que intervienen en el Centro de Trabajo.

$\overline{U_k}$ = factor de utilización medio del Centro de Trabajo k , que relaciona el tiempo productivo de trabajo con el real o teórico.

$\overline{te_i}$ = tiempo medio necesario para desarrollar o ejecutar una vez la operación i , en unidades estándar.

² Véase, por ejemplo, De la Fuente y Pino (2001), Cao (2002) o Pazos, Suárez y Díaz (2003).

³ Ver, por ejemplo, Domínguez y otros (1995, p. 388), Heizer y Render (2002, p. 391) y Fernández y Vázquez (1994, p. 472).

- $\overline{tp}_{ik}$ = tiempo medio de preparación o ajuste del Centro de Trabajo k para ejecutar la operación i , tras haber estado realizando otra operación distinta con anterioridad, ofrecido en unidades estándar.
- $\overline{v}_i$ = producto de los factores de aprovechamientos medios de la operación i [calculados como $\overline{a}_i = (1 - \overline{de}_i)$, considerando $\overline{de}_i$ como la fracción de defectuosas media obtenida al ejecutar la operación i al artículo j] y de todas las operaciones siguientes que se realicen hasta el final de su ruta.
- $\overline{\lambda}_{ik}$ = tasa media de llegada al Centro de Trabajo k del ítem al que hay que hacerle la operación i . Calculada como la suma de las tasas de llegada de las distintas operaciones que se realizan en el Centro.
- Q_j = total de unidades que componen el lote emitido del ítem j .

Como se puede observar, un cambio en una de las variables aleatorias que conforman el tiempo de carga, originaría una variación con respecto a la capacidad necesaria calculada, siempre y cuando esta desviación no se vea anulada con cambios en el valor del resto de las variables que influyen en su cálculo.

Para estudiar la carga asignada a un periodo en un Centro de Trabajo concreto, habrá de tenerse en consideración la posibilidad de que ésta quede o no, situada totalmente en un único cubo de tiempo, cuestión que pasamos a formular a continuación.

4.2.1.1. Carga de una operación asignada totalmente a un periodo

Si en un determinado periodo, un Centro de Trabajo realiza varias operaciones de la ruta de un ítem j , la carga asignada será la suma de los tiempos de carga originados por la ejecución de todas las operaciones que se realizan en dicho periodo. Así, por ejemplo, partiendo de la expresión (4.1), podemos decir que la carga estimada, en unidades estándar, originada en el Centro de Trabajo k , por un lote del ítem j , en un periodo p , donde se realiza desde la operación n hasta la operación m de su ruta, será:

$$\overline{C_{Qjpk}} = \sum_{i=n}^m \overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} = \sum_{i=n}^m \left[\left(\overline{te_i} \times \overline{Q_j} \times \overline{v_i} \right) + \overline{tp_{ik}} \times \left(1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}} \right) \right] \quad (4.2)$$

Según esta expresión, si una operación no se ejecuta en el Centro de Trabajo k , el valor de $\overline{Tc_{Qijk}}$ será cero.

4.2.1.2. Carga de una operación distribuida entre varios periodos

No es habitual que la carga generada por el procesamiento de una operación a un lote quede siempre asignada totalmente a un único periodo del horizonte de planificación, sino que, lo normal, debido al resto de los elementos que componen el tiempo de suministro, es que se vea repartida entre varios periodos. En este sentido, si alguna operación de la ruta de un ítem j , no se asigna totalmente a un periodo con la planificación elaborada por CRP, trabajaremos con una fracción de carga. Podemos encontrar tres situaciones distintas:

1. Queda sin terminar una operación al final del periodo.
2. El periodo se inicia con la continuación del procesamiento de una operación comenzada anteriormente.
3. Existen operaciones inconclusas al principio y al final del periodo.

En el **primer** caso, si durante el procesamiento de un lote de un ítem j , se origina carga fraccionada únicamente al final de un periodo p , en el que se ejecuta desde la operación n a la m completamente, realizándose una fracción de la operación $m+1$, la carga generada en el Centro de Trabajo k , será:

$$\overline{C_{Qjpk}} = \sum_{i=n}^m \overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} + f_{1/y, m+1, jk} \times \overline{Tc_{Qm+1, jk}} \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} \quad (4.3)$$

Siendo $f_{1/y, m+1, jk}$ la fracción de carga asignada al primero de un total de y periodos entre los que se repartirá la carga de la operación $m+1$. Consideraremos, en términos generales, que $f_{x/y, njk}$ es la fracción de carga número x , de un total de y , entre las que se reparte la carga de la operación n , para el lote l del ítem j , que se

realiza en el Centro de Trabajo k . Así por ejemplo, $f_{2/5(300),A1}$ será la fracción de carga asignada al segundo de los tres periodos entre los que se reparte la carga de la operación 5 de un lote de 300 unidades del ítem A, en el Centro de Trabajo 1. Lógicamente, la suma de las fracciones consideradas en los distintos periodos, en los que se distribuye la carga de una operación, tiene que ser uno.

Otra situación con la que nos podemos encontrar es la que mencionamos en **segundo** lugar, es decir, aquella en la que se ejecuta totalmente desde la operación n a la m , pudiéndose comenzar con la continuación de la operación $n-1$ (si ésta no se hubiese terminado en el periodo anterior), en cuyo caso la carga será:

$$\overline{C_{Qjkp}} = f_{x/y, n-1, jk} \times \overline{Tc_{Qn-1, jk}} \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} + \sum_{i=n}^m \overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} \quad (4.4)$$

La **tercera** situación se produce cuando, tanto al comienzo como al final del periodo, existe carga fraccionada. Así, por ejemplo, durante el procesamiento de un lote de un ítem j , un periodo p puede iniciarse con la continuación de una operación ($n-1$), que quedó sin finalizar en el periodo anterior, seguidamente se realizarían desde la operación n a la m completamente, dejándose inconclusa la operación $m+1$. La ejecución de estas operaciones puede producirse en diferentes Centros de Trabajo, por lo que la carga estimada, en unidades estándar, que se generará en el Centro de Trabajo k se calculará como:

$$\begin{aligned} \overline{C_{Qjkp}} = & f_{x/y, n-1, jk} \times \overline{Tc_{Qn-1, jk}} \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} + \sum_{i=n}^m \overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} + \\ & + f_{y/y, m+1, jk} \times \overline{Tc_{Qm+1, jk}} \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Esta expresión puede utilizarse como fórmula general, ya que en el caso de que no queden operaciones inconclusas al principio o al final del periodo, las operaciones, $n-1$ o $m+1$, no generarán carga y, por tanto, $\overline{Tc_{Qn-1, jk}}$ ó $\overline{Tc_{Qm+1, jk}}$ serán cero. Igualmente, si alguna de las operaciones realizadas en el periodo no se ejecutan en el Centro de Trabajo objeto de estudio, sus tiempos de carga serán cero.

El valor que tome la fracción de carga de una operación, en cualquiera de los casos anteriores, depende de la planificación elaborada, variando si se producen cambios en el montante del tiempo de carga de la operación a la que está vinculada.

4.2.2. Asignación de la carga de una operación

Para conseguir un Plan de Carga realista no es suficiente con una adecuada estimación del valor de la carga, sino que es imprescindible que ésta esté asignada al periodo en el que realmente se va a producir. Por este motivo nos centraremos a continuación en esa segunda fuente de variación: los desplazamientos de carga entre periodos, considerando varias situaciones posibles.

En primer lugar se debe tener en consideración que, mientras que la carga de los Centros de Trabajo se mide en unidades estándar con objeto de compararla con la capacidad disponible, para estudiar los posibles traslados de ésta entre periodos es necesario utilizar unidades reales, es decir, la misma unidad de medida de la duración del periodo. Así, por ejemplo, el tiempo medio de carga necesario medido en unidades reales, para ejecutar una operación i , que se realiza en el Centro de Trabajo k , a todas las unidades de un lote del ítem j ($\overline{Tc_{Qijk}}$) será, basándonos en la expresión (3.19.):

$$\overline{Tc_{Qijk}} = \frac{(\overline{te_i} \times Q_j \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times (1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\overline{\lambda_k}})}{\overline{E_k} \times \overline{U_k}} \quad (4.6)$$

Como referimos en el Apartado 4.2.1.2., la carga generada por el procesamiento de una operación a un lote, puede no ser asignada totalmente a un periodo del horizonte de planificación, lo que generará diferentes situaciones que afectarán al intervalo dentro del cual se pueden desplazar las cargas, sin originar desviaciones con respecto a la planificación. Por este motivo, diferenciaremos en nuestro estudio los desplazamientos permitidos de la carga en función de que las operaciones queden totalmente asignadas a un periodo o que haya alguna operación parcialmente realizada dentro de él.

4.2.2.1. Carga de las operaciones asignada totalmente a un periodo

Analizaremos en este epígrafe, la posibilidad de que se disponga de un margen de desplazamiento de las cargas planificadas en un determinado periodo (considerando que no hay ninguna fraccionada), bajo la restricción de que éstas no deben salirse del cubo de tiempo al que fueron asignadas, ni provocar traslados de cargas de los periodos anexos u originar incumplimiento del plazo de entrega.

Comenzaremos el estudio de estos movimientos de las cargas utilizando un ejemplo muy simple para, posteriormente, deducir los intervalos de variación para casos más complejos. Así, supongamos que en el proceso de fabricación de un determinado lote del ítem j se realizan tres operaciones, cada una de las cuales son procesadas totalmente dentro de un periodo de tiempo (cuya duración es Tp), no asignándose a ese mismo periodo carga proveniente de otra operación, ya sea anterior o posterior. La ruta está compuesta por las operaciones O1, O2 y O3, ejecutándose la primera y última operación en el Centro de Trabajo 1, mientras que O2 precisa del Centro de Trabajo 2. Considerando que se utiliza la programación hacia delante en el proceso de asignación de cargas, podríamos representar gráficamente el tiempo de suministro correspondiente a este caso mediante la Figura 4.1., donde se refleja la planificación estimada, basada en los valores medios de los tiempos, y suponiendo que es necesario tiempo de espera e inspección únicamente al final de la ruta.

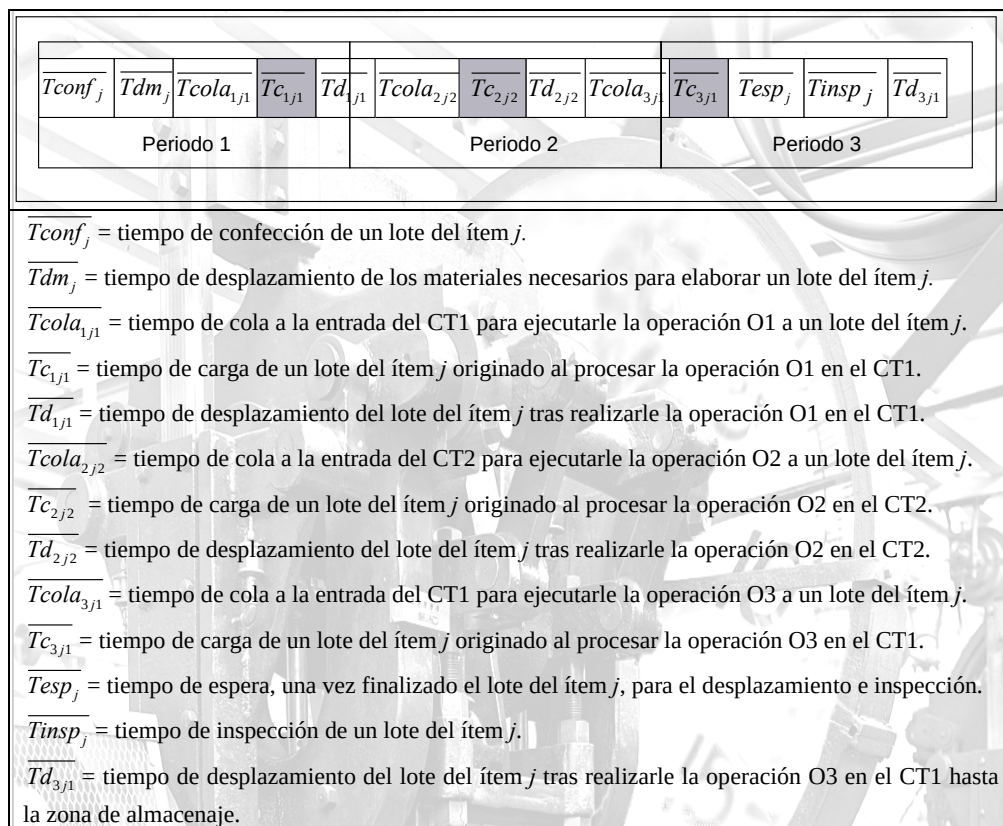


Figura 4.1. Ejemplo de tiempo de suministro de un ítem j .

Si se desea que no se produzcan desplazamientos a otros periodos de las cargas asignadas, los valores reales de los elementos que componen el tiempo de suministro deben mantenerse dentro de un intervalo de variación, que depende de la distribución de los tiempos dentro del periodo. Para el ejemplo reflejado en la Figura 4.1., debe cumplirse:

1. Para el primer periodo: que la carga de O1 no debe desplazarse al periodo 2 y la operación O2 no debe desplazarse al periodo 1.
2. Segundo periodo: que no haya traslado de la carga de O2 ni al periodo 1 ni al 3. Tampoco queremos que entren, en el periodo 2, las operaciones O1 y O3.
3. Tercer periodo: que no haya desplazamientos de la O3 al periodo 2 y de la O2 al periodo 3 y, por otro lado, se desea que no haya variación en el total de periodos que comprende el tiempo de suministro.

Lógicamente, al restringir el movimiento de las cargas de las operaciones que se ejecutan en el periodo inmediatamente anterior o posterior (en este caso sólo una operación), estamos limitando la entrada al cubo de tiempo objeto de estudio, de carga de periodos más lejanos. Es decir, al establecer un margen de desplazamientos en el periodo 1, que evite la entrada de la carga planificada en el periodo 2, también restringimos el desplazamiento de la carga asignada al tercer cubo de tiempo.

Así, en el ejemplo reflejado en la Figura 4.1., para que la carga del primer periodo, en el que se empieza a elaborar el ítem j (originada por la primera operación de su ruta, llamada O1), siga asignada completamente a este periodo, es necesario que se cumpla que:

$$Tconf_j + Tdm_{Qj} + Tcola_{1j1} + Tc_{Q1j1} \leq Tp \quad (4.7)$$

Donde:

$Tconf_j$: = tiempo necesitado realmente para confeccionar el pedido de Q unidades del ítem j .

Tdm_{Qj} = tiempo realmente incurrido en el desplazamiento de los materiales precisos para la elaboración del lote de Q unidades del ítem j .

$Tcola_{1j1}$ = tiempo de cola que espera el lote de j para poder entrar en el Centro de Trabajo 1, donde se le ejecutará la operación O1.

Tc_{Qlj1} = tiempo que transcurre realmente desde la entrada en el Centro de Trabajo 1, hasta su salida, es decir, el tiempo de carga del lote, de tamaño Q , para O1.

Si se cumple la restricción establecida por la expresión (4.7), se evitaría el desplazamiento de O1 al periodo 2. Pero además, la carga de la operación siguiente no debe moverse al primer cubo de tiempo. Es decir, para que no se traslade O2 al periodo 1, debe cumplirse que:

$$Tconf_j + Tdm_{Qj} + Tcola_{1j1} + Tc_{Q1j1} + Td_{Q1j1} + Tcola_{2j2} \geq Tp \quad (4.8)$$

Lo cual permite, como máximo, la entrada en el **primer período del tiempo** entre operaciones (tiempos de desplazamiento y cola), para evitar, de esta manera el desplazamiento de la carga asignada al periodo 2.

Además, podemos agrupar las dos condiciones anteriores bajo la siguiente expresión:

$$Tp - Td_{Q1j1} - Tcola_{2j2} \leq Tconf_j + Tdm_{Qj} + Tcola_{1j1} + Tc_{Q1j1} \leq Tp \quad (4.9)$$

Para el **segundo cubo de tiempo**, partiendo de la base de que, si se cumple la restricción (4.9), no se trasladará carga de la O1 al periodo 2, podemos establecer que el margen de variación permitido, para que tampoco se mueva la O2 al cubo de tiempo siguiente, es:

$$Td_{Q1j12} + Tcola_{2j22} + Tc_{Q2j2} \leq Tp \quad (4.10)$$

Donde:

Td_{Q1j12} = tiempo de desplazamiento tras realizar O1, al ítem j , en el Centro de Trabajo 1, que se produce en el periodo 2 (Td_{Qijkp}). A diferencia de éste, Td_{Q1j1} (Td_{Qijk}) refleja el tiempo de desplazamiento total y coincidirá en valor con aquél cuando el periodo anterior termine con la finalización de O1.

$Tcola_{2j22}$ = tiempo de cola para realizar O2, al ítem j , en el Centro de Trabajo 2, que se produce en el periodo 2 ($Tcola_{ijkp}$). Mientras que $Tcola_{2j2}$ ($Tcola_{ijk}$) indica el tiempo total de espera para el procesamiento de la operación.

Td_{Qijkp} y $Tcola_{ijkp}$ pueden tomar valor cero, si todo el tiempo de desplazamiento o de cola, destinado a la operación i , para el ítem j , que se ejecuta en el Centro de Trabajo k , se produce en un periodo anterior al que se procesa dicha operación. Dadas las características del tiempo de suministro, si Td_{Qijkp} no es nulo, $Tcola_{ijkp}$ coincidirá con $Tcola_{ijk}$.

Con la diferenciación de estas dos variables, reflejamos la posibilidad de que el periodo p comience con la preparación para la ejecución de la operación i , lo cual ocurriría si se cumpliera que:

$$Tconf_j + Tdm_{Qj} + Tcola_{1j1} + Tc_{Q1j1} + Td_{Q1j1} + Tcola_{2j2} = Tp$$

Por otro lado, y dentro de las restricciones que tienen como objeto el periodo 2, para evitar desplazamiento de carga de O3, siguiendo la misma deducción que en el periodo 1, será necesario que:

$$Td_{Q1j12} + Tcola_{2j22} + Tc_{Q2j2} + Td_{Q2j2} + Tcola_{3j1} \geq Tp \quad (4.11)$$

Esto nos lleva a establecer que la condición que se debe cumplir en el segundo periodo, para que no se desplace la carga, basándonos en las expresiones (4.10) y (4.11), y suponiendo que se cumple el intervalo indicado en la expresión (4.9), es:

$$Tp - Td_{Q2j2} - Tcola_{3j1} \leq Td_{Q1j12} + Tcola_{2j22} + Tc_{Q2j2} \leq Tp \quad (4.12)$$

Con respecto al **tercer** y último **periodo** de la Figura 4.1., dado que ya se han establecido las condiciones que deben cumplirse para evitar el traslado de la carga de O3 al periodo anterior [expresión (4.11)], sólo resta determinar el margen de variación de los tiempos que permita cumplir con el plazo de entrega o tiempo de suministro planificado, suponiendo que ha sido adecuadamente estimada la asignación de las cargas de los periodos anteriores. Será necesario incluir el tiempo de espera y el tiempo de inspección que, para simplificar, hemos considerado que se originan una sola vez, tras ser realizadas todas las operaciones de la ruta, por lo que la restricción quedará como sigue:

$$Td_{Q2j23} + Tcola_{3j13} + Tc_{Q3j1} + Tesp_j + Tinsp_{Qj} + Td_{Q3j1} \leq Tp \quad (4.13)$$

En resumen, para que la planificación de la carga por periodo y el plazo de entrega, en el ejemplo reflejado en la Figura 4.1., coincidan con la realidad, es

preciso que se cumplan conjuntamente los intervalos de variación indicados en las expresiones (4.9), (4.12) y (4.13). Sin embargo, dado que dichos intervalos están determinados por distintas variables aleatorias, el riesgo de incumplimiento de la planificación suele ser alto (como se verá más detalladamente en el Apartado 4.2.3.). Si, además, tenemos en cuenta que en las empresas de fabricación por lotes, no suele ser habitual que en un cubo de tiempo se procese una única operación, tal y como se ha considerado para el ejemplo anterior, habrá que incluir un mayor número de variables que complican la posibilidad de cumplimiento del Plan.

Generalizando al caso de que se puedan ejecutar en un mismo periodo de tiempo varias operaciones, y de que se pueda necesitar tiempo de espera e inspección tras cada una de ellas, la restricción que debe cumplirse para que no se produzcan desplazamientos de carga en el primer periodo, donde se ejecutan totalmente $n-1$ operaciones de un total de I operaciones que componen la ruta del ítem j^4 , que pueden ser realizadas en M Centros de Trabajo, ampliando la expresión (4.9), quedará como:

$$\begin{aligned}
 & Tp - \sum_{k=1}^M T_{esp_{n-1,jk}} - \sum_{k=1}^M T_{insp_{Q_{n-1,jk}}} - \sum_{k=1}^M T_{d_{Q_{n-1,jk}}} - \sum_{k=1}^M T_{cola_{njk}} \leq \\
 & \leq T_{conf_j} + T_{dm_{Q_j}} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=1}^M T_{cola_{ijk}} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=1}^M T_{c_{Q_{ijk}}} + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{k=1}^M T_{esp_{ijk}} + \\
 & + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{k=1}^M T_{insp_{Q_{ijk}}} + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{k=1}^M T_{d_{Q_{ijk}}} \leq Tp
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

En esta expresión se han utilizado los sumatorios con respecto a k para reflejar que debe considerarse la operación i , independientemente del Centro de Trabajo en la que ésta se realice.

En un periodo p , si éste no es ni el primero ni el último de los que conforman el tiempo de suministro [como en la expresión (4.12)], en el que se realizar desde la operación n hasta la m , el intervalo de variación que debe cumplirse será:

⁴ Cuando indicamos que se ejecutan totalmente operaciones, en un periodo, nos referimos a que, según la planificación de la empresa, basada en los valores estimados de los componentes del tiempo de suministro, se cumple esta condición.

$$\begin{aligned}
Tp - \sum_{k=1}^M T_{esp_{mjk}} - \sum_{k=1}^M T_{insp_{Qmjk}} - \sum_{k=1}^M T_{d_{Qmjk}} - \sum_{k=1}^M T_{cola_{m+1,jk}} &\leq \sum_{k=1}^M T_{esp_{n-1,jkp}} + \\
+ \sum_{k=1}^M T_{insp_{Qn-1,jkp}} + \sum_{k=1}^M T_{d_{Qn-1,jkp}} + \sum_{k=1}^M T_{cola_{njkp}} + \sum_{i=n}^{m-1} \sum_{k=1}^M T_{d_{Qijk}} + \\
+ \sum_{i=n+1}^m \sum_{k=1}^M T_{cola_{ijk}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M T_{c_{Qijk}} + \sum_{i=n+1}^{m-1} \sum_{k=1}^M T_{esp_{ijk}} + \sum_{i=n}^{m-1} \sum_{k=1}^M T_{insp_{Qijk}} &\leq Tp
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Donde $T_{esp_{n-1,jkp}}$, $T_{insp_{Qn-1,jkp}}$, $T_{d_{Qn-1,jkp}}$ y $T_{cola_{n-1,jkp}}$ indican el valor de los tiempos de espera, inspección, desplazamiento y cola, respectivamente, de la operación $n-1$, asignados al periodo p .

Los intervalos siguientes, hasta el penúltimo de su tiempo de suministro, se calcularán de manera similar a la anteriormente descrita. Mientras que, para el último periodo, en el que se asigna la carga de las operaciones desde la y a la I , el intervalo que debe cumplir, tomando como base la expresión (4.13), será:

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^M T_{esp_{y-1,jkp}} + \sum_{k=1}^M T_{insp_{Qy-1,jkp}} + \sum_{k=1}^M T_{d_{Qy-1,jkp}} + \sum_{k=1}^M T_{cola_{y,jkp}} + \sum_{i=y}^I \sum_{k=1}^M T_{d_{Qijk}} + \\
+ \sum_{i=y+1}^I \sum_{k=1}^M T_{cola_{ijk}} + \sum_{i=y}^I \sum_{k=1}^M T_{c_{Qijk}} + \sum_{i=y}^I \sum_{k=1}^M T_{esp_{ijk}} + \sum_{i=y}^I \sum_{k=1}^M T_{insp_{Qijk}} &\leq Tp
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Con las expresiones (4.14), (4.15) y (4.16) se han establecido los márgenes de variación permitidos, con los que se evita el desplazamiento de carga a periodos donde no había sido planificada inicialmente. En concreto, sólo restringimos el traslado desde aquellos periodos inmediatamente anteriores o posteriores, ya que de esta manera también se impide el movimiento hacia el periodo objeto de estudio, de las cargas de cubos de tiempo más alejados.

En el caso de que en un periodo, según la planificación elaborada, no se realice ninguna operación, la restricción se limita a evitar la entrada en él de carga asignada al periodo siguiente (ya que la entrada de carga del cubo de tiempo anterior queda restringida al determinar su propio margen de variación). Las expresiones (4.17), (4.18) y (4.19) reflejan, respectivamente, el intervalo de movimiento permitido si esto ocurre en un periodo inicial, intermedio (donde la operación siguiente sea q) o final (siendo la última operación de su ruta la operación y).

$$T_{conf_j} + T_{dm_{Qj}} + \sum_{k=1}^M T_{cola_{1,jk}} \geq Tp \tag{4.17}$$

$$\sum_{k=1}^M T_{esp_{q-1,jkp}} + \sum_{k=1}^M T_{insp_{Qq-1,jkp}} + \sum_{k=1}^M T_{d_{Qq-1,jkp}} + \sum_{k=1}^M T_{cola_{qjkp}} \geq T_p \quad (4.18)$$

$$\sum_{k=1}^M T_{esp_{yjkp}} + \sum_{k=1}^M T_{insp_{Qyjkp}} + \sum_{k=1}^M T_{d_{Qyjkp}} \leq T_p \quad (4.19)$$

La asignación total de la carga de las operaciones necesarias para la elaboración de un ítem, se puede originar en algunos de los periodos que componen su tiempo de suministro, siendo poco probable que esto ocurra en todos los cubos de tiempo y para todos los lotes que componen el Plan de Materiales.

Por esta razón estudiaremos, a continuación, los desplazamientos permitidos de la carga para el caso de que ésta se reparta entre varios periodos.

4.2.2.2. Carga de una operación distribuida entre varios periodos

La asignación en el tiempo de las cargas producidas por las distintas operaciones depende tanto del montante de éstas, como del valor del resto de los elementos que componen el tiempo de suministro, siendo estos determinantes en la Planificación de Capacidad y, particularmente, en la asignación total o parcial de las cargas a un periodo.

Tras el análisis de los intervalos de variación permitidos para el caso de los periodos en los que no existe carga fraccionada, estudiamos a continuación, cuáles son los márgenes dentro de los que los movimientos de la carga, no originan incumplimiento de la planificación, para aquellos periodos en los que se procese parcialmente alguna operación. A este respecto, en un cubo de tiempo concreto, nos podemos encontrar varias situaciones posibles:

1. En aquellas ocasiones en las que el periodo comienza con el procesamiento de una operación no iniciada en el anterior, pudiéndosele realizar más operaciones durante dicho cubo de tiempo, alguna de las cuales queda inconclusa al final de éste.
2. Cuando queda sin terminar una operación al final del periodo, y éste no comienza con el procesamiento de un lote, a causa de los tiempos de espera, inspección, desplazamiento o cola que se pueden producir entre operaciones.

3. Cuando en un mismo periodo se termina la ejecución de una operación comenzada en periodos anteriores y queda algún lote en proceso.
4. En los casos en que el periodo comienza con la finalización de una operación parcialmente ejecutada, no quedando carga fraccionada para periodos posteriores.
5. Cuando todo el tiempo del periodo se destina al procesamiento de una operación. Ello podría ocurrir para tamaños de lote grandes y/o cubos de tiempo reducidos.

Para el análisis de los intervalos de variación permitidos en las distintas situaciones descritas, manejaremos los ejemplos reflejados en la Figura 4.2., los cuales reflejan los distintos casos que nos podemos encontrar en un periodo. Por motivos prácticos sólo se ha indicado la notación completa del tiempo de carga, si bien, en el desarrollo de los márgenes de variación, se incluirá la nomenclatura del resto de los elementos que componen el tiempo de suministro.

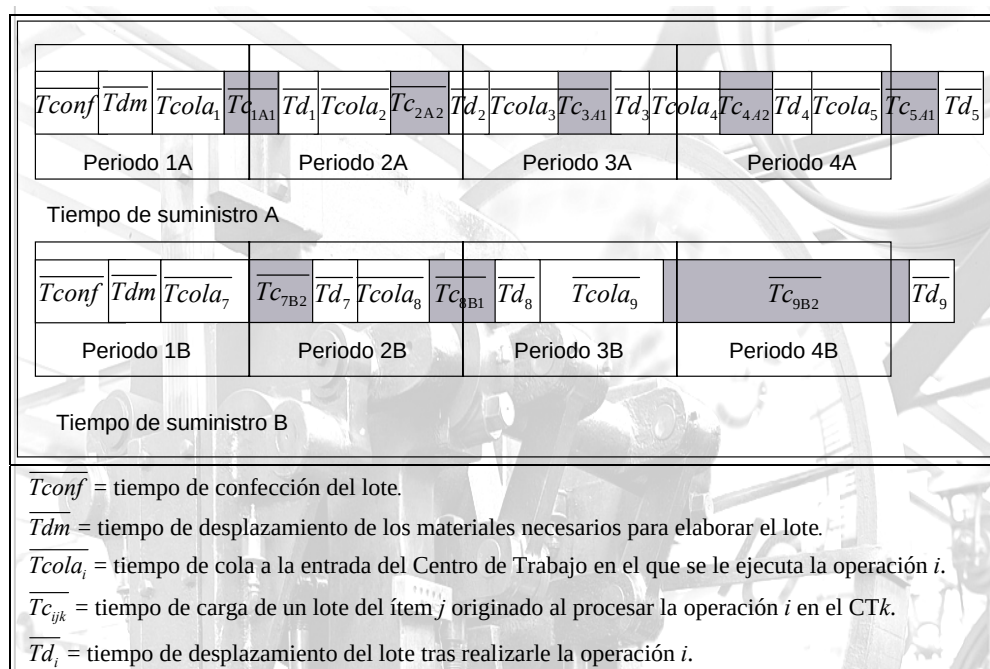


Figura 4.2. Ejemplos de tiempos de suministro de los ítems A y B.

En la **primera** de las situaciones descritas, la carga fraccionada se origina únicamente al final de un periodo, que comienza con la preparación del Centro de Trabajo (en caso de ser necesaria). Bajo este contexto, para evitar movimientos de

la carga planificada y, suponiendo que se procesan desde la operación n a m completamente, realizándose una fracción $f_{1/y^{m+1}jk}$ de la operación $m+1$, es preciso que se cumpla la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M T_{esp_{ijk}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M T_{insp_{Qijk}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M T_{d_{Qijk}} + \sum_{i=n+1}^{m+1} \sum_{k=1}^M T_{cola_{ijk}} + \\ & + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M T_{c_{Qijk}} + \sum_{k=1}^M (f_{1/y^{m+1}jk} \times T_{c_{Qm+1jk}}) = T_p \end{aligned} \quad (4.20)$$

Estaríamos en la situación reflejada en el periodo 2B de la Figura 4.2., para la cual debe cumplirse, con objeto de evitar desplazamientos de la carga asignada a dicho periodo, que:

$$T_{d_{Q7B2}} + T_{cola_{8B1}} + T_{c_{Q7B2}} + f_{1/2^{8B1}} \times T_{c_{Q8B1}} = T_p$$

Donde $f_{1/2^{8B1}}$ indica la primera fracción, de las dos en las que se divide la carga de la operación O8, que se realiza, para la elaboración del ítem B, en el Centro de Trabajo 1.

Por otro lado, en un **segundo** caso, en el que el periodo no comience directamente con el procesamiento de una operación, sino que el momento de inicio de ésta se demore a causa del tiempo entre operaciones, es preciso determinar qué parte de este tiempo se consume desde el comienzo del periodo hasta que empiece el procesamiento de la primera operación que origina carga en él. De modo que el intervalo que se debe cumplir, suponiendo que se procesen totalmente desde la operación n a m , quedando inconclusa la operación $m+1$, será:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^M T_{esp_{n-1jkp}} + \sum_{k=1}^M T_{insp_{Qn-1jkp}} + \sum_{k=1}^M T_{d_{Qn-1jkp}} + \sum_{k=1}^M T_{cola_{njkp}} + \\ & + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M T_{esp_{ijk}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M T_{insp_{Qijk}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M T_{d_{Qijk}} + \sum_{i=n+1}^{m+1} \sum_{k=1}^M T_{cola_{ijk}} + \\ & + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M T_{c_{Qijk}} + \sum_{k=1}^M (f_{1/y^{m+1}jk} \times T_{c_{Qm+1jk}}) = T_p \end{aligned} \quad (4.21)$$

Esta situación se refleja en el periodo 4A de la Figura 4.2., debiéndose cumplir, para evitar desplazamientos de carga, lo siguiente:

$$T_{cola_{4A24}} + T_{d_{Q4A2}} + T_{cola_{5A1}} + T_{c_{Q4A2}} + f_{1/2^{5A1}} \times T_{c_{Q5A1}} = T_p$$

Donde $Tcola_{4A24}$ indica la porción del tiempo de cola para la ejecución de la operación O4, que se produce en el periodo 4.

Una variante del caso anterior se puede originar en el periodo inicial del tiempo de suministro, cuando al final de éste queda sin concluir una operación (como en el periodo 1A de la Figura 4.2.), en cuyo caso sería preciso incluir los tiempos de confección de pedido y de desplazamiento de materiales en el intervalo, adaptando la restricción (4.21) de la manera siguiente:

$$Tconf_j + Tdm_{Qj} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^M Tresp_{ijk} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^M Tinsp_{Qijk} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^M Td_{Qijk} + \\ + \sum_{i=1}^{m+1} \sum_{k=1}^M Tcola_{ijk} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M Tc_{Qijk} + \sum_{k=1}^M (f_{y/m+1,jk} \times Tc_{Qm+1,jk}) = Tp \quad (4.22)$$

La aplicación de esta expresión al periodo 1A, de la Figura 4.2., es la siguiente:

$$Tconf_A + Tdm_{QA} + Tcola_{1A1} + f_{y/2,1A1} \times Tc_{Q1A1} = Tp$$

En las expresiones (4.20), (4.21) y (4.22) se han reflejado situaciones en las que queda sin acabar alguna operación al final del periodo, lo cual implica que ésta debe continuar procesándose en el periodo siguiente. Es preciso, por tanto, analizar los distintos casos que pueden originarse en tales periodos posteriores, los cuales comienzan con la prorrogación de la operación que se quedó inconclusa.

Así, como se indicó en la **tercera** de las situaciones posibles, podría ocurrir que al final del periodo vuelva a existir un corte en la ejecución de otra operación, como sucede en el periodo 3B de la Figura 4.2. En tal caso, suponiendo que se realice desde la operación $m-1$ (aunque parcialmente) hasta la $m+1$, quedándose ésta última también sin terminar, resultará necesario para evitar traslados de carga, que se cumpla que:

$$\sum_{k=1}^M (f_{y/n-1,jk} \times Tc_{Qn-1,jk}) + \sum_{i=n-1}^m \sum_{k=1}^M Tresp_{ijk} + \sum_{i=n-1}^m \sum_{k=1}^M Tinsp_{Qijk} + \sum_{i=n-1}^m \sum_{k=1}^M Td_{Qijk} + \\ + \sum_{i=n}^{m+1} \sum_{k=1}^M Tcola_{ijk} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M Tc_{Qijk} + \sum_{k=1}^M (f_{y/m+1,m+1,jk} \times Tc_{Qm+1,jk}) = Tp \quad (4.23)$$

Para el ejemplo indicado (3B de la Figura 4.2.) debería cumplirse que:

$$f_{\frac{2}{2}8B1} \times Tc_{Q8B1} + Td_{Q8B1} + Tcola_{9B2} + f_{\frac{1}{2}9B2} \times Tc_{Q9B2} = Tp$$

Un **cuarto** caso se produce cuando en un periodo sólo existe una operación parcialmente realizada, que se termina al principio de éste, siendo procesadas totalmente el resto de operaciones (nos encontramos con una situación similar a la que se observa en el periodo 2A de la Figura 4.2.). En términos generales, si la operación completada es $n-1$, ejecutándose hasta la operación m (terminada en ese periodo), se dispone de cierto margen de movimiento de la carga sin provocar desplazamientos, determinado por:

$$\begin{aligned} Tp - \sum_{k=1}^M Tresp_{mjk} - \sum_{k=1}^M Tinsp_{Qmjk} - \sum_{k=1}^M Td_{Qmjk} - \sum_{k=1}^M Tcola_{m+1,jk} &\leq \\ &\leq \sum_{k=1}^M (f_{\frac{x_{n-1}}{y_{n-1}}} \times Tc_{Qn-1,jk}) + \sum_{i=n-1}^{m-1} \sum_{k=1}^M Tresp_{ijk} + \sum_{i=n-1}^{m-1} \sum_{k=1}^M Tinsp_{Qijk} + \\ &+ \sum_{i=n-1}^{m-1} \sum_{k=1}^M Td_{Qijk} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M Tcola_{ijk} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M Tc_{Qijk} \leq Tp \end{aligned} \quad (4.24)$$

Según nuestro ejemplo, deberá cumplirse, para el periodo 2A de la Figura 4.2., el siguiente intervalo:

$$Tp - Td_{Q2A2} - Tcola_{3A1} \leq f_{\frac{2}{2}1A1} \times Tc_{Q1A1} + Td_{Q1A1} + Tcola_{2A2} + Tc_{Q2A2} \leq Tp$$

Bajo estas circunstancias, si en el periodo en cuestión sólo se termina la operación comenzada en el anterior, únicamente se incluye en el intervalo el tiempo necesario para terminar la operación inconclusa $n-1$, por lo que la expresión (4.24) quedará reducida a:

$$\begin{aligned} Tp - \sum_{k=1}^M Tresp_{n-1,jk} - \sum_{k=1}^M Tinsp_{Qn-1,jk} - \sum_{k=1}^M Td_{Qn-1,jk} - \\ - \sum_{k=1}^M Tcola_{njk} &\leq \sum_{k=1}^M (f_{\frac{y}{y}} \times Tc_{Qn-1,jk}) \leq Tp \end{aligned} \quad (4.25)$$

La última de las situaciones planteadas, la **quinta**, se caracteriza por el comienzo de un periodo con la continuación de la ejecución de una operación, que no es terminada en él (véase periodo 4B de la Figura 4.2.), es decir se realiza en él la fracción $f_{\frac{x}{y}m+1,jk}$ de la operación $m+1$ correspondiente al ítem j , en el Centro de Trabajo k , siendo x distinto de y . En este caso, para evitar desplazamientos de la carga, debe cumplirse que:

$$\sum_{k=1}^M (f_{x/y, m+1, jk} \times Tc_{Q_{m+1, jk}}) = Tp \quad (4.26)$$

Para el periodo 4 del tiempo de suministro B, utilizado como ejemplo en la Figura 4.2., la expresión anterior quedará como:

$$f_{2/3, 9B2} \times Tc_{Q_{9B2}} = Tp$$

Según se observa, en aquellos casos en los que quedan operaciones inconclusas al final del periodo [expresiones (4.20), (4.21), (4.22), (4.23) y (4.26)], no se permite un intervalo de variación, ya que, si la suma reflejada difiere del tiempo que ocupa un periodo (Tp), se originaría un movimiento de la carga y, con ello, el incumplimiento de la planificación (puesto que se desplazaría parte de la carga al periodo posterior, o entraría carga inicialmente asignada al periodo siguiente). En este sentido, sólo se permitirían variaciones que se compensen entre sí, de los tiempos entre operaciones incluidos en el periodo, así como cambios en los valores de las cargas que se procesan totalmente en dicho periodo, siempre que éstos se equilibren con variaciones del tiempo de carga de otras operaciones con las mismas características. Como se puede observar, la situación reflejada mediante la expresión (4.26) es la más restrictiva de entre todas las mencionadas anteriormente, puesto que no existen otras variables con las que compensar las posibles desviaciones que se puedan originar.

Se han analizado los intervalos dentro de los que se pueden mover la carga sin originar incumplimiento del Plan de Carga planificado, para un lote concreto de un determinado ítem. Sin embargo, en cada periodo del horizonte de planificación pueden coincidir cargas originadas por operaciones de distintos lotes de un mismo ítem o de otros ítems elaborados por la empresa. En tales casos sería necesario estudiar la probabilidad de que ninguna de las cargas asignadas a un periodo cambie de cubo de tiempo debido a la aleatoriedad de los elementos que conforman el tiempo de suministro.

Por este motivo, es preciso detallar aún más, las variables que inciden en la probabilidad, diferenciando el lote al que van referidas. Llamaremos Q_{ji} al lote de tamaño Q del ítem j , emitido en el periodo i , por lo que los tiempos que se ven afectados por el tamaño de lote (desplazamiento, carga, e inspección), serán notados, para una operación i , como: $Tdm_{Q_{ji}}$, $Td_{Q_{ij,k}}$, $Tc_{Q_{ij,k}}$ y $Tinsp_{Q_{ij,k}}$.

Tanto en el caso de que haya periodos en los que las cargas de las operaciones se asignen totalmente (indicados en el Apartado 4.2.2.1.), como cuando quedan operaciones inconclusas (por lo que la carga debe ser repartida

entre varios periodos, análisis que se ha realizado en este epígrafe), es necesario que se cumplan las ecuaciones e inecuaciones reflejadas anteriormente, para cada uno de los periodos que englobe el tiempo de suministro de los lotes de los distintos ítems que fabrique la empresa.

4.2.3. Probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga

Una vez analizados los requisitos necesarios para que se cumplan por separado, el valor y el momento de asignación de la carga, pasaremos a estudiar la probabilidad de que se produzcan simultáneamente, como indicadora del nivel de fiabilidad. Para ello es preciso establecer, en **primer lugar**, qué entendemos por cumplimiento del Plan de Carga. En este sentido, consideraremos que se cumple la planificación realizada cuando coincidan, tanto la carga, como el periodo al que ha sido asignada ésta, para todos los cubos de tiempo que cubra el tiempo de suministro, de los distintos lotes incluidos en el Plan de Materiales⁵, y para todos los Centros de Trabajo.

Basándonos en la Teoría de la Probabilidad Compuesta⁶ podemos decir que la probabilidad de que se cumpla el Plan de Carga (en las expresiones se indicará como *PC*) para *J* ítems que elabora una empresa, se podrá calcular como:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Cumpla Plan de Carga}) &= \bigcap_{j=1}^J P(\text{Cumpla } PC_j) = \\
 &= P(\text{Cumpla } PC_1 \cap \text{Cumpla } PC_2 \cap \dots \cap \text{Cumpla } PC_J) = \\
 &= P(\text{Cumpla } PC_1) \times P(\text{Cumpla } PC_2 / \text{Cumpla } PC_1) \times \dots \times \\
 &\times P(\text{Cumpla } PC_J / \text{Cumpla } PC_1 \cap \dots \cap \text{Cumpla } PC_{J-1})
 \end{aligned}
 \tag{4.27}$$

Habida cuenta que en las configuraciones productivas *job-shop*, los Centros de Trabajo son utilizados para el procesamiento de diferentes ítems, un retraso con respecto al tiempo de suministro planificado puede aumentar el tiempo de cola de otro ítem, si bien este efecto puede verse más o menos compensado

⁵ Hemos despreciado, inicialmente, el efecto de los lotes en proceso de fabricación sobre la probabilidad de cumplimiento.

⁶ Véase, por ejemplo, Haber y Runyon (1973, pp. 168-170), Canavos (1998, pp. 32-45), Narvaiza y otros (1998, pp. 210-212), Bárcenas y otros (2003, pp. 167-172) o Evans y Rosenthal (2005, pp. 39-43).

según la Regla de Secuenciación utilizada⁷. Por ello sólo podremos considerar que tienen un comportamiento independiente aquellos ítems que no compartan ningún Centro de Trabajo.

Para poder interpretar la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga, indicada en la expresión (4.27), es preciso desarrollar sus componentes, así como cada uno de los elementos que surjan durante este proceso.

El Plan de Carga elaborado para un ítem j está compuesto por la Planificación de Capacidad de todos los lotes de dicho ítem incluidos en el Plan de Materiales, que serán, como máximo, tantos como periodos tenga el horizonte de planificación. Por este motivo, será preciso que se cumpla la planificación para cada uno de dichos lotes. Teniendo en cuenta que su cumplimiento está relacionado entre sí (ya que utilizan los mismos Centros de Trabajo), esto implica afirmar que:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Cumpla } PC_j) &= \bigcap_{l=1}^{HP} P(\text{Cumpla } PC_{j_l}) \\
 &= P(\text{Cumpla } PC_{j_1} \cap \text{Cumpla } PC_{j_2} \cap \dots \cap \text{Cumpla } PC_{j_{HP}}) = \\
 &= P(\text{Cumpla } PC_{j_1}) \times P(\text{Cumpla } PC_{j_2} / \text{Cumpla } PC_{j_1}) \times \dots \times \\
 &\times P(\text{Cumpla } PC_{j_{HP}} / \text{Cumpla } PC_{j_1} \cap \dots \cap \text{Cumpla } PC_{j_{HP-1}})
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Si consideramos que, para que se cumpla el Plan de Carga de un ítem es necesario que esto ocurra para cada uno de los periodos que comprende su tiempo de suministro, la probabilidad de cumplimiento para un lote emitido en el periodo l , del ítem j , sería la siguiente:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Cumpla } PC_{j_l}) &= \bigcap_{p=1}^{P_{Oj_l}} P(\text{Cumpla } PC_{j_l p}) \\
 &= P(\text{Cumpla } PC_{j_l 1} \cap \text{Cumpla } PC_{j_l 2} \cap \dots \cap \text{Cumpla } PC_{j_l P_{j_l}}) = \\
 &= P(\text{Cumpla } PC_{j_l 1}) \times P(\text{Cumpla } PC_{j_l 2} / \text{Cumpla } PC_{j_l 1}) \times \dots \times \\
 &\times P(\text{Cumpla } PC_{j_l P_{j_l}} / \text{Cumpla } PC_{j_l 1} \cap \dots \cap \text{Cumpla } PC_{j_l P_{j_l}-1}) = \\
 &= P(\text{Cumpla } PC_{j_l 1}) \times \prod_{p=2}^{P_{Oj_l}} P(\text{Cumpla } PC_{j_l p} / \text{Cumpla } PC_{j_l h} \quad \forall h \quad / \quad h < p)
 \end{aligned} \tag{4.29}$$

⁷ Véase Tabla 3.1., del Capítulo 3 de este trabajo.

Donde h pertenece a los números naturales (tomando valores desde 1 a P_{Qjl}) y P_{Qjl} es el total de periodos que comprende el tiempo de suministro del ítem j , calculado como:

$$P_{Qjl} = E\left(\frac{TS_{Qjl}}{Tp}\right) + 1 \quad (4.30)$$

Expresión en la que TS_{Qjl} refleja el tiempo de suministro de un lote de tamaño Q del ítem j emitido en el periodo l .

Además de cumplirse la carga por cada periodo del horizonte de planificación, también hemos establecido que se debe cumplir por Centro de Trabajo. Para seguir desagregando la expresión (4.29), debemos resaltar que los desplazamientos de la carga de un periodo pueden originar traslados del tiempo de suministro, tales que provoquen movimientos de las cargas asignadas a periodos limítrofes. Es decir, el incumplimiento del Plan de Carga para un lote de un ítem en un periodo, condiciona el del cubo de tiempo siguiente, independientemente del Centro de Trabajo en el que se realicen las operaciones que provocan carga en dicho periodo, ya que puede originar desviaciones. Por ejemplo, el retraso en la ejecución de una operación que se realiza en el periodo 1, puede derivar en el desplazamiento de la carga asignada al periodo 2. Con ello observamos la dependencia existente entre las probabilidades de cumplimiento de los distintos periodos que conforman el tiempo de suministro de un lote de un determinado ítem.

Dado que el tiempo de carga forma parte del tiempo de suministro necesario para estimar el periodo al que se asigna la carga, uno y otro elemento están relacionados y, por tanto, son dependientes. La probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga para un lote l de un ítem j y un periodo p , en los M Centros de Trabajo, será:

$$\begin{aligned} P(\text{Cumpla } PC_{jlp}) &= \bigcap_{k=1}^M P(\text{Cumpla } PC_{j, kp}) = \\ &= \bigcap_{k=1}^M P(\text{Cumpla carga}_{Qj, kp} \cap \text{Cumpla periodo asignado}_p) = \\ &= \bigcap_{k=1}^M \left[P(\text{Cumpla carga}_{Qj, kp}) \times \right. \\ &\quad \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_p / \text{Cumplida la carga}_{Qj, kp}) \right] \end{aligned} \quad (4.31)$$

Dadas las características de la carga [véase expresión (4.2)], observamos que la única relación de ésta con el resto de cargas, es a través de las tasas de llegada de todas las operaciones que se realizan en el mismo Centro de Trabajo. No obstante, las variaciones del valor de las cargas y/o del periodo de asignación, no afectan al número de lotes de cada tipo de ítem que llegan por unidad de tiempo, el cual está directamente relacionado con la Planificación de la Producción. Este hecho nos hace considerar que el cumplimiento del valor de la carga originada por un lote determinado j_i en el periodo p y Centro de Trabajo k , es independiente de la cuantía de las cargas de otros lotes, periodos o Centros, por lo que la expresión anterior resultaría:

$$P(\text{Cumpla } PC_{j_i p}) = \left[\prod_{k=1}^M P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{j_i k p}}) \right] \times \quad (4.32)$$

$$\times P(\text{Cumpla periodo asignado }_p / \text{Cumplidas la cargas }_{Q_{j_i k p}} \forall k)$$

En esta expresión, para el caso de un lote del ítem j , que origina necesidades de capacidad en el Centro de Trabajo k y en el periodo p , en el que se han realizado totalmente desde la operación n a la m , la probabilidad de cumplimiento del valor de la carga prevista será, basándonos en la expresión (4.2):

$$P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{j_i k p}}) = P(C_{Q_{j_i k p}} = \overline{C_{Q_{j_i k p}}}) = \quad (4.33)$$

$$= P(C_{Q_{j_i k p}} = \sum_{i=n}^m \left[(\overline{te_i} \times Q_{j_i} \times \overline{v_i}) + \overline{tp_{ik}} \times (1 - \frac{\overline{\lambda_{ik}}}{\lambda_k}) \right])$$

Lógicamente, el valor de esta probabilidad será cero si la carga es una variable aleatoria continua, lo cual es una hipótesis racional, ya que el tiempo como tal, es continuo. Por ello sería necesario establecer un intervalo dentro del cual se permita la variación de los tiempos de carga incluidos en cada periodo.

Agrupando todas las consideraciones realizadas en las expresiones (4.28), (4.29) y (4.31), podemos reflejar la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga, sustituyéndolas en la expresión (4.27), de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
P(\text{Cumpla Plan de Carga}) &= \bigcap_{j=1}^J P(\text{Cumpla } PC_j) = \\
&= \bigcap_{j=1}^J \bigcap_{l=1}^{HP} P(\text{Cumpla } PC_{j_l}) = \\
&= \bigcap_{j=1}^J \bigcap_{l=1}^{HP} \left[P(\text{Cumpla } PC_{j_l}) \times \right. \\
&\quad \left. \times \prod_{p=2}^{P_{j_l}} P(\text{Cumpla } PC_{j_l p} / \text{Cumpla } PC_{j_l h} \forall h / h < p) \right] = \\
&= \bigcap_{j=1}^J \bigcap_{l=1}^{HP} \left\{ \left[\prod_{k=1}^M P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{j_l k 1}}) \right] \times \right. \\
&\quad \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_1 / \text{Cumplida carga } a_{Q_{j_l k 1}} \forall k) \right\} \times \\
&\quad \left\{ \prod_{p=2}^{P_{j_l}} \left[\prod_{k=1}^M P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{j_l k p}}) \right] \times \right. \\
&\quad \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_p / \text{Cumplidas cargas } a_{Q_{j_l k h}} \right. \\
&\quad \left. \text{y periodo}_h \forall k \text{ y } \forall h / h < p) \right\} \Bigg\} \quad (4.34)
\end{aligned}$$

La fórmula de cálculo de la probabilidad de cumplimiento de la carga puede complicarse, en mayor o menor medida, en función del número y distribución de las operaciones dentro de cada periodo.

Con objeto de analizar más profundamente las variables que inciden en la probabilidad de cumplimiento, realizaremos una serie de simplificaciones con respecto a la independencia de los cumplimientos del Plan de Carga de un ítem con otros con los que comparta algún Centro de Trabajo, así como de la planificación elaborada para los distintos lotes de un mismo artículo. Esta decisión originará que la fiabilidad que obtengamos tenga un valor superior al real⁸, es decir que, **si demostramos que el riesgo de incumplimiento del Plan de Carga es alto, el verdadero nivel de fiabilidad será inferior al obtenido como resultado del estudio**. Bajo estas consideraciones la expresión (4.34) quedará:

⁸ Dado que siempre se cumple que: $P(A/B) \leq P(A)$.

$$\begin{aligned}
P(\text{Cumpla Plan de Carga}) &= \prod_{j=1}^J P(\text{Cumpla } PC_j) = \\
&= \prod_{j=1}^J \prod_{l=1}^{HP} P(\text{Cumpla } PC_{j_l}) = \\
&= \prod_{j=1}^J \prod_{l=1}^{HP} \left[P(\text{Cumpla } PC_{j_l1}) \times \right. \\
&\quad \left. \times \prod_{p=2}^{P_{j_l}} P(\text{Cumpla } PC_{j_l p} / \text{Cumpla } PC_{j_l h} \forall h / h < p) \right] = \\
&= \prod_{j=1}^J \prod_{l=1}^{HP} \left\{ \left[\prod_{k=1}^M P(\text{Cumpla } carga_{Q_{j_l k1}}) \right] \times \right. \\
&\quad \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_1 / \text{Cumplida } carga_{Q_{j_l k1}} \forall k) \right\} \times \\
&\quad \left\{ \left[\prod_{k=1}^M P(\text{Cumpla } carga_{Q_{j_l kp}}) \right] \times \right. \\
&\quad \left. \times \prod_{p=2}^{P_{j_l}} \left[\times P(\text{Cumpla periodo asignado}_p / \text{Cumplidas } cargas_{Q_{j_l kh}} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. y \text{ periodo}_h \forall k \text{ y } \forall h / h < p) \right] \right\} \quad (4.35)
\end{aligned}$$

Para poder determinar la probabilidad de que se cumpla el Plan de Carga planificado es preciso, en primer lugar, conocer éste. Es decir, es necesario haber calculado y distribuido en el tiempo, los valores medios de los distintos elementos que componen el tiempo de suministro de cada uno de los lotes incluidos en el Plan de Materiales. Con esta información se determinarán, para cada periodo que comprende el plazo de entrega planificado, las condiciones que deben cumplir las variables aleatorias que se ubican dentro de él, para evitar cambios en el valor de la carga o desplazamientos de ésta (reflejados en los Apartados 4.2.1. y 4.2.2.).

Este procedimiento fue el seguido en la Figura 4.1. (ver Apartado 4.2.2.1.), donde se planifica el tiempo de suministro de un único lote del ítem j^9 , para el que se realizan tres operaciones, que precisan dos Centros de Trabajo, y que se distribuyen en tres periodos. Si el Plan de Materiales estuviese compuesto por este único lote, la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga, basándonos en la expresión (4.35), será:

⁹ Por este motivo no se ha indicado el periodo de emisión del lote en la expresión (4.36).

$$\begin{aligned}
P(\text{Cumpla Plan de Carga}) &= \\
&= \left\{ \left[\prod_{k=1}^2 P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{k1}}) \right] \times \right. \\
&\quad \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_1 / \text{Cumplida carga } a_{Q_{k1}}) \right\} \times \\
&\quad \times \prod_{p=2}^3 \left\{ \left[\prod_{k=1}^2 P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{kp}}) \right] \times \right. \\
&\quad \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_p / \text{Cumplidas cargas } a_{Q_{kh}} \text{ y } \right. \\
&\quad \left. \text{periodo}_h \forall k \text{ y } \forall h / h < p) \right\} = \\
&= \left\{ \left[P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{11}}) \times P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{21}}) \right] \times \right. \\
&\quad \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_1 / \text{Cumplida carga } a_{Q_{11}}) \right\} \times \\
&\quad \times \left\{ \left[P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{12}}) \times P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{22}}) \times \right. \right. \\
&\quad \left. \left. P(\text{Cumpla periodo asignado}_2 / \text{Cumplidas cargas } a_{Q_{11}} \text{ y } \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \text{periodo}_1, \text{ y carga } a_{Q_{22}}) \right] \right\} \times \\
&\quad \times \left\{ \left[P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{13}}) \times P(\text{Cumpla carga } a_{Q_{23}}) \times \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_3 / \text{Cumplidas cargas } a_{Q_{11}} \text{ y } \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \text{periodo}_1, \text{ carga } a_{Q_{22}} \text{ y periodo}_2, \text{ y carga } a_{Q_{23}}) \right] \right\} \quad (4.36)
\end{aligned}$$

A efectos de desarrollar esta probabilidad utilizaremos las expresiones (4.2), (4.9), (4.12) y (4.13), las cuales reflejan:

- La carga por periodo y Centro de Trabajo [expresión (4.2)].
- Los límites para que la operación O1 no se desplace al periodo siguiente y O2 no se traslade al periodo 1 [expresión (4.9)].
- El intervalo de variación si, una vez cumplidas las condiciones de (4.9), no se desea que O2 se desplace de su periodo y, a su vez, no entre en él carga proveniente de O3 [expresión (4.12)].
- El margen de variación permitido para que, cumplidos los límites establecidos en las expresiones (4.9) y (4.12), no se produzca retraso en el plazo de entrega [expresión (4.13)].

Por tanto, dichos intervalos reflejan valores condicionados, definiendo los márgenes de variación permitidos en un periodo para que se cumpla la asignación planificada, considerando que ésta se hubiese cumplido en los periodos anteriores.

Sustituyendo las expresiones (4.2), (4.9), (4.12) y (4.13), en (4.36), obtendremos que la probabilidad de cumplimiento del ejemplo seguido es:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Cumpla Plan de Carga}) &= \left[P(C_{Q11} = \overline{C_{Q11}}) \times \right. \\
 &\times P\left(Tp - Td_{Q1j1} - Tcola_{2j2} \leq Tconf_j + Tdm_{Qj} + Tcola_{1j1} + \frac{\overline{C_{Q11}}}{E_{11} \times U_{11}} \leq Tp\right) \times \\
 &\times \left[P(C_{Qj22} = \overline{C_{Qj22}}) \times P\left(Tp - Td_{Q2j2} - Tcola_{3j1} \leq \right. \right. \\
 &\left. \left. Td_{Q1j12} + Tcola_{2j22} + \frac{\overline{C_{Qj22}}}{E_{22} \times U_{22}} \leq Tp\right) \right] \times \\
 &\times \left[P(C_{Qj13} = \overline{C_{Qj13}}) \times P\left(Td_{Q2j23} + Tcola_{3j13} + \frac{\overline{C_{Qj13}}}{E_{13} \times U_{13}} + \right. \right. \\
 &\left. \left. + Tesp_j + Tinsp_{Qj} + Td_{Q3j1} \leq Tp\right) \right] = \\
 &= \left\{ P(C_{Q11} = \overline{C_{Q11}}) \times \left[P\left(Tconf_j + Tdm_{Qj} + Tcola_{1j1} + \frac{\overline{C_{Q11}}}{E_{11} \times U_{11}} \leq Tp\right) - \right. \right. \\
 &\left. \left. - P\left(Tconf_j + Tdm_{Qj} + Tcola_{1j1} + \frac{\overline{C_{Q11}}}{E_{11} \times U_{11}} \leq Tp - Td_{Q1j1} - Tcola_{2j2}\right) \right] \right\} \times \\
 &\times \left\{ P(C_{Qj22} = \overline{C_{Qj22}}) \times \left[P\left(Td_{Q1j12} + Tcola_{2j22} + \frac{\overline{C_{Qj22}}}{E_{22} \times U_{22}} \leq Tp\right) - \right. \right. \\
 &\left. \left. - P\left(\frac{\overline{C_{Qj22}}}{E_{22} \times U_{22}} \leq Tp - Td_{Q2j2} - Tcola_{3j1}\right) \right] \right\} \times \\
 &\times \left[P(C_{Qj13} = \overline{C_{Qj13}}) \times P\left(Td_{Q2j23} + Tcola_{3j13} + \right. \right. \\
 &\left. \left. + \frac{\overline{C_{Qj13}}}{E_{13} \times U_{13}} + Tesp_j + Tinsp_{Qj} + Td_{Q3j1} \leq Tp\right) \right] =
 \end{aligned} \tag{4.37}$$

Para calcular la probabilidad de que se cumpla el periodo de asignación de la carga, una vez que la estimación de ésta ha sido correcta [$P(\text{Cumpla periodo/Cumplida carga})$], ha sido preciso cambiar la unidad de medida de la

capacidad necesaria, dividiéndola por los factores de eficiencia y utilización, con objeto de igualarla a la utilizada para la duración del periodo. A este respecto, es preciso concretar que, si bien para la planificación se utiliza un valor medio de dichos factores, normalmente en función de cada Centro de Trabajo, el valor real de éstos también depende del periodo objeto de estudio, por lo que se han utilizado E_{kp} y U_{kp} .

Se pone de manifiesto, observando la expresión (4.37), que la fiabilidad del Plan de Carga se basa en diferencias y productos de probabilidades, que toman valores entre cero y uno. Por ello resulta complicado que se consigan bajos niveles de riesgo de incumplimiento, aún cuando nos encontremos con casos tan simples como el utilizado de ejemplo.

Para apreciar con más detalle la aleatoriedad de la Planificación de Capacidad, aplicaremos la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga a un ejemplo un poco más complejo que el utilizado en el apartado anterior, si bien no se acerca a la realidad empresarial por su nivel de simplicidad.

Utilizaremos, con este fin, el caso de una empresa que sólo elabora dos ítems, A y B, y que trabaja bajo entornos MRP, donde utiliza un horizonte de planificación de cuatro periodos. El Plan de Materiales establecido con el lanzamiento de pedidos planificados para cada ítem, es el reflejado en la Tabla 4.1., el cual origina el Plan de Carga indicado en la Tabla 4.2., que es el resultado de la planificación desarrollada en la Figura 4.3.

Periodo	1	2	3	4
Lanzamiento Pedidos Planif. A	200		300	
Lanzamiento Pedidos Planif. B		100		

Tabla 4.1. Ejemplo de Plan de Materiales.

Periodo		1	2	3	4
Centro de Trabajo 1	Carga 200A		10	20	40
	Carga 300A				10
	Carga 100B				45
	Total Carga CT1		10	20	95
Centro de Trabajo 2	Carga 200A			35	
	Carga 300A				
	Carga 100B			20	25
	Total Carga CT2			55	25

Tabla 4.2. Ejemplo de Plan de Carga (valores en horas estándar).

Periodo 1	Periodo 2				Periodo 3				Periodo 4			
200 A	$\overline{Tconf}$	$\overline{Tdm}$	$\overline{Tcola_1}$	$\overline{Tc_{1A1}}$	$\overline{Td_1}$	$\overline{Tcola_2}$	$\overline{Tc_{2A2}}$	$\overline{Td_2}$	$\overline{Tcola_3}$	$\overline{Tc_{3A1}}$	$\overline{Tesp_3}$	
	10				20	35		40				
300 A									$\overline{Tconf}$	$\overline{Tdm}$	$\overline{Tcola_1}$	$\overline{Tc_{1A1}}$
									10			
100 B					$\overline{Tconf}$	$\overline{Tdm}$	$\overline{Tcola_4}$	$\overline{Tc_{4B2}}$	$\overline{Td_4}$	$\overline{Tcola_5}$	$\overline{Tc_{5B1}}$	
					20		25	45				

Figura 4.3. Ejemplo de planificación mediante *forward scheduling*.

Con respecto a la Figura 4.3., es conveniente hacer dos aclaraciones:

- La primera es que los valores indicados debajo de los tiempos de carga reflejan la capacidad necesaria, en unidades estándar, originada por la realización de una operación al lote, en los distintos periodos.
- La segunda, es que se han simplificado los subíndices de los tiempos (excepto del tiempo de carga), aunque, para el cálculo de la probabilidad de cumplimiento, utilizaremos su nomenclatura completa.

Dadas estas consideraciones, sustituyendo en la expresión (4.35) los valores de las cargas, según la fórmula (4.2), los intervalos de variación de ésta, basados en las expresiones (4.15), (4.22), (4.23), (4.24) y de acuerdo a la representación gráfica de la Figura 4.3., la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga reflejado en la Tabla 4.2., será:

$$\begin{aligned}
P(\text{Cumpla Plan de Carga}) = & \left[\left[\prod_{k=1}^2 P(\text{Cumpla carga}_{Q_{j,k2}}) \right] \times \right. \\
& \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_2 / \text{Cumplida carga}_{Q_{j,k2}} \forall k) \right] \\
= & \prod_{j=1}^2 \prod_{l=1}^4 \left[\left[\prod_{k=1}^2 P(\text{Cumpla carga}_{Q_{j,kp}}) \right] \times \right. \\
& \left. \times \prod_{p=3}^4 \left[\times P(\text{Cumpla periodo asignado}_p / \text{Cumplidas cargas}_{Q_{j,kh}} \right. \right. \\
& \left. \left. y \text{ periodo}_h \forall k y \forall h / h < p) \right] \right] = \\
& \left[\left[P(C_{200A_12} = 10) \times P(Tconf_A + Tdm_{200A_1} + Tcola_{1A_1} + \frac{10}{E_{12} \times U_{12}} = Tp) \right] \times \right. \\
& \left[\left[P(C_{200A_13} = 20) \times P(C_{200A_123} = 35) \times \right. \right. \\
& \left. \left. \times P(Tp - Td_{200'2A_12} - Tcola_{3A_1} \leq \frac{20}{E_{13} \times U_{13}} + Td_{200'1A_1} + \right. \right. \\
& \left. \left. + Tcola_{2A_2} + \frac{35}{E_{23} \times U_{23}} \leq Tp) \right] \right. \\
& \left. \times \left[P(C_{200A_14} = 40) \times P(Td_{200'2A_124} + Tcola_{3A_1} + \frac{40}{E_{14} \times U_{14}} \leq Tp) \right] \right] \\
& \times \left[P(C_{300A_314} = 10) \times P(Tconf_A + Tdm_{300A_3} + Tcola_{1A_1} + \frac{10}{E_{14} \times U_{14}} = Tp) \right] \times \\
& \left[P(C_{100B_223} = 20) \times P(Tconf_B + Tdm_{100B_2} + Tcola_{2A_2} + \frac{20}{E_{23} \times U_{23}} = Tp) \right] \times \\
& \left[\left[P(C_{100B_224} = 25) \times P(C_{100B_214} = 45) \times \right. \right. \\
& \left. \left. \times P(\frac{25}{E_{24} \times U_{24}} + Td_{100'4A_22} + Tcola_{5A_1} + \frac{45}{E_{14} \times U_{14}} = Tp) \right] \right] \quad (4.38)
\end{aligned}$$

Podemos desarrollar aún más esta expresión si suponemos que el cubo de tiempo tiene, por ejemplo, una amplitud de 120 horas reales, de manera que operando, la expresión anterior resultante es la (4.39).

$$\begin{aligned}
P(\text{Cumpla Plan de Carga}) = & \left[P(C_{200A_{12}} = 10) \times P(Tconf_A + Tdm_{200A_1} + Tcola_{1A1} + \frac{10}{E_{12} \times U_{12}} = 120) \right] \times \\
= & \left\{ \left[P(C_{200A_{13}} = 20) \times P(C_{200A_{23}} = 35) \times \right. \right. \\
& \left. \left[P(\frac{20}{E_{13} \times U_{13}} + Td_{200'1A1} + Tcola_{2A2} + \frac{35}{E_{23} \times U_{23}} \leq 120) - \right. \right. \\
& \left. \left. P(\frac{20}{E_{13} \times U_{13}} + Td_{200'1A1} + Tcola_{2A2} + \frac{35}{E_{23} \times U_{23}} \leq 120 - Td_{200'2A2} - Tcola_{3A1}) \right] \right\} \times \\
& \left[P(C_{200A_{14}} = 40) \times P(Td_{200'2A2} + Tcola_{3A1} + \frac{40}{E_{14} \times U_{14}} \leq 120) \right] \\
\times & \left[P(C_{300A_{14}} = 10) \times P(Tconf_A + Tdm_{300A_3} + Tcola_{1A1} + \frac{10}{E_{14} \times U_{14}} = 120) \right] \times \\
& \left[P(C_{100B_{23}} = 20) \times P(Tconf_B + Tdm_{100B_2} + Tcola_{2A2} + \frac{20}{E_{23} \times U_{23}} = 120) \right] \times \\
& \left[P(C_{100B_{24}} = 25) \times P(C_{100B_{14}} = 45) \times \right. \\
& \left. \left[P(\frac{25}{E_{24} \times U_{24}} + Td_{100'4A2} + Tcola_{5A1} + \frac{45}{E_{14} \times U_{14}} = 120) \right] \right\} \quad (4.39)
\end{aligned}$$

Del análisis de la probabilidad de cumplimiento del ejemplo de Plan de Carga utilizado, se puede observar que ésta se ve afectada por distintas variables que tienen un carácter aleatorio y que están interrelacionadas:

- El tiempo de carga de todas las operaciones que se ejecutan en el horizonte de planificación, el cual es la base para el cálculo de $C_{Qj, kp}$ que, como se vio en la expresión (4.2), es resultado de la conjunción de los tiempos de ejecución (te_i) y preparación (tp_{ik}), factor de aprovechamiento acumulado (v_i) y tasas de llegada (λ_{ik}) de todas las operaciones que se ejecutan en el Centro de Trabajo.
- Los tiempos de cola ($Tcola_{ijk}$), para el procesamiento de todas las operaciones que se realicen en los distintos periodos planificados,

incidiendo el tiempo de carga, sobre este elemento, a través de la tasa de salida¹⁰.

- Los tiempos de desplazamiento de los lotes ($Td_{Qij,k}$), para el traslado entre las distintas operaciones ejecutadas en el horizonte de planificación, los cuales, en caso de que sea necesaria la preparación del elemento de transporte, pueden verse influidos por la tasa de salida del Centro del Trabajo y con ello por el tiempo de carga¹¹.
- Por último, aun cuando no se aprecia en la expresión (4.39), también pueden incidir sobre la fiabilidad del Plan de Carga: el tiempo de espera ($Tesp_j$), influido por los tiempos de desplazamiento y tasas de llegada al Centro de Trabajo¹², y el tiempo de inspección ($Tinsp_{Q_i}$) que, como el tiempo de espera, para el ejemplo desarrollado, se ha considerado que se produce al final de la ruta.

Dado que, con objeto de realizar una aproximación a la aleatoriedad del Plan de Carga, se han considerado como independientes el cumplimiento de la planificación de los lotes de los distintos ítems y, puesto que realmente la relación existente es de dependencia, el riesgo de incumplimiento del Plan de Carga es aún superior al reflejado en este estudio.

4.3. LAS DESVIACIONES DEL PLAN DE CAPACIDAD CRP

El Plan de Capacidad refleja la capacidad disponible por periodo, siendo necesario para su cálculo, disponer de datos de distintos elementos que actúan como variables aleatorias.

CRP calcula los Planes de Capacidad por Centro de Trabajo (Apartado 2.4. y Anexo 2), por lo que, en el proceso de cálculo de las disponibilidades de capacidad es necesario conocer, para cada uno de ellos:

¹⁰ Véase el Apartado 3.4.1.8.

¹¹ Véase el Apartado 3.6.

¹² Analizado en el Apartado 3.5.5.

- El total de máquinas de que dispone, especificando el número de equipos destinados a las distintas operaciones y si hay diferencias entre ellos que afecten a su eficiencia.
- El personal que compone el Centro de Trabajo, indicando el número de personas necesarias para la ejecución de una operación y para el funcionamiento de los equipos.
- Los días laborables en cada periodo, número de turnos y duración de éstos.
- Los factores de utilización y eficiencia.

El número de máquinas o equipos productivos con los que cuenta un Centro de Trabajo suele mantenerse fijo durante el horizonte de planificación y, en caso contrario, se suele disponer de información referente a reducciones o ampliaciones de capacidad, con suficiente anterioridad como para reflejarlo en el Plan de Capacidad. Sin embargo, pueden producirse paradas involuntarias debidas a roturas o necesidad de mantenimiento de las máquinas. No obstante, estos tiempos ya están incluidos en el factor utilización¹³ por lo que, para no duplicar su efecto, se considera que el total de máquinas se mantiene constante.

También el número de personas que trabajan durante cada periodo puede variar debido a bajas o altas laborales, en función de la política de la empresa, las cuales deberán ser comunicadas previamente para su incorporación al Plan de Capacidad. Existen, no obstante, algunas reducciones de personal que no se pueden prever con seguridad, como son las debidas al absentismo laboral, las cuales también están consideradas dentro del factor utilización¹⁴.

En lo que se refiere a los días laborables, número y duración de los turnos, éstos suelen estar determinados por la empresa o por convenio colectivo, en su caso, siendo poco probable su variación dentro del horizonte de planificación de CRP.

¹³ Así, “hay muchos tipos de actividad que se producen en el entorno productivo que originan paradas en el Centro de Trabajo: rotura de máquinas, limpieza, reuniones de empleados y otras actividades” (Lunn y Neff, 1992, p. 144). Véase también, Wemmerlöv (1984, p. 7), Blackstone (1989, pp. 20-21), Ptack (1997, p. 168) o Slack (1997, p. 16).

¹⁴ Véase, por ejemplo, Wemmerlöv (1984, p. 7), (Lunn y Neff, 1992, p. 144), Blackstone (1989, pp. 20-21), Ptack (1997, p. 168) o Slack (1997, p. 16).

En último lugar, como ya se ha mencionado en otros puntos de este trabajo, los factores utilización y eficiencia tienen un carácter aleatorio. Recordemos que el primero de ellos indica el “*porcentaje de tiempo en el que un Centro de Trabajo está produciendo, en comparación con el tiempo total*” (Lunn y Neff, 1992, p. 144)¹⁵, por lo que incluye cualquier parada o pérdida de tiempo. Mientras que el factor eficiencia refleja la diferencia de destreza y rapidez de movimientos entre distintos trabajadores, máquinas o equipos productivos¹⁶.

La capacidad disponible media para un Centro de Trabajo k , que dispone de T turnos de trabajo, para el periodo p , en unidades estándar, se puede calcular como:

$$\overline{CD}_{kp} = \sum_{t=1}^T \left[u.r._{kt} \times \left[\min \left(\frac{n^{\circ} \text{trab } maq_{kt}}{n^{\circ} \text{trab por } maq_{kt}}, n^{\circ} maq_{kt} \right) + n^{\circ} \text{trab}_{kt} \right] \right] \quad (4.40)$$

$\times \text{días laborables del periodo}_p \times \overline{E}_k \times \overline{U}_k$

Donde:

- $u.r._{kt}$ = número de unidades reales del turno t del Centro de Trabajo k .
- $n^{\circ} \text{trab } maq_{kt}$ = número de trabajadores que necesitan de una máquina para ejercer su trabajo en el turno t del Centro de Trabajo k .
- $n^{\circ} \text{trab por } maq_{kt}$ = número de trabajadores necesarios para poner en funcionamiento cada máquina que compone el Centro de Trabajo k , en el turno t .
- $n^{\circ} maq_{kt}$ = número total de máquinas que se podrían utilizar en el turno t del Centro de Trabajo k .
- $n^{\circ} \text{trab}_{kt}$ = número de trabajadores del turno t del Centro de Trabajo k a los que no les afecta la disponibilidad de máquinas para trabajar y que pueden realizar su trabajo ya sea individualmente o en grupo (si una tarea precisa del trabajo conjunto con otros compañeros se considerará, a efectos del cálculo de la capacidad, como uno solo).

¹⁵ Véase también Wemmerlöv (1984, pp. 8-9), Blackstone, (1989, pp. 20-21) o Ptak, (1997, p. 168).

¹⁶ Véase, por ejemplo, Wemmerlöv (1984, p. 8), Lunn y Neff (1992, pp. 144-145), Ptak (1997, p. 168) o Slack (1997, p. 16).

Dado que las únicas variables aleatorias en la expresión anterior, son la eficiencia y la utilización, la probabilidad de que se cumpla el Plan de Capacidad y, por tanto, la probabilidad de que capacidad disponible real coincida con su valor medio, considerando independiente el cumplimiento de las disponibilidades de los distintos periodos¹⁷, será:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Cumpla Plan Capacidad}) &= P(\text{Cumpla Capacidad Disponible}) = \\
 &= \prod_{k=1}^M \prod_{p=1}^{HP} P(CD_{kp} = \overline{CD}_{kp}) = \prod_{k=1}^M \prod_{p=1}^{HP} P(E_{kp} \times U_{kp} = \overline{E}_k \times \overline{U}_k) = \\
 &= \prod_{k=1}^M \prod_{p=1}^{HP} P(E_{kp} \times U_{kp} = \overline{E}_k \times \overline{U}_k)
 \end{aligned} \tag{4.41}$$

Donde *HP* es el número de periodos que comprende el horizonte de planificación. Con respecto a los valores reales del producto de eficiencia y utilización, aun cuando para la planificación se tomó en consideración únicamente su relación con los Centros de Trabajo, para el cálculo de la probabilidad se ha diferenciado, además, la cuantía real de estos factores en función del periodo estudiado.

La variabilidad de los factores de eficiencia y utilización inciden, por partida doble, en la probabilidad de cumplimiento de la planificación elaborada mediante CRP: a través del Plan de Carga [véanse los ejemplos reflejados en las expresiones (4.37) y (4.39)] y del Plan de Capacidad [expresión (4.41)].

4.4. LA PROBABILIDAD DE CUMPLIMIENTO DE LA PLANIFICACIÓN REALIZADA A TRAVÉS DE CRP

Tras observar la aleatoriedad de los planes elaborados mediante CRP, nos interesa conocer la probabilidad de que el Plan de Carga y el de Capacidad se cumplan simultáneamente, lo que sería representativo del nivel de fiabilidad obtenido mediante esta técnica.

Dado que la probabilidad de cumplimiento del Plan de Capacidad [expresión (4.34)] depende únicamente del producto de los factores eficiencia y utilización, que también inciden en el cálculo de la carga en unidades reales,

¹⁷ El hecho de que en un periodo no coincida la capacidad disponible con la real no incide sobre el cumplimiento de la disponibilidad en otros periodos.

(cálculo necesario para determinar el cumplimiento del periodo de asignación de ésta), podemos decir que existe dependencia entre los Planes de Capacidad y Carga. Por tanto, la probabilidad de cumplimiento de la planificación elaborada mediante CRP, para todo el horizonte de planificación (HP) y todos los lotes incluidos en el Plan de Materiales, se puede expresar, basándonos en las expresiones (4.34) y (4.41), como:

$$\begin{aligned}
 &P(\text{Cumpla planificación CRP}) = \\
 &= P(\text{Cumpla Plan Capacidad} \cap \text{Cumpla Plan Carga}) = \\
 &= P(\text{Cumpla Plan Capacidad}) \times \\
 &\times P(\text{Cumpla Plan Carga} / \text{Cumpla Plan Capacidad}) = \\
 &= \prod_{k=1}^M \prod_{p=1}^{HP} P(E_{kp} \times U_{kp} = \overline{E_k} \times \overline{U_k}) \times \\
 &\times \prod_{j=1}^J \prod_{l=1}^{HP} \left[P(\text{Cumpla } PC_{j,1}) \times \right. \\
 &\left. \times \prod_{p=2}^{P_{Qj}} P(\text{Cumpla } PC_{j,p} / \text{Cumpla } PC_{j,h} \forall h / h < p) \right] = \\
 &= \prod_{k=1}^M \prod_{p=1}^{HP} P(E_{kp} \times U_{kp} = \overline{E_k} \times \overline{U_k}) \times \\
 &\times \prod_{j=1}^J \prod_{l=1}^{HP} \left\{ \left[\prod_{k=1}^M P(\text{Cumpla carga}_{Qj,k1}) \right] \times \right. \\
 &\left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_1 / \text{Cumplida carga}_{Qj,k1} \forall k) \right\} \times \\
 &\left\{ \left[\prod_{k=1}^M P(\text{Cumpla carga}_{Qj,kp}) \right] \times \right. \\
 &\left. \times \prod_{p=2}^{P_{Qj}} \left[P(\text{Cumpla periodo asignado}_p / \text{Cumplidas cargas}_{Qj,kh} \right. \right. \\
 &\left. \left. y \text{ periodo}_h \forall k y \forall h / h < p) \right] \right\} \quad (4.42)
 \end{aligned}$$

La relación entre capacidad y carga se puede observar en el ejemplo desarrollado a partir de la Figura 4.3. [para el que se calculó la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga mediante la expresión (4.39)], donde supuestos unos valores del producto de los factores de eficiencia y utilización ($\overline{E_k} \times \overline{U_k}$), reflejados en la Tabla 4.3., se puede calcular la probabilidad de cumplimiento de la

planificación elaborada mediante CRP, adaptando la expresión (4.39)¹⁸ e incluyéndola en la (4.42).

Periodo	1	2	3	4
Centro de Trabajo 1	0,7	0,64	0,57	0,8
Centro de Trabajo 2	0,64	0,6	0,75	0,86

Tabla 4.3. Ejemplo de valores de $\overline{E_k} \times \overline{U_k}$ por periodos y Centros de Trabajo.

$$\begin{aligned}
 &P(\text{Cumpla planificación CRP}) = \\
 &= P(E_{11} \times U_{11} = 0,7) \times P(E_{12} \times U_{12} = 0,64) \times P(E_{13} \times U_{13} = 0,57) \times \\
 &\times P(E_{14} \times U_{14} = 0,8) \times P(E_{21} \times U_{21} = 0,64) \times P(E_{22} \times U_{22} = 0,6) \times \\
 &\times P(E_{23} \times U_{23} = 0,75) \times P(E_{24} \times U_{24} = 0,86) \times \\
 &\times \left[\left[P(C_{200A_12} = 10) \times P(Tconf_A + Tdm_{200A_1} + Tcola_{1A1} + \frac{10}{0,64} = 120) \right] \times \right. \\
 &\times \left[\left[P(C_{200A_13} = 20) \times P(C_{200A_123} = 35) \times \right. \right. \\
 &\times \left[\left[P\left(\frac{20}{0,57} + Td_{200'1A_11} + Tcola_{2A2} + \frac{35}{0,75} \leq 120\right) - \right. \right. \\
 &\times \left[\left[P\left(\frac{20}{0,57} + Td_{200'1A_11} + Tcola_{2A2} + \frac{35}{0,75} \leq 120 \right. \right. \\
 &\times \left. \left. \left. - Td_{200'2A_12} - Tcola_{3A1} \right) \right] \right] \times \right. \\
 &\times \left. \left[P(C_{200A_14} = 40) \times P(Td_{200'2A_124} + Tcola_{3A1} + \frac{40}{0,8} \leq 120) \right] \right] \times \\
 &\times \left[P(C_{300A_314} = 10) \times P(Tconf_A + Tdm_{300A_3} + Tcola_{1A1} + \frac{10}{0,8} = 120) \right] \times \\
 &\times \left[\left[P(C_{100B_223} = 20) \times P(Tconf_B + Tdm_{100B_2} + Tcola_{2A2} + \frac{20}{0,75} = 120) \right] \times \right. \\
 &\times \left[\left[P(C_{100B_224} = 25) \times P(C_{100B_214} = 45) \times \right. \right. \\
 &\times \left. \left[P\left(\frac{25}{0,86} + Td_{100'4A_22} + Tcola_{5A1} + \frac{45}{0,8} = 120\right) \right] \right] \right] \times \left. \right] \quad (4.43)
 \end{aligned}$$

¹⁸ Recordemos que, para el ejemplo que refleja esta expresión, se consideró independientes los cumplimientos del Plan de Carga de los distintos lotes que componen el Plan de Materiales.

Dado que la probabilidad de que una variable continua (o una suma de éstas) tome un valor concreto es cero, será preciso que la empresa establezca el margen de variación (V) que desea permitir¹⁹, tanto para los valores de las cargas como para el desplazamiento de éstas, cuando quedan operaciones inconclusas al final de periodo. Con ello, y operando en la expresión anterior, obtendremos:

$$\begin{aligned}
 &P(\text{Cumpla planificación CRP}) = \\
 &= P(E_{11} \times U_{11} = 0,7 \pm V) \times P(E_{12} \times U_{12} = 0,64 \pm V) \times \\
 &\times P(E_{13} \times U_{13} = 0,57 \pm V) \times P(E_{14} \times U_{14} = 0,8 \pm V) \times \\
 &\times P(E_{21} \times U_{21} = 0,64 \pm V) \times P(E_{22} \times U_{22} = 0,6 \pm V) \times \\
 &\times P(E_{23} \times U_{23} = 0,75 \pm V) \times P(E_{24} \times U_{24} = 0,86 \pm V) \times \\
 &\left[\left[P(C_{200,4,12} = 10 \pm V) \times P(Tconf_A + Tdm_{200,4,1} + Tcola_{1,41} = \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. = 104,375 \pm V) \right] \times \right. \\
 &\times \left\{ \left[\left[P(C_{200,4,13} = 20 \pm V) \times P(C_{200,4,23} = 35 \pm V) \times \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left(P(Td_{200'1,4,1} + Tcola_{2,42} \leq 38,245) - \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. P(Td_{200'1,4,1} + Tcola_{2,42} + Td_{200'2,4,2} + Tcola_{3,41} \leq 120) \right) \right] \times \right. \\
 &\quad \left. \left. \left[P(C_{200,4,14} = 40 \pm V) \times P(Td_{200'2,4,24} + Tcola_{3,41} \leq 70) \right] \right] \right\} \times \\
 &\times \left\{ \left[P(C_{300,4,14} = 10 \pm V) \times P(Tconf_A + Tdm_{300,4,3} + Tcola_{1,41} = \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. = 107,5 \pm V) \right] \times \right. \\
 &\times \left\{ \left[P(C_{100B_2,23} = 20 \pm V) \times P(Tconf_B + Tdm_{100B_2} + Tcola_{4B2} = \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. = 93,333 \pm V) \right] \times \right. \\
 &\times \left\{ \left[P(C_{100B_2,24} = 25 \pm V) \times P(C_{100B_2,14} = 45 \pm V) \times \right] \right. \\
 &\quad \left. \left. \times P(Td_{100'4B_2} + Tcola_{5B1} = 34,681 \pm V) \right] \right\} \right\} \quad (4.44)
 \end{aligned}$$

Del análisis de esta expresión podemos resaltar que, en el caso de que se cumpla el producto de los factores de utilización y eficiencia, y por tanto coincida la capacidad disponible planificada con la real, se incrementa la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga; ya que el número de variables aleatorias que inciden en su cálculo se ve reducido. Lógicamente, existe una correlación positiva entre la probabilidad de cumplimiento y el margen de variación que la empresa

¹⁹ El cual puede venir dado como valor entero o en términos porcentuales, y puede ser diferente para cada variable. En la expresión (4.44) se ha considerado el mismo margen de variación porcentual (V) para todas las variables.

establezca, resultando menos fiable la planificación que permita menores diferencias con la realidad.

La representatividad de los Planes CRP queda en entredicho si constatamos que, para el ejemplo representado en la expresión (4.44), con un horizonte de planificación de cuatro periodos, en los que se han emitido tres lotes de dos ítems, utilizándose en su procesamiento sólo dos Centros de Trabajo, la fiabilidad de la planificación de la capacidad depende de 37 variables aleatorias agregadas (entre factores eficiencia y utilización, cargas de las operaciones, tiempos de confección, desplazamientos y cola), las cuales podrían aumentar en el caso de que se origine tiempo de espera a la salida de los Centros de Trabajo y se realicen inspecciones a lo largo del proceso productivo (no incluidas en el ejemplo).

La expresión (4.44) puede desarrollarse aún más si se desagregan las variables carga, tiempo de cola y de desplazamiento (véase Anexo 4), de manera que en términos generales, pueden existir: seis variables aleatorias por cada vez que se realice una operación (tiempo de ejecución unitario, tiempo de preparación, tasa de llegada de las operaciones, factor aprovechamiento, tiempo unitario de desplazamiento y tiempo de inspección unitario); dos factores aleatorios para cada periodo y Centro de Trabajo (eficiencia y utilización); y dos variables más por cada lote (tiempo de confección de pedido y tiempo de desplazamiento de materiales unitario). Ello nos lleva a que, para el ejemplo, el total de variables sea de 52.

Aún en los casos más favorables, en los que la aleatoriedad de las variables sea baja, los niveles de cumplimiento de la planificación elaborada con CRP no serían satisfactorios. Como ejemplo, consideraremos un caso muy simple en el que una empresa sólo elabora dos ítems, A y B, y que trabaja bajo entornos MRP, donde utiliza un horizonte de planificación de ocho periodos, durante los cuales sólo se emiten cinco lotes. El Plan de Materiales establecido con el lanzamiento de pedidos planificados para cada ítem, es el reflejado en la Tabla 4.4. (donde los pedidos se emiten al final de los periodos), el cual origina un Plan de Carga, indicado en la Tabla 4.5., que es el resultado de la planificación desarrollada en la Figura 4.4.

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
Lanzamiento Pedidos A	200		300			200		
Lanzamiento Pedidos B		100			100			

Tabla 4.4. Ejemplo de Plan de Materiales.

Periodo		1	2	3	4	5	6	7	8
Centro de Trabajo 1	Carga 200A		10	20	40			10	20
	Carga 300A				10	35	50	10	
	Carga 100B				45			45	
	Total Carga CT1	0	10	20	95	35	50	65	20
Centro de Trabajo 2	Carga 200A			35					35
	Carga 300A					30	25		
	Carga 100B			20	25		20	25	
	Total Carga CT2	0	0	55	25	30	20	25	35

Tabla 4.5. Ejemplo de Plan de Carga (valores en horas estándar).

Periodo 1	Periodo 2		Periodo 3		Periodo 4		Periodo 5		Periodo 6		Periodo 7		Periodo 8							
	T_{conf}	T_{dm}	T_{cola}	$T_{c_{1,1}}$	T_{d_1}	T_{cola}	$T_{c_{2,2}}$	T_{d_2}	T_{cola}	$T_{c_{3,3}}$	$T_{insp_{200A}}$		T_{conf}	T_{dm}	T_{cola}	$T_{c_{1,4}}$	T_{d_4}	T_{cola}	$T_{c_{2,4}}$	T_{d_2}
200 A	10 20		35		40							10 20		35						

Figura 4.4. Ejemplo de Planificación mediante *forward scheduling*.

Supuestos unos valores del producto de los factores de eficiencia y utilización ($\overline{E_k} \times \overline{U_k}$) para el CT1 de 0,8 y el CT2 0,9 se puede calcular la probabilidad de cumplimiento de la planificación elaborada mediante CRP según la expresión (4.42).

$$\begin{aligned}
P(\text{Cumpla planificación CRP}) &= P(E_{11} \times U_{11} = 0,8) \times \\
&\times P(E_{12} \times U_{12} = 0,8) \times P(E_{13} \times U_{13} = 0,8) \times P(E_{14} \times U_{14} = 0,8) \times \\
&\times P(E_{21} \times U_{21} = 0,9) \times P(E_{22} \times U_{22} = 0,9) \times P(E_{23} \times U_{23} = 0,9) \times \\
&\times P(E_{24} \times U_{24} = 0,9) \times P(E_{15} \times U_{15} = 0,8) \times P(E_{25} \times U_{25} = 0,9) \times \\
&\times P(E_{16} \times U_{16} = 0,8) \times P(E_{26} \times U_{26} = 0,9) \times P(E_{17} \times U_{17} = 0,8) \times \\
&\times P(E_{27} \times U_{27} = 0,9) \times P(E_{18} \times U_{18} = 0,8) \times P(E_{28} \times U_{28} = 0,9) \times \\
&\times P(C_{200,4,12} = 10) \times P(\text{Cumpla } p_2 / \text{Cumplida } C_{200,4,12} \text{ y } \overline{E_1} \times \overline{U_1}) \times \\
&\times P(C_{200,4,13} = 20) \times P(C_{200,4,23} = 35) \times P(\text{Cumpla } p_3 / \text{Cumplida } C_{200,4,13}, \\
&C_{200,4,23}, C_{200,4,12}, C_{200,4,12} \text{ en } p_2, \overline{E_1} \times \overline{U_1}, \overline{E_2} \times \overline{U_2}) \times P(C_{200,4,14} = 40) \times \\
&\times P(\text{Cumpla } p_4 / \text{Cumplida } C_{200,4,14}, C_{200,4,13}, C_{200,4,23}, C_{200,4,13} \text{ en } p_3, \\
&C_{200,4,23} \text{ en } p_3, C_{200,4,12}, \overline{E_1} \times \overline{U_1}, C_{200,4,12} \text{ en } p_2, \overline{E_1} \times \overline{U_1}, \overline{E_2} \times \overline{U_2},) \times \\
&\times P(C_{200,6,17} = 10) \times P(\text{Cumpla } p_7 / \text{Cumplida } C_{200,6,17} \text{ y } \overline{E_1} \times \overline{U_1}) \times \\
&\times P(C_{200,6,18} = 20) \times P(C_{200,6,28} = 35) \times P(\text{Cumpla } p_8 / \text{Cumplida } C_{200,6,18}, \\
&C_{200,6,28}, C_{200,6,17}, C_{200,6,17} \text{ en } p_7, \overline{E_1} \times \overline{U_1}, \overline{E_2} \times \overline{U_2}) \times P(C_{300,3,14} = 10) \times \\
&\times P(\text{Cumpla } p_4 / \text{Cumplida } C_{300,3,14}, \overline{E_{14}} \times \overline{U_{14}}) \times P(C_{300,3,15} = 35) \times \\
&\times P(C_{300,3,25} = 30) \times P(\text{Cumpla } p_5 / \text{Cumplida } C_{300,3,15}, C_{300,3,25}, C_{300,3,14}, \\
&C_{300,3,14} \text{ en } p_4, \overline{E_1} \times \overline{U_1}, \overline{E_2} \times \overline{U_2}) \times P(C_{300,3,26} = 25) \times P(C_{300,3,16} = 50) \times \\
&\times P(\text{Cumpla } p_6 / \text{Cumplida } C_{300,3,14}, C_{300,3,15}, C_{300,3,25}, C_{300,3,26}, C_{300,3,16}, \\
&C_{300,3,14} \text{ en } p_4, C_{300,3,15} \text{ en } p_5, C_{300,3,25} \text{ en } p_5, \overline{E_1} \times \overline{U_1}, \overline{E_2} \times \overline{U_2}) \\
&\times P(C_{300,3,17} = 10) \times P(\text{Cumpla } p_7 / \text{Cumplida } C_{300,3,14}, C_{300,3,15}, C_{300,3,25}, \\
&C_{300,3,26}, C_{300,3,16}, C_{300,3,17}, C_{300,3,14} \text{ en } p_4, C_{300,3,15} \text{ en } p_5, C_{300,3,25} \text{ en } p_5, \\
&C_{300,3,16} \text{ en } p_6, C_{300,3,26} \text{ en } p_6, \overline{E_1} \times \overline{U_1}, \overline{E_2} \times \overline{U_2}) \times P(C_{100,2,23} = 20) \times \\
&\times P(\text{Cumpla } p_3 / \text{Cumplida } C_{100,2,23}, \overline{E_2} \times \overline{U_2}) \times P(C_{100,2,24} = 25) \times \\
&\times P(C_{100,2,14} = 45) \times P(\text{Cumpla } p_4 / \text{Cumplida } C_{100,2,24}, C_{100,2,14}, \overline{E_1} \times \overline{U_1}, \\
&\overline{E_2} \times \overline{U_2}) \times P(C_{100,2,26} = 20) \times P(\text{Cumpla } p_6 / \text{Cumplida } C_{100,2,26}, \\
&\overline{E_2} \times \overline{U_2}) \times P(C_{100,2,27} = 25) \times P(C_{100,2,17} = 45) \times P(\text{Cumpla } p_7 / \\
&/ \text{Cumplida } C_{100,2,27}, C_{100,2,17}, \overline{E_1} \times \overline{U_1}, \overline{E_2} \times \overline{U_2})
\end{aligned} \tag{4.45}$$

Si consideramos que todas y cada una de las probabilidades incluidas en la expresión anterior tienen un valor del 95% (para lo cual las distintas variables de las que dependen dichas probabilidades deberían tener una aleatoriedad prácticamente nula), la fiabilidad de la planificación (cumplimiento de la previsión de capacidad disponible y de la necesaria) sería inferior al 9%, siendo el riesgo de incumplimiento del Plan de Carga de un 81%.

Del análisis del ejemplo utilizado en la expresión (4.45), se puede deducir que la probabilidad de cumplimiento de la Planificación de Capacidad desarrollada con CRP depende del número de:

- Centros de Trabajo que utiliza la empresa.
- Periodos que componen el horizonte de planificación.
- Operaciones necesarias para elaborar cada uno de los ítems.
- Lotes emitidos de cada uno de los ítems.
- Operaciones que quedan sin finalizar en cada periodo.
- Periodos, del tiempo de suministro de cada uno de los lotes, en los que se origina carga.
- Operaciones que se ejecutan en un mismo Centro de Trabajo y que generan carga en un único periodo.
- Cargas de los lotes emitidos que no se asignan a los periodos que comprende el horizonte de planificación.

A diferencia de los casos utilizados como ejemplo en este capítulo, las empresas con configuraciones *job-shop* presentan una mayor complejidad, dado que se caracterizan por: disponer de múltiples Centros utilizados para la elaboración de gran cantidad y variedad de lotes de distintos artículos, y un horizonte de planificación, para CRP, de entre 12 a 26 periodos²⁰, que puede llegar a alcanzar el horizonte completo de la Planificación de Materiales de hasta 52

²⁰ Según Wemmerlöv (1984, p. 30), puede ser adecuado considerar el horizonte de planificación de 2 a 6 meses. Mientras que el tamaño medio del horizonte de planificación, considerado por Scott (1994, p. 150), para CRP es de 23 semanas. Véase, también, Plossl y Wight (1973), Orlicky (1975), Harl y Ritzman (1985, p. 311).

semanas²¹. Por ello, podemos decir que, el total de variables que inciden sobre la exactitud de los Planes de Carga y Capacidad, es muy elevado, lo que origina un riesgo de inconsistencia de la Planificación de Capacidad todavía superior al que acabamos de calcular para el ejemplo utilizado.

Así, por ejemplo, si una empresa utiliza tan solo 2 Centros de Trabajo para la elaboración de dos productos finales, cada uno de ellos con dos componentes fabricados (en total produce 6 ítems distintos), las variables aleatorias pueden llegar a ser más de 500. Para ello, simplemente es preciso que sean necesarias 3 operaciones por ítem, y la emisión de 4 lotes de cada ítem en un horizonte de planificación de 12 periodos. Además, para este caso, si suponemos que en cada periodo no se genera carga de varias operaciones en un mismo Centro de Trabajo, no queda ninguna operación sin concluir al final de los cubos de tiempo, sólo se genera carga en dos de los periodos del tiempo de suministro de cada uno de los lotes emitidos y todas las cargas de los lotes se asignan dentro del horizonte de planificación, la probabilidad de cumplimiento de la Planificación de Capacidad desarrollada con CRP se calcularía, desarrollando la expresión (4.42), mediante la multiplicación de 144 factores o probabilidades. Si el valor de cada una estas probabilidades fuese de 0,95 (lo que supondría que se conociesen casi con exactitud el valor de cada una de las variables de las que dependen), la fiabilidad de la planificación sería tan sólo del 0,06%, es decir, la probabilidad de que no se cumpla CRP superaría el 99,9%.

En la Tabla 4.6. se puede apreciar que la probabilidad de cumplimiento de la planificación de capacidad elaborada por CRP es cero o prácticamente nula incluso en los casos de procesos productivos muy simples. Así, con tan solo 3 Centros de Trabajo, 5 ítems diferentes y la emisión únicamente de 2 lotes de cada uno de ellos, en todo el horizonte de planificación, de sólo 8 periodos, la probabilidad de que se cumpla la planificación no llega al 1% [para un 95% de probabilidad de cumplimiento de cada uno de los multiplicandos que la forman, según la expresión (4.42)]. Todo ello, además, bajo la consideración de una serie de suposiciones que reducen la aleatoriedad o el número de factores que se utilizan en el cálculo de la probabilidad, como es el hecho de que no quede ninguna operación sin completar al final de cada uno de los periodos, todos los lotes se procesan dentro del horizonte de planificación y cada uno de ellos sólo genera carga en dos de los periodos que componen su tiempo de suministro.

²¹ CRP pretende determinar la viabilidad del Plan de Materiales en términos de capacidad para cada periodo de un determinado horizonte de planificación, el cual, como es lógico, suele coincidir con el utilizado para la Planificación de Materiales dentro de los sistemas MRP, por lo que puede cubrir entre varias semanas hasta un año. Véase, por ejemplo, Blackstone (1989, p. 2), Vollmann, Berry y Whybark (1995, p. 179) y Domínguez y otros (1995, pp. 4-12).

2 Centros de Trabajo	Operaciones/ítem	3								
	Ítems	5			20			100		
	Lotes en HP/ítem	2	5	8	2	5	8	2	5	8
	Probabilidad Cumplimiento (%)	3,387	0,0722	0,0015	0,0015	0	0	0	0	0
2 Centros de Trabajo	Operaciones/ítem	10								
	Ítems	5			20			100		
	Lotes en HP/ítem	2	5	8	2	5	8	2	5	8
	Probabilidad Cumplimiento (%)	0,093	0	0	0	0	0	0	0	0
10 Centros de Trabajo	Operaciones/ítem	3								
	Ítems	5			20			100		
	Lotes en HP/ítem	2	5	8	2	5	8	2	5	8
	Probabilidad Cumplimiento (%)	0,127	0,0027	0	0	0	0	0	0	0
10 Centros de Trabajo	Operaciones/ítem	10								
	Ítems	5			20			100		
	Lotes en HP/ítem	2	5	8	2	5	8	2	5	8
	Probabilidad Cumplimiento (%)	0,004	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.6. Simulación de la probabilidad de cumplimiento de la planificación de capacidad elaborada por CRP para una probabilidad del 95% de que se cumpla cada uno de los factores que componen la fórmula (4.42), suponiendo un horizonte de planificación (HP) de 8 periodos, no queda ninguna operación sin terminar al final de cada uno de éstos, todos los lotes se procesan dentro del HP y cada uno de ellos sólo genera carga en dos de los periodos que componen su tiempo de suministro.

Sin embargo, es habitual en las configuraciones *job-shop* la existencia de bastante más de dos Centros de Trabajo, un número de productos finales que perfectamente puede superar varias decenas, con profundas listas de materiales cada uno de ellos que puede alcanzar varios cientos de componentes (lo que llevaría posiblemente a la fabricación de miles de ítems). Si tenemos en cuenta que las operaciones de cada ítem suelen ser muchas más de tres y que se pueden emitir hasta 26 lotes de cada uno de ellos, en un horizonte de seis meses, muy típico de entornos MRP, ¿a qué nivel quedaría la probabilidad de cumplimiento de la Planificación de Capacidad CRP? (las variables aleatorias superarían el millón). Según la simulación realizada en la Tabla 4.6., probablemente no superaría con mucho la probabilidad nula.

A todo ello hay que añadir que, dado que se está calculando la probabilidad de que no se produzcan desplazamientos de las cargas a periodos distintos del

asignado, el hecho de que, según la Planificación de Capacidad mediante CRP, queden operaciones sin terminar de procesarse al final de algunos periodos, reduce la fiabilidad de la planificación. Esto se debe a que, según se desarrolló en el Apartado 4.2.2.2., cuando quedan operaciones inconclusas al final del periodo, para evitar desplazamientos de los tiempos de carga, sólo se podrían producir, variaciones de los tiempos interoperaciones, si éstas se compensan entre sí, o bien, cambios en los valores de las cargas de las operaciones procesadas en el periodo si éstos se equilibran unos con otros. La dificultad de obtener Planes fiables aumenta en el caso de que el procesamiento de las operaciones necesite más de un periodo para completarse ya que, en este caso no existen otras variables con las que compensar las posibles desviaciones que se puedan originar.

Recordemos, además, que para poder determinar la probabilidad de cumplimiento de CRP, es preciso, en primer lugar, haber realizado la planificación teórica. Esto conlleva el cálculo y distribución, a lo largo del tiempo de suministro, para cada uno de los lotes incluidos en el Plan de Materiales, de los valores medios de los distintos elementos que lo componen: tiempo de confección, desplazamiento de materiales, cola, desplazamiento entre Centros, carga, espera e inspección. Como se detalló en el Capítulo 3, para todo esto es preciso disponer, al menos²², de información sobre la media de: los tiempos de ejecución y preparación, factores de defectuosas de cada operación, eficiencia, utilización, tasas de llegada de cada operación, tiempo de desplazamiento unitario, tiempo de preparación para el transporte, tamaños medios de lote por operación y tiempo de inspección unitario.

No es de extrañar pues, que el bajo nivel de exactitud de la planificación elaborada mediante CRP (reflejo de la probabilidad de cumplimiento), sea, junto con la gran cantidad de información que se precisa sobre las distintas variables y la aleatoriedad de éstas, las principales causas de los bajos niveles de satisfacción alcanzados con esta técnica²³.

4.5. CONCLUSIONES

La escasa aplicación práctica de la técnica CRP²⁴, nos ha empujado a estudiar las causas que la provocan, yendo un poco más allá de los problemas de

²² Los datos necesarios pueden variar en función del sistema de cola que se genera a la entrada y salida de los Centros de Trabajo.

²³ Véase, por ejemplo, Burcher (1992, pp. 23-24).

²⁴ Véase, por ejemplo, Classen y Malstrom (1982, p. 76), Schmitt, Berry y Vollmann (1984, p. 525), Krepchin (1989, p. 70) o Burcher (1992, pp. 22-25).

implementación o del uso de gran cantidad de información y de tiempo de cálculo, inherentes a los diferentes módulos (y este es uno más), de los sistemas ERP. Nos hemos centrado en su utilidad para el establecimiento de una Planificación de Capacidad que no presente excesivas desviaciones con respecto a la realidad, lo cual la haría casi inservible para la toma de decisiones, lo que supone un argumento que, a nuestro modo de ver, ayudaría a justificar que fuera desechado en muchos casos en la práctica. Es por ello que hemos intentado formular analíticamente la probabilidad de que se cumplan simultáneamente los Planes de Carga y de Capacidad generados por CRP, por periodo y Centro de Trabajo, para todos los lotes incluidos en el Plan de Materiales.

En este sentido, hemos considerado que, para que el Plan de Carga estimado se ajuste suficientemente a la realidad, la carga, aparte de estar bien estimada, no debe desplazarse del periodo al que fue asignada, aunque sí podría moverse dentro de él. Esta posibilidad de desplazamiento de la carga, sin riesgo de incumplimiento del Plan, se ve reducida cuando quede inconclusa una operación al final del periodo, ya que cualquier cambio en el valor de alguna de las variables involucradas, que no se vea compensado, provocará traslados de carga.

Por otro lado, la fiabilidad del Plan de Capacidad depende únicamente de la aleatoriedad de los factores eficiencia y utilización, necesarios para transformar el tiempo real en estándar. Dichos factores pueden variar, no sólo de acuerdo al Centro de Trabajo al que se apliquen, sino también en función del periodo estudiado, no estando esto último, incluido en la planificación elaborada por CRP.

Como criterio, para que una técnica de Planificación de Capacidad, pueda considerarse fiable, hemos establecido la necesidad de que se puedan predecir correctamente necesidades y disponibilidades de capacidad a lo largo del tiempo. En este sentido, el objetivo buscado es evitar las desviaciones con respecto al valor y periodo de asignación de todas las cargas que originen los diferentes lotes que contiene el Plan de Materiales. Por ello, para cada uno de ellos y para todos los periodos que componen su tiempo de suministro, deben limitarse las variaciones de los tiempos que intervienen, a unos valores máximos definidos en restricciones, más o menos estrictas, en función de que existan cargas fraccionadas en un periodo y de las características de éste (periodo inicial, intermedio o final), ya que, en caso contrario se producirían traslados de cargas a periodos distintos al que fueron asignadas.

En este estudio, para realizar una aproximación al cálculo analítico de la probabilidad de cumplimiento de la planificación elaborada por CRP, se han realizado dos simplificaciones: se han omitido los errores de Planificación de Capacidad de los ítems en proceso de fabricación, y se ha supuesto la independencia del cumplimiento de las cargas los lotes. Una vez demostrados los

bajos niveles de fiabilidad de CRP, la simplificación realizada aumentará el riesgo de incumplimiento en proporción al valor que supongan con respecto a los lotes emitidos en el horizonte de planificación. Por todo ello, la exactitud alcanzada es aún menor que la demostrada con este trabajo, sobre todo para casos reales en los que, como comentamos anteriormente, el número de Centros de trabajo, operaciones, productos finales, componentes, períodos del horizonte de planificación, etc., suelen ser mucho mayores que los empleados para el caso del ejemplo del apartado anterior.

La probabilidad de cumplimiento de la planificación de capacidad elaborada por CRP, está condicionada por los valores reales y medios de los distintos elementos que componen el tiempo de suministro. Nos referimos a las siguientes variables aleatorias:

- Tiempos de preparación y ejecución de las operaciones que se realicen en cada uno de los periodos que componen el horizonte de planificación.
- Tiempo de desplazamiento unitario de las operaciones que se ejecuten en cada periodo abarcado por CRP y de las que les siguen en las rutas a cada una de ellas (cuya carga es asignada a algún periodo posterior)²⁵.
- Tasa de llegada a los Centros de Trabajo, para todas las operaciones que se realicen en los distintos periodos planificados.
- Factores de eficiencia y utilización por periodo, de los Centro de Trabajo implicados.
- Tamaño de lote medio considerado para cada ítem.
- Factor de aprovechamiento de la operación que se realice en el periodo estudiado y de todas las operaciones posteriores, en su ruta de fabricación.

Las variables que inciden en mayor medida, en el cálculo de esta probabilidad, son las que conforman el tiempo de carga (tiempos de ejecución y preparación, tasas de llegadas y tamaño de lote), ya que afectan también al tiempo de cola. Además, se ven afectados por las tasas de llegada, el tiempo de espera a la

²⁵ La inclusión de esta variable que se origina fuera del horizonte de planificación puede no realizarse debido a la dificultad de obtener información relativa a sus características.

salida del Centro de Trabajo e incluso, en el caso de que se precise ajustar el elemento de transporte, inciden sobre el tiempo de desplazamiento.

Tras el desarrollo de los distintos elementos que componen la probabilidad de cumplimiento de CRP (ver Anexo 4), todos ellos componentes del tiempo de suministro (analizado en el Capítulo 3), y tomando como base las expresiones (4.42) y (4.44)²⁶, se pueden establecer las peculiaridades de las empresas para las que podría ser adecuado el uso de CRP. Observamos que se reducirá el riesgo de incumplimiento, es decir, se producen menos desviaciones de la carga y capacidad planificada con respecto a las reales, cuando las características del proceso productivo de la empresa más se ajusten a las siguientes:

- Uniformidad con respecto a cada uno de los ítems que fabrica la empresa, en el número y tamaño de los pedidos que se emiten. Así se reduce la aleatoriedad de las tasas de llegada (que reflejan los lotes que llegan por unidad de tiempo) y del tiempo de carga de los lotes.
- Composición constante del mix de productos, de manera que se mantenga fijo el porcentaje de fabricación de cada uno de los ítems, sobre el total de producción, para así mantener la relación de las tasas de llegada sobre el sumatorio de éstas y originar menor riesgo de error con respecto al tiempo de carga (vía tiempo de preparación).
- Bajo número de operaciones por periodo, independientemente del Centro donde se realicen. Esto puede ser debido a la existencia de procesos de fabricación simples con rutas cortas (con respecto al número de operaciones), a tamaños grandes de lotes (que generen altos tiempos de carga), a la existencia de cubos de tiempo pequeños (por ejemplo, la periodificación por días en vez de por semanas), o al procesamiento de operaciones complejas que impliquen altos valores del tiempo de ejecución unitario.
- Centros de Trabajo poco flexibles, donde se pueden ejecutar una reducida variedad de operaciones. Disminuye así la necesidad de dedicar tiempo al ajuste de aquél, incidiendo en la fiabilidad del resultado, a través de la probabilidad de que se precise tiempo de preparación. La situación con menor riesgo se da cuando el Centro se dedica a realizar una única operación, ya que esto eliminará el tiempo al ajuste de las instalaciones, puesto que nunca se procesará en él una operación distinta

²⁶ Donde se desarrolla la probabilidad de cumplimiento de CRP [expresión (4.42)] para el ejemplo reflejado en la Figura 4.3.

a la anterior. También implicará menor dispersión de los factores de eficiencia y utilización, debido a que éstos suelen ser calculados para todo el Centro de Trabajo.

- Utilización de equipos muy automatizados, que consigan bajos niveles de dispersión: del tiempo de ejecución y desplazamiento unitario (por ejemplo con el uso de cintas transportadoras), del tiempo de preparación, de los factores de eficiencia y utilización de los Centros de Trabajo y de los valores de los factores de aprovechamiento de las operaciones.
- Facilidad para prever, de manera adecuada, el tiempo de cola, bien porque el sistema generado cumpla con hipótesis comunes de la Teoría de Colas, o bien porque se conozca su comportamiento en base a estudios de la empresa.
- Bajos niveles de dispersión de los valores del tiempo de preparación, para las distintas operaciones que se realicen en un mismo Centro de Trabajo. Mejoraría así la representatividad del valor medio utilizado para la Planificación de Capacidad.
- Todas las actividades asignadas a un determinado periodo quedan concluidas dentro de él. El cumplimiento de esta consideración depende: de las características propias del proceso productivo (principalmente de los tiempos de cola, desplazamiento, ejecución y preparación), así como del tamaño de lote (existiendo mayor riesgo de distribución de la carga entre varios periodos, cuando el tamaño de lote es grande).
- Horizonte de planificación dividido en pocos cubos de tiempo (tamaños grandes de periodos o tiempo de planificación pequeño), reduciéndose, de esta manera, el número de variables incluidas en el sistema.
- Amplio margen de variación permitido, tolerado por la disponibilidad de equipos productivos no sobreutilizados, polivalencia de trabajadores y posibilidad de aumentar o reducir la capacidad de forma rápida.

En definitiva, se puede afirmar que, la fiabilidad de la planificación elaborada con CRP es inversamente proporcional a las diferencias de los sistemas productivos y políticas empresariales, en relación a las características mencionadas anteriormente.

Sin embargo, en la práctica, en las configuraciones *job-shop*, es habitual: que en cada periodo coincidan cargas originadas por operaciones destinadas a distintos lotes de un mismo ítem o a otros ítems elaborados por la empresa, que se

utilicen los Centros de Trabajo para la ejecución de múltiples operaciones, y que la producción de los distintos ítems no sea uniforme. Por otro lado, si tenemos en cuenta que es necesario estimar la probabilidad de que se cumpla el Plan de Carga generado por CRP para un horizonte normal de 12 o 26 periodos (normalmente semanales), aunque se permitan unas desviaciones admisibles, la fiabilidad (y por tanto la utilidad) de la Planificación de Capacidad en el horizonte de planificación, con frecuencia, no justifica el esfuerzo requerido para su implantación. Este alto riesgo de incumplimiento complementado con la gran cantidad de datos y cálculos precisados (proporcionales a la variedad de ítems que fabrique la empresa, total de Centro de Trabajo que posea, número de operaciones distintas que se realicen en ellos y variabilidad de tamaño de lote para cada ítem), está en el fondo de que tantas empresas renuncien a su uso, centrándose en técnicas de Planificación de la Capacidad Aproximada, obteniendo de ellas información sobre las sobrecargas o subcargas que se podrían generar a lo largo del horizonte de planificación (aunque no de los períodos de tiempo concretos en que se producirían, ni del volumen exacto de las mismas ni, por supuesto, a qué pedidos concretos del Plan de Materiales afectarían), con objeto de prever las medidas de ajuste necesarias; información que, adecuadamente interpretada²⁷, puede ser más fiable que la que pudiera proporcionar CRP (vista la gran cantidad de variables que pueden originar diferencias entre la planificación y la realidad) y, además, bastante más fácil y barata de obtener. La planificación y control más exacto de la capacidad, la seguirán desarrollando inmediatamente antes de la ejecución de pedidos en el muy corto plazo, ya directamente en la Gestión de Talleres (*Shop Floor Control*). El problema es que esta última, solo abarca las próximas horas o días, lo que hace que el margen de maniobra en la adopción de medidas de ajuste de capacidad y carga sea muy limitado (lo que redundará en mayores costes, más retrasos en el servicio, mayores volúmenes de inventario para evitar rupturas, etc.), y que no se pueda determinar la viabilidad de los Planes de Materiales en términos de capacidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BÁRCENA RUIZ, M. J., FERNÁNDEZ AGUIRRE, K., FERREIRA GARCÍA, E. y GARÍN MARTÍN, M. A. (2003), *Elementos de probabilidad y estadística descriptiva*, Universidad del País Vasco, Bilbao.
- BLACKSTONE, J. H., JR (1989), *Capacity Management*, South-Western Publishing, Cincinnati.

²⁷ Véase Domínguez y otros (1995, pp. 105-114).

- BURCHER, P. G. (1992), "Effective Capacity Planning", *Management Services*, Vol. 36, No. 10, pp. 22-25.
- CANAVOS, G. (1988), *Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y Métodos*, McGraw-Hill.
- CAO ABAD, R. (2002), *Introducción a la Simulación y a la Teoría de Colas*, Netbiblo, La Coruña.
- CHEN, T. C. E. (1986), "Capacity requirements planning by stochastic linear programming", *Mathematical Modelling*, Vol. 7, No. 2-3, pp. 443-448.
- CLASSEN, R. J. y MALSTROM, E. M. (1982), "Effective Capacity Planning for Automated Factories Requires Workable Simulation Tools and Responsive Shop Floor Controls", *Industrial Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 73-77.
- COMPANYS PASCUAL, R. y COROMINAS SUBIAS, A (1995), *Organización de la Producción II*, Edicions UPC, Barcelona.
- CONNOR, S. (1986), "The Value-Added Equation", *Manufacturing Systems*, Vol. 4, No. 12, pp. 19-22.
- DE LA FUENTE GARCÍA, D. y PINO DÍEZ, R. (2001), *Teoría de Líneas de Espera. Modelos de colas*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A., y otros (1995), *Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- EVANS, M. J. y ROSENTHAL, J. S. (2005), *Probabilidad y estadística: la ciencia de la incertidumbre*, Reverté, Barcelona.
- FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, E. y VAZQUEZ ORDAS, C.J. (1994), *Dirección de la Producción. II. Métodos Operativos*, Civitas, Madrid.
- HABER, A. y RUNYON, R. P. (1973), *Estadística general*, Fondo Educativo Interamericano, México.
- HARL, J.E. y RITZMAN, L. P. (1985), "A heuristic algorithm for capacity sensitive requirements planning", *Journal of Operations Management*, Vol. 5, No. 3, pp. 309-326.
- HEIZER, J. y RENDER, B. (2001), *Dirección de la Producción. Decisiones Tácticas*, Prentice-Hall, Madrid.
- KREPCHIN, I. P. (1989), "Using Computers for Planning and Control", *Modern Materials Handling*, Vol. 44, No. 13, pp. 68-71.
- LUNN, T. y NEFF, S. A. (1992), *MRP Integrating Material Requirements Planning And Modern Business*, Irwin, New York.
- NARVAIZA, J. L., LAKA, J. P., MADARIAGA, J. A. y UGARTE, J. V. (1998), *Estadística descriptiva y probabilidad*, Desclée de Brouwer, Bilbao.
- ODEN, H. W., LANGENWALTER, G. A. y LUCIER, R. A. (1993), *Handbook of Material & Capacity Requirements Planning*, McGraw-Hill, New York.
- ORLICKY, J. (1975), *Material Requirements Planning*, McGraw Hill, New York.

- PAZOS ARIAS, J. J., SUÁREZ GONZÁLEZ, A. y DÍAZ REDONDO, R. P. (2003), *Teoría de Colas y Simulación de Eventos Discretos*, Prentice-Hall, Madrid.
- PLOSSL, G. W. y WIGHT, O. W. (1973), "Capacity Planning and Control", *Production and Inventory Management*, Vol. 14, No. 3, pp. 31-68.
- PTAK, C. A. (1997), *MRP and Beyond*, McGraw-Hill, New York.
- SCHMITT, T. G., BERRY, W. L. y VOLLMANN, T. E. (1984), "An Analysis of Capacity Planning Procedures for a Material Requirements Planning System", *Decision Sciences*, Vol. 15, No. 4, pp. 522-541.
- SCOTT, B. (1994), *Manufacturing Planning System*, McGraw-Hill, Berkshire, England.
- SLACK, N. (1997), *The Blackwell Encyclopedic Dictionary of Operations Management*, Blackwell, Oxford.
- VOLLMANN, T. E., BERRY, W. L. y WHYBARK, D. C. (1995), *Sistemas de Planificación y Control de Producción*, Irwin, Mexico.
- WEMMERLÖV, U. (1984), *Capacity Management Techniques. For Manufacturing Companies with MRP Systems*, American Production and Inventory Control Society, Cincinnati, Ohio.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- ADAMS, F. P. y COX, J. F. (1985), "Manufacturing resource planning: An information systems model", *Long Range Planning*, Vol. 18, No. 2, pp. 86-92.
- AMIRI, A. (1998), "The design of service systems with queueing time cost, workload capacities and backup service", *European Journal of Operational Research*, Vol. 104, No. 1, pp. 201-217.
- AQUILANO, N., CHASE, R. y DAVIS, M. (2001), *Fundamentos de dirección de operaciones*, McGraw-Hill, Madrid.
- BERNARD, P. (1990), "Inaccurate Schedules? Check Your CRP Logic", *Production & Inventory Management Review & Apics News*, Vol. 10, No. 1, pp. 37-40.
- BERRY, W. L., SCHMITT, T. G. y VOLLMANN, T. E. (1982), "Capacity Planning Techniques for Manufacturing Control Systems: Information Requirements and Operational Features", *Journal of Operations Management*, Vol. 3, No. 1, pp. 13-25.
- CONNOR, S. (1986), "The Value-Added Equation", *Manufacturing Systems*, Vol. 4, No. 12, pp. 19-22.
- EILON, S. y CHOWDHURY, I. G. (1975), "Due dates for job shop scheduling", *International Journal of Production Research*, Vol. 14, pp. 223-237.

- EPPEN, G. D. y otros (2000), *Investigación de Operaciones en la ciencia administrativa*, Pearson, México.
- FISK, J. C. (1979), "A Goal Programming Model for Output Planning", *Decision Sciences*, Vol. 10, No. 4, pp. 593-603.
- FOGARTY, D. W., BLACKSTONE, J. H. JR y HOFFMANN, T. R. (1991), *Production & Inventory Management*. APICS. Cincinnati.
- FOLEY, M. J. (1988), "The Winds of Change Are Blowing for MRP II Users", *Datamation*, Vol. 34, No. 3, pp. 19-21.
- GARCÍA GONZÁLEZ, S. RABADÁN MARTÍN, I. y GESSA PERERA, A (2003), "El efecto de la regla de secuenciación sobre el tiempo de carga de las instalaciones en configuraciones por lotes" *XII Congreso Hispano-Francés AEDEM*, Bourdeaux, pp. 85-95
- GARCÍA GONZÁLEZ, S. y GARCÍA GRAGERA, J. A. (1994), "Medición de la capacidad en configuraciones productivas por funciones: los tiempos de carga unitarios", *Alta Dirección*, No. 186 y 187, pp. 111-120 y pp. 201-209.
- HARL, J. E. (1984), "Alternative Heuristics for Large Scale Capacitated Requirements Planning Systems", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 4, No. 3, pp. 22-35.
- HASKOSE, A., KINGSMAN, B. G. y WORTHINGTON, D. (2002), "Modelling flow and jobbing shops as a queueing network for workload control", *International Journal of Production Economics*, Vol. 78, No. 3, pp. 271-287.
- HUNG Y. F. y CHIEN K. L. (2000), "A multi-class multi-level capacitated lot sizing model", *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, No. 11, pp. 1309-1318.
- IGLEHART, D. L. y SHEDLER, G. S. (1978), "Simulation of Response Times in Finite-Capacity Open Networks of Queues", *Operations Research*, Vol. 26, No. 5, pp. 896-914.
- KIM, D. y MABERT, V. A. (1995), "Integrative versus separate cycle scheduling heuristics for capacitated discrete lot sizing and sequencing problems", *International Journal of Production Research*, Vol. 33, pp. 2007-2021.
- KUIK, R. y TIELEMANS, P. (1997), "Setup utilization as a performance indicator in production planning and control", *International Journal of Production Economics*, Vol. 49, No. 2, pp. 175-182.
- KUIK, R. y TIELEMANS, P. (1999), "Lead-time variability in a homogeneous queueing model of batching", *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, No. 1-3, pp. 435-441.
- LANKFORD, R. (1990), "Capacity Management in Complex Production Environments", *Production & Inventory Management Review & Apics News*, Vol. 10, No. 5, pp. 40-43.

-
- MATSUURA, H. y TSUBONE, H. (1993), "Setting Planned Lead times in Capacity Requirements planning", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 44, No. 8, pp. 809-816.
- PLOSSL, G. W.(1988), "Throughput time control", *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 493-499.
- SHEU, C. y WACKER, J. G. (1997), "The effects of purchased part commonality on manufacturing lead time", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 17, No. 8, pp. 725-745.
- THOMPSON, K. (1983), "MRP II in the Repetitive Manufacturing Environment", *Production and Inventory Management*, Vol. 24, No. 4, pp. 1-14.
- TRIGEIRO, W.W., THOMAS, L.J. y MCLAIN, J.O. (1989) "Capacitated lot sizing with setup times", *Management Science*, Vol. 35, pp. 353-366.
- WALLACE, T. y KREMZAR, M. (2001), *ERP: Making it Happen*, John Wiley & Sons, New York.
- WEEKS, J. K. (1979), "A simulation study of predictable due dates", *Management Science*, Vol. 25, pp. 363-373.
- WIGHT, O. W. (1981), *MRP II, Unlocking America's Productivity Potential*, CBI Publishing, Mass, Boston.
- YEH, C. (1997), "Schedule based production", *International Journal of Production Economics*, Vol. 51, pp. 235-242.

PARTE IV

PROPUESTA DE UNA TÉCNICA ALTERNATIVA DE PLANIFICACIÓN DE CAPACIDAD A CORTO PLAZO

CAPÍTULO

5

PLANTEAMIENTO DE UNA TÉCNICA ALTERNATIVA A LA PLANIFICACIÓN DE NECESIDADES DE CAPACIDAD (CRP)

5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez analizada la probabilidad teórica de que se cumpla el Plan de Capacidad elaborado mediante CRP, se pone de manifiesto que, a pesar de que se dispusiera de toda la gran cantidad de información que requiere, no siempre esta técnica será capaz de generar unos Planes de Carga y Capacidad que fueran lo suficientemente exactos, como para justificar el esfuerzo y el coste que suponen su implantación y uso; sobre todo para los casos de pequeñas y medianas empresas. Sólo en el caso de unas circunstancias productivas de una firma, que en una configuración por lotes (en las que CRP y este estudio se centran) fueran inusualmente constantes, se daría una mínima dispersión de los valores de las variables que emplea CRP con respecto a su media, de manera que todas y cada una de dichas variables tuvieran una probabilidad de ocurrencia que fuera prácticamente la unidad (requisito que, como hemos visto en los Apartados 4.3. y 4.4., es imprescindible para que la probabilidad de cumplimiento del plan elaborado por CRP, alcance un valor aceptable).

Por este motivo, nuestro objetivo, en este capítulo, es proponer un modelo asistido por ordenador para la planificación detallada de la capacidad en configuraciones por lotes en empresas que utilizan MRP, que sea capaz de lograr

una planificación que consiga unos niveles de cumplimiento al menos, similares a los de CRP, pero empleando un menor número de variables aleatorias y cálculos más simples y, además, que requiera menos recursos, tanto para su implementación, como para su mantenimiento. Es decir, lograr un modelo informatizado, que logre al menos los resultados de CRP, pero empleando menor cantidad de esfuerzo, recursos y tiempo. Como tal modelo informatizado deberá incluir la mecánica de cálculo que habría de desarrollarse, el software para ello y el procedimiento para su aplicación. Es decir, no se trata solo de desarrollar y fundamentar el proceso de cálculo de forma teórica, sino además de:

- Elaborar el software para su utilización práctica, que permita aplicarlo de forma sencilla y con pocos requisitos de personal técnico, empleando además herramientas informáticas asequibles a pequeñas y medianas empresas.
- Proponer el procedimiento para la elaboración de la información de la base de datos que incluye y para el desarrollo y ejecución práctica de la planificación elaborada.

Para el desarrollo del modelo propuesto, comenzaremos con la descripción y fundamentación teórica del proceso de cálculo para la elaboración de los Planes de Carga y Capacidad para, posteriormente, describir el software elaborado y analizar el cumplimiento de los planes obtenidos y la fecha de entrega prevista. En último lugar se estudiarán las posibles ventajas que se pueden obtener, en comparación con CRP, así como las limitaciones del modelo propuesto.

5.2. ELABORACIÓN DEL PLAN DE CARGA MEDIANTE EL MODELO ALTERNATIVO

Para la confección del Plan de Carga, mediante el modelo alternativo a CRP que se desarrolla en este capítulo, debemos conocer la capacidad necesaria para el desarrollo de los lotes emitidos y en curso, así como el periodo en el que se va a asignar ésta. En el proceso de elaboración de este Plan utilizaremos dos tipos de datos: los conocidos o fijados por la empresa y los datos a estimar para el modelo alternativo propuesto, debido a que tienen un comportamiento aleatorio. La principal diferencia del modelo propuesto, con respecto a CRP, se encuentra en ese último grupo de datos, siendo en nuestro caso más reducido, a la par que sus valores son mantenidos permanentemente actualizados de manera automatizada.

En el grupo de los datos conocidos o calculados por la empresa de manera independiente, incluimos todos aquéllos que ya deben estar disponibles en un entorno MRP (que es en el que se centra nuestro trabajo), así como los que son necesarios para la realización del Plan de Carga, sea cual sea la técnica de Planificación de la Capacidad empleada. Los podemos clasificar pues, en dos grandes grupos:

- En **primer lugar**, aquellos datos que ya deben estar disponibles en la empresa. Dado que nuestra propuesta se centra en empresas usuarias de MRP (en caso contrario, no podría emplearse tampoco CRP, dado que también parte del Plan de Materiales), utilizando esta técnica tienen que estar disponibles:
 - a) El Plan de Materiales: de donde conoceremos los pedidos planificados de cada ítem, identificados, al menos, por el tamaño del lote (Q_i) y la fecha de emisión (Fe_{Q_i}).
 - b) Los pedidos en curso: incluyendo tamaño de lote, ítem y lugar de su ruta en el que se encuentra en proceso o, en su defecto, la carga prevista por periodo que originan tales pedidos.
- En **segundo lugar**, aquellos datos que son necesarios para el desarrollo de la Planificación de la Capacidad, por muy agregada que sea la técnica empleada. Entre ellos:
 - a) Información sobre los periodos que componen el horizonte de planificación (HP): el número de cubos de tiempo y sus características (turnos realizados por jornada, duración de cada uno de ellos en unidades de tiempo reales y el número de jornadas que componen cada periodo). En términos generales, si consideramos que todos los Centros de Trabajo tienen el mismo horario de apertura y cierre (aunque varíe el número de turnos o el volumen de personal adscrito a él), la duración del periodo será Tp . La amplitud del intervalo de planificación suele ser la misma que la utilizada para el Plan de Materiales, si bien el planificador podría decidir tomar un horizonte inferior.
 - b) Las rutas de fabricación: operaciones, Centros de Trabajo en los que se realizan éstas y orden en el que deben ser ejecutadas.

- c) La información de los Centros de Trabajo: factores eficiencia y utilización medios ($\overline{E_k}$ y $\overline{U_k}$)¹ y tiempo real disponible por periodo en cada Centro de Trabajo (necesario para poder calcular la capacidad disponible). Para el cálculo de este último dato puede ser preciso conocer el número de trabajadores y máquinas de que dispone el Centro, las personas necesarias por cada máquina y, en su caso, los operarios que no precisan utilizar ninguna máquina para ejecutar su trabajo.

En cuanto a los datos a estimar en el modelo propuesto, pretenden representar el comportamiento de las variables aleatorias analizadas en los capítulos anteriores. Van a ser también, variables aleatorias (por lo que necesitamos calcular sus valores medios), pero agrupan cada una de ellas (tal y como veremos más adelante), el comportamiento de varias de las empleadas en la técnica CRP. La estimación se realizará a partir de datos históricos, es decir, de los valores que realmente tomaron en situaciones pasadas, los cuales se extraerán de las bases de datos mantenidas por la empresa en lo que se refiere al proceso productivo.

En concreto, necesitamos disponer de datos de los lotes procesados (ya finalizados) por la empresa en periodos anteriores. Así, para cada lote del ítem j , con un tamaño Q_j , emitido por la empresa, en la fecha Fe_{Q_j} , precisamos conocer:

- Momento de entrada o de comienzo del procesamiento en cada Centro de Trabajo k para ejecutar la operación i , al lote de tamaño Q_j (Ten_{Qijk}), entendido éste como el momento en que se comienza a procesar la operación i en el Centro k , que coincidirá con el momento en que se empieza a realizar la preparación del Centro si ésta fuera necesaria.
- Momento de finalización del procesamiento de la operación i al lote de Q_j unidades (Tfo_{Qijk}), entendido éste como el instante del tiempo en el que se finaliza la realización de la operación i a la última unidad del lote Q_j .
- Instante de finalización del proceso productivo del lote de tamaño Q_j (Tf_{Qj}); hecho que sucede cuando está en disposición de ser utilizado para la fabricación de otros ítems más complejos o para su venta (si se trata de un ítem final). Refleja el tiempo transcurrido desde la emisión hasta la terminación completa del lote. Este dato sólo es necesario si se desea planificar, además de la carga, el tiempo de suministro.

¹ Obtenidos con alguna técnica de Medición del Trabajo.

La información histórica de todas estas variables se recogerá a la llegada y salida de los lotes a los Centros de Trabajo o almacén, introduciendo su valor en la base de datos del software propuesto. Por supuesto, podría hacerse de manera automatizada, simplemente incorporando un código de barras a la documentación que constituye el paquete del pedido (para no tener que introducir el código del mismo y evitar errores), asignando el ordenador los momentos de tiempo de manera automatizada para las variables Ten_{Qijk} , Tfo_{Qijk} y Tf_{Qj} , a partir de los cuales el mismo software realizará posteriormente los cálculos de la planificación.

El único momento en el que sería necesario hacer un muestreo, sería a la hora de la implementación del software, si no disponemos de la información referida ya en la empresa, para lo que bastaría ir recogiendo la información señalada para todos los pedidos procesados durante un periodo de tiempo representativo, previo al comienzo de la utilización del software elaborado para realizar la Planificación de la Capacidad. Una vez arranque el sistema, se alimentará de la información que se obtendrá de cada pedido elaborado por la empresa, no siendo necesaria ninguna observación ni estudios de tiempos adicionales, salvo que se detecte algún problema o desviaciones fuera de control, en la planificación de la carga generada para algún ítem con respecto a la que realmente genere, cuestión que, como veremos más adelante, pondrá de manifiesto el software elaborado.

Ni que decir tiene, que en un entorno MRP (mucho más en uno ERP), la recogida de esta información es inevitable para el seguimiento del Plan de Pedidos y la posterior realización de la Programación de Operaciones y/o Gestión de Talleres en el muy corto plazo. También es imprescindible en CRP para poder calcular el Plan de Carga. En suma, el modelo propuesto no implica un aumento de los requerimientos de captura de información sobre el que ya habría que realizar con cualquier otra técnica. Por el contrario, ciñéndose la observación a los momentos de llegada y salida de los centros de trabajo y a la finalización del pedido, se reduce muchísimo el número de elementos a registrar en relación con los que necesita CRP (donde, como se vio en los capítulos anteriores, necesitaríamos observar la llegada de cada lote, la finalización de la cola de espera, la finalización de la preparación, la finalización de la ejecución, el final de la espera, etc., en cada Centro de Trabajo; ver Apartados 5.5.2. y 5.5.3.).

Retomando el estudio de las variables Ten_{Qijk} , Tfo_{Qijk} y Tf_{Qj} , hay que decir que todas son aleatorias y están expresadas en unidades de tiempo reales, ya que reflejan el número de horas, minutos o segundos laborables transcurridos desde la emisión.

Para la elaboración del Plan de Carga es preciso estimar el valor que tomarán los datos que tienen un comportamiento aleatorio. El procedimiento

seguido por la técnica CRP para la estimación de dichos valores, se basa en el uso de muestras que nos permitan el cálculo del valor medio de las distintas variables que precisa. La elección del tamaño de muestra es primordial para la representatividad de ésta y, por ende, para la exactitud de la estimación. Las características de la variable, así como los recursos de que dispone la empresa, definirán la técnica de Medición del Trabajo más adecuada² para su estudio, las cuales no están exentas de inconvenientes³. Esto implica además, que la empresa disponga del personal técnico cualificado para hacerlo, o que, por el contrario, contrate estos servicios con una empresa especializada. En todo caso, supone disponer de manera continuada⁴, de unos recursos que no están al alcance de todas las empresas y que, cuando menos, implicarán unos costes adicionales.

Por este motivo, y dado que con la técnica que proponemos, los datos de los tiempos se pueden ir incorporando en la base de datos del sistema MRP/ERP (entradas y salidas de cada Centro de Trabajo, comienzo de una operación, etc.), la utilización de éstos evitaría muchos de los problemas que implica la Medición del Trabajo, pudiendo obtener mejores estimaciones, al disponer de un número mayor de registros y al estar éstos permanentemente actualizados. Ello permite, no sólo una actualización continuada de los valores medios que se calculan por el software a partir de ellos, sino además detectar los cambios y desviaciones que con el tiempo se puedan ir produciendo, todo ello de una manera casi automatizada.

Si consideramos el total de lotes que se han fabricado de un determinado ítem desde que la empresa comenzó su andadura productiva, como su población objetivo, podremos estimar los valores medios de las variables con mayor fiabilidad que con el uso de muestras. No obstante, es necesario precisar que la población deberá ajustarse en el caso de que se hayan originado cambios en los sistemas de fabricación, que provoquen la falta de representatividad de los datos. Sería preciso, por tanto, tener acceso a bases de datos donde se incluyan los Planes de Materiales elaborados desde los inicios productivos de la empresa, o desde el momento de cambio en su proceso de fabricación.

² Por ejemplo, en las tareas con alto porcentaje de trabajo humano, parecería oportuno utilizar alguna técnica directa de Medición del Trabajo (véase, Apartado 3.3.).

³ Así, por ejemplo, las técnicas indirectas no consideran las diferencias propias de las empresas, cambios en los procedimientos, etc.; y, las técnicas directas, por su parte, necesitan el conocimiento de la media y desviación típica o de la proporción de la población, datos que no se disponen a priori y que, si bien se pueden tomar de una muestra inicial orientativa, ésta puede no ser representativa.

⁴ No sólo son necesarios estos estudios inicialmente, sino que además, periódicamente es preciso repetirlos muestreando las diferentes operaciones, Centros de Trabajo, etc., so pena de que empiecen a producirse importantes desviaciones de los datos empleados en la planificación CRP con respecto a los reales, debido a cambios en la eficiencia del personal, de los procesos, del comportamiento de los proveedores, de los clientes, etc.

Para evitar los riesgos propios de la utilización de muestras, la técnica de Planificación de Capacidad propuesta tomará las distintas poblaciones objetivo para las estimaciones de los valores. No obstante, si las poblaciones son de gran tamaño, los cálculos pueden conllevar demasiado tiempo, por lo que se podrían utilizar muestras como alternativa, siendo el tamaño de éstas el valor de la amplitud de la media móvil que se utilizará como estimador de las variables. En estos casos consideraremos que la población objetivo es lo suficientemente grande como para considerarla infinita (motivo por el que no se ha usado para los cálculos). Como alternativa podemos tomar el mayor tamaño de muestra que permita cumplir con el nivel de confianza y exactitud deseados. Así, partiendo de la base del desconocimiento del tamaño y comportamiento de la población, podemos utilizar un tamaño de muestra (n) para el caso más desfavorable, utilizable para todas las estimaciones y todos los tipos de muestreo⁵:

$$n = \frac{Z_{1-\frac{1-\alpha}{2}}^2 \times 0,25}{A^2} \quad (5.1)$$

Donde:

α = nivel de confianza (en tanto por uno).

$Z_{1-\frac{1-\alpha}{2}}$ = valor de la cola izquierda de una distribución normal $N(0,1)$, para una probabilidad de $1-(1-\alpha/2)$.

A = acuracidad o exactitud deseada (en tanto por uno).

Para la elaboración del Plan de Carga será preciso calcular, en primer lugar, el montante de las cargas generadas por cada uno de los lotes (emitidos y en proceso), diferenciando el Centro de Trabajo en el que se originarán y, a continuación, se procederá a la asignación de las cargas a los periodos de tiempo en el que serán necesarias, para cuyo conocimiento se tomará la información que nos ofrece el tiempo de suministro. Los elementos que condicionan ambos (cargas y periodificación) son los que provocan la aleatoriedad del Plan de Carga.

⁵ Véase Santos Peñas (1999, p. 88).

5.2.1. La carga de una operación

La adecuada estimación de la capacidad necesaria para el procesamiento de los lotes que conforman el Plan de Materiales, es una de las bases de la elaboración de un Plan de Carga fiable. La técnica CRP (ver Apartado 2.4.3.) considera, por separado, el efecto del tiempo de ejecución unitario, del tiempo de preparación del Centro de Trabajo y del tamaño del lote, no teniendo en cuenta el factor de defectuosas. Sin embargo, este procedimiento, además de arduo, puede no originar estimaciones realistas debido, principalmente, a las características intrínsecas del tiempo de preparación, que influyen en su comportamiento. Como ya detallamos en el Apartado 3.5.4.2., esta variable es indicadora de la necesidad de ajuste del Centro de Trabajo para la ejecución de una operación distinta de la anterior y corresponde a un lote completo. El valor que tome depende de la operación nueva y la recién acabada, por lo que, para estimar el tiempo de preparación medio de un lote, que va a recibir la operación i , sería conveniente conocer la operación precedente⁶.

Sin embargo, este nivel de detalle no se alcanza en la planificación hasta la Gestión de Talleres, ya en el muy corto plazo. Para estimar este tiempo sería preciso considerar todos los ítems que utilizan dicho Centro para la ejecución de alguna de las operaciones de su ruta. A partir de ahí, para cada combinación de lotes emitidos durante el tiempo de suministro, de todos los ítems analizados, sería preciso disponer de una tabla de frecuencia con los tiempos de preparación producidos. Teniendo en cuenta que la cantidad de combinaciones de ítems en proceso que se pueden obtener es muy grande, podríamos no tener datos suficientes para obtener resultados representativos. En este sentido, el número de combinaciones o variantes posibles de lotes en proceso está relacionado con: la flexibilidad del Centro de Trabajo (lo cual afecta al número de operaciones distintas que se pueden ejecutar en él), la amplitud de los tiempos medios de suministro de los ítems que utilizan el Centro, y la variabilidad de tamaño de los lotes, reduciéndose ampliamente en el caso de utilización de la técnica EOQ (*Economic Order Quantity*), o lote económico⁷, como técnica de dimensionado⁸.

⁶ Para más información sobre la influencia de la aleatoriedad del tiempo de preparación sobre el tiempo de carga véase García, Rabadán y Gessa (2003) o Rabadán y otros (2004).

⁷ Esta técnica se basa en la emisión de lotes de un tamaño único, el cual minimiza los costes relacionados con la gestión de los inventarios. Con ella se reduce la variabilidad del tiempo de suministro, al mantener constante el tamaño de lote. Véase Hopp, Spearman y Woodruff (1990, pp. 81-83).

⁸ La relación entre el uso de las distintas técnicas de dimensionado y su efecto sobre el comportamiento de la carga o del tiempo de suministro se ha analizado en varios trabajos, entre otros Gelders y Wassenhove (1982) o Molinder y Olhager (1998).

Por otro lado, el hecho de no considerar el factor de defectuosas de las operaciones, provoca que las estimaciones de carga realizadas con CRP estén infladas ya que esta técnica calcula el tiempo necesario para el procesamiento de todas las unidades que componen el lote emitido, cuando realmente éste se ve reducido por la retirada de las unidades defectuosas que se generan en el proceso. Téngase en cuenta que, para calcular la carga que generaría un lote de un ítem del Plan de Pedidos, CRP parte de los lanzamientos de pedidos planificados (ver Anexo 2). Para determinar éstos en MRP, se procede a dividir el tamaño de lote a elaborar (lote a recibir), entre el aprovechamiento de la ruta (o producto de los aprovechamientos de las operaciones que la componen, siendo el aprovechamiento igual a uno menos el factor de defectuosas). Dado que el aprovechamiento de la ruta toma valores entre cero y uno, al actuar como denominador, hará siempre que el lote a emitir sea mayor o igual que el lote a recibir. Obviamente, no en todas las operaciones se procesará un lote igual al que se emite, ya que las unidades defectuosas se irán retirando tras cada operación. En consecuencia, suponiendo que exista una proporción de defectuosas en cada operación de la ruta de un ítem, la primera operación se realizará a un número de unidades igual al lote a emitir Q_e , la segunda se hará a un número de unidades igual a $Q_e \times a_1$ (siendo a_1 el aprovechamiento de la primera operación), la tercera se hará a un número de unidades igual a $Q_e \times a_1 \times a_2$ (siendo a_2 el aprovechamiento de la segunda operación), y así sucesivamente hasta la última operación de la ruta. Obviamente, el número de veces que para un lote se realiza la primera operación, es mayor que el número de veces que se repite la segunda operación, que a su vez es mayor que el número de veces que se repetirá la tercera operación, y así sucesivamente. Por tanto, al utilizar para todas las operaciones un número de repeticiones igual al lote a emitir, se está inflando la carga calculada en las operaciones segunda y siguientes. Un ejemplo numérico al respecto, puede observarse en el Apartado 5.5.3.

En aras de proponer una técnica de Planificación de Capacidad más sencilla que CRP, dado que la estimación por separado del tiempo de preparación no asegura una mayor fiabilidad (incluso podría ser a la inversa), la Planificación de Capacidad propuesta en este trabajo manejará el tiempo de procesamiento o carga para un tamaño de lote emitido (Tc_{Qijk}), una vez retiradas las unidades defectuosas.

Teniendo en cuenta, que el (Tfo_{Qijk}) marca el momento en el que se finaliza la realización de la operación i a la última unidad del lote, y que (Ten_{Qijk}) establece el momento en que se comienza a procesar la operación i en el Centro k (que coincidirá con el momento en que se empieza a realizar la preparación del Centro si ésta fuera necesaria), es obvio que el tiempo de carga que se origina por el procesamiento de la operación i a un lote emitido de Q unidades del ítem j (Tc_{Qijk}),

puede ser calculado por diferencia entre el tiempo de finalización (Tfo_{Qijk}) y el de entrada en el Centro de Trabajo (Ten_{Qijk}):

$$Tc_{Qijk} = Tfo_{Qijk} - Ten_{Qijk} \quad (5.2)$$

Dado que tomamos valores reales de entrada (comienzo del procesamiento del lote) y salida del Centro (fin del procesamiento del lote), estaríamos considerando la capacidad necesaria para procesar sólo las unidades sin defectos que han llegado a la operación. Por lo tanto, ya se tiene en cuenta el factor de aprovechamiento de todas las operaciones anteriores en su ruta, así como otras pérdidas de unidades que pueden producirse en el proceso productivo (por ejemplo, en el desplazamiento o en la inspección).

Recordemos que para la Planificación de Capacidad mediante la mecánica de cálculo del modelo propuesto, necesitamos estimar el tiempo de carga medio para cada lote que compone el Plan de Materiales, utilizando para ello la media de los valores que se registraron en todas las ocasiones en las que se emitió un lote del mismo tamaño. En el caso de que no se hayan emitido lotes de un determinado tamaño, con anterioridad, no dispondremos de datos relativos a los tiempos de carga de cada operación, por lo que los valores que se utilizarán serán resultado de realizar una interpolación con los tiempos medios de los lotes, del mismo ítem, con un tamaño inmediatamente superior e inferior de entre los que se encuentren en la base de datos. Cuando el lote emitido sea mayor o menor que cualquiera de los procesados con anterioridad, se procederá a estimar los valores a partir del tiempo de carga unitario, considerando el máximo o mínimo tamaño de lote archivado.

El procedimiento seguido para la estimación del tiempo de carga de un lote [expresión (5.2)] nos ofrece resultados en unidades reales, ya que para sus cálculos se utilizan los momentos de comienzo de procesamiento del lote en el Centro de Trabajo y finalización de las operaciones, sin considerar los posibles descansos, retrasos o diferencias en la destreza de los distintos trabajadores o equipos productivos involucrados. Sin embargo, la carga debe ser conocida en unidades estándar, para su posterior comparación con la capacidad disponible, por lo que se hace necesario averiguar los factores de eficiencia y utilización aplicables. Éstos se han considerado datos fijados por la empresa o calculados con anterioridad a la planificación, y normalmente son resultado de estudios realizados con alguna técnica directa de Medición del Trabajo. Así, el tiempo de carga de un lote en horas estándar (C_{Qijk}) será:

$$C_{Qijk} = Tc_{Qijk} \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} \quad (5.3)$$

Donde:

- $\overline{E}_k$ = eficiencia media determinada por la empresa, para el Centro de Trabajo k .
- $\overline{U}_k$ = factor de utilización medio para el Centro de Trabajo k , calculado por la empresa.

5.2.2. Asignación de la carga de una operación

Las cargas originadas por el desarrollo de las distintas operaciones que componen la ruta de fabricación de los lotes incluidos en el Plan de Materiales, deben asignarse a los periodos de tiempo en el que se realizarán. Para ello será preciso conocer el momento de inicio y finalización del procesamiento de cada operación, así como el tamaño del cubo de tiempo utilizado en la planificación (Tp).

Disponemos de los datos relativos a los tiempos de comienzo y finalización del procesamiento de los lotes en los Centros de Trabajo (Ten_{Qijk} y Tfo_{Qijk}), los cuales se utilizaron para el cálculo de los componentes del tiempo de carga. Por ello, para la asignación de la capacidad necesaria se podrían usar los valores medios de dichos tiempos, para el tamaño de lote que se estudie. Sin embargo, consideramos más adecuado estimar el momento de finalización de una operación a partir de los valores del tiempo de carga (Tc_{Qijk}) y de entrada en el Centro (Ten_{Qijk}), que se utilizarán en la Planificación de Capacidad, en vez de usar, para su estimación, los datos históricos. Así, calcularemos este tiempo de la siguiente manera:

$$Tfo'_{Qijk} = \overline{Ten_{Qijk}} + \overline{Tc_{Qijk}} \quad (5.4)$$

Por tanto, si bien tomaremos para la distribución de la carga de las operaciones, los valores medios de los tiempos de entrada incluidos en el sistema, los tiempos de finalización de las operaciones serán calculados a partir de las estimaciones de los tiempos de carga y entrada, de manera que el valor medio del tiempo de finalización se utilizará únicamente para calcular el tiempo de carga real [expresión (5.2)].

La estimación del momento de entrada en el Centro de Trabajo se calculará como el valor medio de los valores que se registraron en todas las ocasiones en las que se emitió un lote del mismo tamaño. Como se ha comentado para el tiempo de carga, en el caso de que no se dispongan de datos relativos al tamaño de lote

emitido, se realizará una interpolación de los tiempos medios de los lotes, del mismo ítem, con un tamaño inmediatamente superior e inferior que se encuentren en la base de datos. Si el lote emitido es mayor o menor que cualquiera de los procesados con anterioridad se procederá a estimar los valores a partir de una relación de proporcionalidad.

Partiendo de la hipótesis de estabilidad en el tamaño de las duraciones de los cubos de tiempo⁹, para realizar la asignación de la carga generada por el procesamiento de la operación i a un lote de Q unidades del ítem j en el Centro de Trabajo k , debemos determinar el número de periodos en los que distribuiremos ésta, al que notaremos como α_{Qijk} y se calculará como:

$$\alpha_{Qijk} = E(Tfo'_{Qijk} / Tp) - E(\overline{Ten}_{Qijk} / Tp) + 1 \quad (5.5)$$

Si el valor de α_{Qijk} es uno, la operación se procesa totalmente en un único periodo, por lo que asignaremos a éste toda la carga. Bajo la hipótesis de emisión de los lotes al final de los periodos (el procesamiento de éstos no comenzará hasta el inicio del periodo siguiente al que se emite), el primer periodo al que se le asignará la carga de la operación i será $(p_e + p_l)$, siendo p_e el periodo de emisión del lote y p_l el resultante de aplicar la siguiente fórmula:

$$p_l = E(\overline{Ten}_{Qijk} / Tp) + 1 \quad (5.6)$$

En este caso, la carga estimada, en unidades estándar, asignada al periodo $p_e + p_l$ ($\overline{C}_{Qijk(p_e + p_l)}$), por el procesamiento de la operación i a un lote de Q_j unidades del ítem j en el Centro de Trabajo k , será, basándonos en la expresión (5.3):

$$\overline{C}_{Qijk(p_e + p_l)} = \overline{Tc}_{Qijk} \times \overline{E}_k \times \overline{U}_k \quad (5.7)$$

Donde $\overline{Tc}_{Qijk}$ sería igual al tiempo medio de carga para un lote Q_j , en unidades reales [calculado como la media de los valores que toma la carga en los lotes procesados del mismo tamaño, según la expresión (5.2)].

⁹ En la práctica es común el uso de los *calendarios de taller*, los cuales incluyen tan sólo las jornadas laborales, por lo que los periodos suelen tener la misma duración.

En términos generales, independientemente del valor que tome α_{Qijk} , los periodos concretos en los que se deberá distribuir la carga resultarán de sumarle a p_e el valor de p_b :

$$p_b = E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + b \quad \text{desde } b = 1 \text{ hasta } \alpha_{Qijk} \quad (5.8)$$

Cuando la carga corresponda a varios periodos ($\alpha_{Qijk} > 1$) el valor que se deberá asignar al primero de ellos ($b = 1$) será:

$$\overline{C_{Qijk(p_e + p_1)}} = \left[Tp \times \left[E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + 1 \right] - \overline{Ten_{Qijk}} \right] \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} \quad (5.9)$$

En un periodo intermedio (cuando $\alpha_{Qijk} > 2$), con un valor de b mayor que 1 pero menor que α_{Qijk} , todas las horas reales de éste están dedicadas a ejecutar la carga, por lo que la cantidad que se asignará, en horas estándar, será:

$$\overline{C_{Qijk(p_e + p_b)}} = Tp \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} \quad \text{para } 1 < b < \alpha_{Qijk} \quad (5.10)$$

En el último periodo ($b = \alpha_{Qijk}$), la carga asignada será la que resta después de haber distribuido ésta entre los periodos anteriores:

$$\overline{C_{Qijk(p_e + p_\alpha)}} = \left[Tp - \left[Tp \times \left[E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + \alpha_{Qijk} \right] - \overline{Tfo'_{Qijk}} \right] \right] \times \overline{E_k} \times \overline{U_k} \quad (5.11)$$

Todos estos cálculos, donde se reflejan el periodo y carga asignados, se pueden resumir en la Tabla 5.1.

Para aclarar el procedimiento expuesto utilizaremos un ejemplo. Supongamos que, para un lote de Q_j unidades, emitido en el periodo 5, el momento estimado de comienzo del procesamiento de la operación 2 en el Centro de Trabajo 2 ($\overline{Ten_{Q2j2}}$), es de 50 h.r. y el de carga ($\overline{Ten_{Q2j2}}$) de 35 h.r. Todos ellos representan, respectivamente, el tiempo medio que transcurrirá desde la emisión del pedido hasta la entrada para comenzar el procesamiento de la operación 2, así como el tiempo necesario para el procesamiento de dicha operación a todas las unidades que componen el lote.

En este caso el valor del tiempo de finalización de la operación ($\overline{Tfo'_{Q2j2}}$), de acuerdo con la expresión (5.4), es de 85 h.r.:

$$\overline{Tfo'_{Q2j2}} = \overline{Ten_{Q2j2}} + Tc_{Q2j2} = 50 + 35 = 85$$

a_{Qijk}	Periodo de asignación	Carga estimada por periodo (h.e.) = $\overline{C_{Qijk(p_e+p_l)}}$
1	$p_e + E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + 1$	$\overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{E_k} \times \overline{U_k}$
2	$p_e + E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + 1$	$\left[Tp \times \left[E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + 1 \right] - \overline{Ten_{Qijk}} \right] \times \overline{E_k} \times \overline{U_k}$
	$p_e + E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + 2$	$\left[Tp - \left[Tp \times \left[E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + a_{Qijk} \right] - \overline{Tfo'_{Qijk}} \right] \right] \times \overline{E_k} \times \overline{U_k}$
>2	$p_e + E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + 1$	$\left[Tp \times \left[E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + 1 \right] - \overline{Ten_{Qijk}} \right] \times \overline{E_k} \times \overline{U_k}$
	$p_e + E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + 2$	$Tp \times \overline{E_k} \times \overline{U_k}$
	...	...
	$p_e + E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + a_{Qijk}$	$\left[Tp - \left[Tp \times \left[E(\overline{Ten_{Qijk}} / Tp) + a_{Qijk} \right] - \overline{Tfo'_{Qijk}} \right] \right] \times \overline{E_k} \times \overline{U_k}$

Tabla 5.1. Valor de la carga asignada por periodo en función del número de periodos entre los que se distribuye.

Fuente: elaboración propia.

Si la duración de los periodos es de 40 h.r. (cinco días productivos de ocho horas reales de jornada laboral), el número de cubos de tiempo en los que se distribuirá la carga (α_{Qijk_s}) será, según la expresión (5.5):

$$\alpha_{Q2j2} = E(\overline{Tfo'_{Q2j2}} / Tp) - E(\overline{Ten_{Q2j2}} / Tp) + 1 = E(85 / 40) - E(50 / 40) + 1 = 2 - 1 + 1 = 2$$

Para averiguar cuál es el primer periodo en el que sea asignará carga debemos calcular el valor de p_l :

$$p_l = E(\overline{Ten_{Q2j2}} / Tp) + 1 = E(50 / 40) + 1 = 2$$

En este ejemplo, la operación comenzará a procesarse en el periodo 7 ($p_e + p_l = 5 + 2$) y finalizará en el 8 (dado que $\alpha_{Qijk_s} = 2$).

La carga asignada al periodo 7 resultará, según la expresión (5.9):

$$\begin{aligned}\overline{C_{Q2j27}} &= \left[Tp \times \left[E(\overline{Ten_{Q2j2}} / Tp) + 1 \right] - \overline{Ten_{Q2j2}} \right] \times \overline{E_2} \times \overline{U_2} = \\ &= \left[40 \times \left[E(50/40) + 1 \right] - 50 \right] \times \overline{E_2} \times \overline{U_2} = 30 \times \overline{E_2} \times \overline{U_2}\end{aligned}$$

Al periodo 8, por otra parte, se le asignarán las horas resultantes de aplicar la expresión (5.11):

$$\begin{aligned}\overline{C_{Q2j28}} &= \left[Tp - \left[Tp \times \left[E(\overline{Ten_{Q2j2}} / Tp) + \alpha_{Q2j2} \right] - Tfo'_{Q2j2} \right] \right] \times \overline{E_2} \times \overline{U_2} = \\ &= \left[40 - \left[40 \times \left[E(50/40) + 2 \right] - 85 \right] \right] \times \overline{E_2} \times \overline{U_2} = 5 \times \overline{E_2} \times \overline{U_2}\end{aligned}$$

Podemos decir, por tanto, que las 35 h.r. de carga de la operación 2 se distribuyen de la siguiente manera: 30 h.r. en el periodo 7 y 5 h.r. en el periodo 8 (Figura 5.1.).

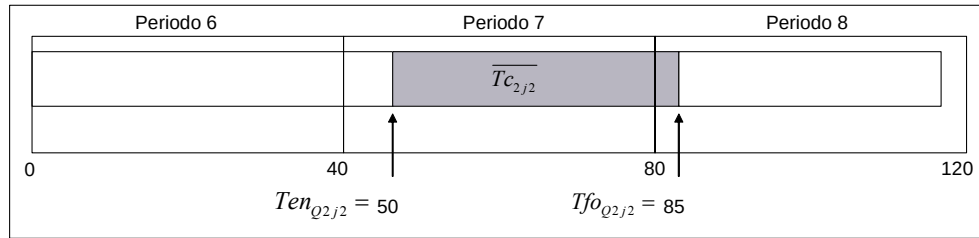


Figura 5.1. Ejemplo de distribución de la carga.

5.2.3. Desarrollo del Plan de Carga

El Plan de Carga obtenido con nuestra propuesta, al igual que en el resultante de CRP, reflejará la carga planificada por periodo y Centro de Trabajo. Para calcularlo sumaremos la carga necesaria para el procesamiento de todos los lotes de ítems que utilicen el Centro de Trabajo en cuestión. Así, la carga originada por un ítem j , para un periodo p , en el Centro de Trabajo k , se calculará como la suma de las cargas generadas por todos los lotes del ítem j , que se procesen en el Centro de Trabajo k durante el periodo p , independientemente del momento en el que fue emitido (siendo HP el número total de periodos que incluye el horizonte de planificación, pudiéndose emitir como máximo un lote por cada ítem y cubo de tiempo) y de la operación que se le realice en dicho Centro de Trabajo (del total de I operaciones que realiza la empresa). Generalizando:

$$\overline{C_{jkp}} = \sum_{l=1}^{HP} \sum_{i=1}^I \overline{C_{Qij,kp}} \quad (5.12)$$

Cuando una operación i no genere carga en el periodo p estudiado, el valor de $\overline{C_{Qij,kp}}$ será cero.

Dentro del Plan de Carga del Centro de Trabajo k , se incluirá el total de horas estándar necesarias para cada uno de los HP periodos en los que se divide el horizonte de planificación. Para calcularlo sumaremos la carga necesaria para todos los ítems que utilicen el Centro de Trabajo en cuestión (con un máximo de J ítems distintos). Así, la carga por periodo p en el Centro de Trabajo k , se calculará como la suma de las cargas de todos los ítems que lo utilizan para alguna de las operaciones de su ruta:

$$\overline{C_{kp}} = \sum_{j=1}^J \overline{C_{jkp}} \quad (5.13)$$

Donde $\overline{C_{jkp}}$ será cero si el ítem j no utiliza el Centro de Trabajo k , o cuando no genera carga en el periodo p estudiado.

Como se ha podido observar, una vez calculadas las cargas por periodo originadas por los lotes emitidos, establecidos por el Plan de Materiales, el procedimiento de cálculo del Plan de Carga no se diferencia del seguido por el CRP, calculando la carga generada por las operaciones para, seguidamente, agruparlas por periodos y Centros de Trabajo.

5.3. EL PLAN DE CAPACIDAD

Si pretendemos diseñar una técnica de Planificación de Capacidad que pueda sustituir el uso del CRP, es preciso establecer los mecanismos para calcular los desajustes que se produzcan entre capacidad necesaria y disponible. Por ello es necesario conocer también esta última para que, comparada con el Plan de Carga, nos pueda dar como resultado las desviaciones por periodo.

El procedimiento que vamos a aplicar para el cálculo de las disponibilidades de capacidad, es igual al utilizado en otras técnicas de Planificación de Capacidad a medio y corto plazo: una vez conozcamos el tiempo disponible, en unidades reales, por periodo en cada Centro de Trabajo, bastará con

multiplicarlo por los factores de eficiencia y utilización correspondientes, para obtener unidades de tiempo comparables con la carga.

Las diferencias en el concepto de capacidad disponible (pudiéndose considerar para su cálculo las condiciones teóricas, situaciones ideales, o las circunstancias normales de producción¹⁰), originan distintos valores del Plan de Capacidad. Como se analizó en el Apartado 2.4.3.2., consideramos más oportuno, para nuestro modelo, utilizar el mismo criterio que para CRP, determinando el tiempo disponible para el “*volumen de output que podría ser logrado por periodo de tiempo en las circunstancias normales de producción*” (Domínguez, 1995a, p. 40).

Suponiendo que un Centro de Trabajo k disponga de T_k turnos por día, cuyas características pueden ser distintas¹¹, y periodos de duración igual o superior al día, la capacidad disponible estimada, en unidades de tiempo estándar, para un periodo p se calculará según la expresión (4.40), la cual se indica a continuación:

$$\overline{CD}_{kp} = \sum_{t=1}^{T_k} \left\{ u.r._{kt} \times \left[\min \left(\frac{n^{\circ} trab\ maq_{kt}}{n^{\circ} trab\ por\ maq_{kt}}, n^{\circ} maq_{kt} \right) + n^{\circ} trab_{kt} \right] \right\} \times \quad (5.14)$$

$$\times \text{días laborables del periodo}_p \times \overline{E}_k \times \overline{U}_k =$$

Donde:

$u.r._{kt}$ = unidades reales de tiempo del turno t correspondiente al Centro de Trabajo k .

$n^{\circ} trab\ maq_{kt}$ = número de trabajadores que necesitan una máquina para ejercer su trabajo en el turno t y el Centro de Trabajo k .

$n^{\circ} trab\ por\ maq_{kt}$ = número de trabajadores necesarios, en el turno t , para poner en funcionamiento cada máquina que compone el Centro de Trabajo k .

$n^{\circ} maq_{kt}$ = número total de máquinas que pertenecen al Centro de Trabajo k y que se utilizan en el turno t .

¹⁰ Véanse otras definiciones de capacidad disponible en Wemmerlöv (1984, pp. 6-7), Stevenson (1990, p. 307), Walters (1991, p. 278) o Meredith (1992, p. 176).

¹¹ Duración, número de trabajadores y máquinas operativas.

$n^{\circ} trab_{kt}$ = número de trabajadores, en el turno t del Centro de Trabajo k , a los que no les afecta la disponibilidad de máquinas para trabajar y que pueden realizar su trabajo, ya sea individualmente o en grupo (si una tarea precisa del trabajo conjunto con otros compañeros se considerará, a efectos del cálculo de la capacidad, como uno solo).

T = número de turnos del Centro de Trabajo k .

5.4. DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA TÉCNICA DE PLANIFICACIÓN DE CAPACIDAD PROPUESTA

Obviamente, la aplicación del modelo propuesto implica el manejo de un importante volumen de información, ya que, si bien el número de variables a emplear es bastante menor que el usado por CRP, sí que se hace necesario el registro continuado para poder mantener los valores medios siempre actualizados. Además, dado el alto volumen de lotes de diferentes ítems que podría tener que procesar la empresa, así como la existencia de diversos Centros de Trabajo, es evidente la necesidad de utilizar un apoyo informático para llevarla a la práctica de manera eficiente. Ello, además, permitirá automatizar el registro de la información y la realización de los cálculos, lo cual evitará errores en la utilización de la técnica, además de reducir el tiempo necesario para la obtención de las estimaciones de las variables y para la elaboración de la Planificación de Capacidad a corto plazo. Tales son las razones que nos han llevado a desarrollar una aplicación informática, cuyo prototipo¹² se adjunta en este trabajo, que se acompaña con un Manual de Usuario (Anexo 1) con objeto de facilitar su manejo.

Para su creación nos hemos basado en un sistema informático de bases de datos que hace viable el uso de las distintas poblaciones objetivo que se generan en el estudio de las variables aleatorias del modelo, evitando, de esta manera, los riesgos propios de la utilización de muestras y permitiendo mantener y actualizar los datos de las operaciones realizadas a los distintos ítems que elabora una empresa. Además, el cálculo del valor medio de las variables, a utilizar en la

¹² En este prototipo se ha considerado que la carga de una operación se podrá distribuir en un máximo de cuatro periodos, de esta manera se consigue una mayor operatividad. No obstante, si tenemos en cuenta que la mayoría de las empresas utiliza, a este nivel de planificación, la periodificación por semanas, la simplificación permite un margen muy amplio, ya que el máximo número de periodos necesarios para procesar una operación sería de cuatro semanas (lo cual no es habitual). No obstante, para aquellas empresas cuyas características de producto o proceso no se ajusten al caso anterior, el programa podría ser fácilmente adaptado para ampliar la duración del procesamiento.

planificación, se realiza automáticamente por el programa informático, por lo que el tiempo para la obtención y actualización de las estimaciones se reduce al mínimo.

El software desarrollado ha sido elaborado en la base de datos Microsoft® Access®, incluida en el paquete Microsoft® Office®, pudiéndose utilizar entornos Windows® (XP, Vista, NT o Seven). Este sistema se puede utilizar en configuraciones multipuesto, con un solo servidor y varios PC, pudiéndose introducir datos en el programa de manera simultánea desde los distintos Centros de Trabajo y ser analizados a la vez por el encargado de tomar las decisiones relativas a la Planificación de la Capacidad. Todo ello permite conocer en tiempo real posibles retrasos en los tiempos que conforman la ruta de fabricación (esperas, procesamientos o desplazamientos) ayudando a la empresa a realizar una mejor Gestión de Clientes, tomando las medidas oportunas en relación a la prioridad de entrada en los Centros de Trabajo en un intento de no alterar demasiado la fecha prevista de entrega.

Al ser una aplicación informática independiente no precisa que la empresa tenga implementado un sistema ERP/MRP, lo que, unido a los escasos requerimientos técnicos que necesita, facilita su implantación en pequeñas y medianas empresas ofreciéndoles un programa muy sencillo de utilizar con conceptos muy claros y un interfaz amigable e intuitivo. Así, por ejemplo, el trabajador de planta tan sólo tiene que utilizar una pantalla, en la que se le solicita que indique qué operación va a realizar y el momento que finaliza ésta. Todo ello redundaría en la necesidad de utilizar menores recursos económicos, ya sea como consecuencia de los bajos requerimientos técnicos o por la reducción de tiempo y dinero necesario para la formación de especialistas en el manejo del programa (dada la simplicidad del uso de éste).

Otra de las ventajas de la aplicación del modelo propuesto (a través del programa informático diseñado), es la posibilidad de utilizar herramientas de estudio de la evolución de las desviaciones de capacidad y del comportamiento de las variables aleatorias, con objeto de observar anomalías en su distribución que originen una disminución de la fiabilidad de las estimaciones de capacidad o alteraciones en el proceso productivo.

Por todo ello, el software desarrollado no sólo realiza una Planificación de Capacidad a corto plazo con bajos requerimientos técnicos y económicos sino que, además, ofrece la posibilidad de desarrollar el Plan de Talleres, ayuda a realizar una adecuada Gestión de Clientes, permite conocer el desarrollo del proceso de producción en tiempo real y ofrece importante información para la toma de decisiones.

Analizaremos a continuación las entradas necesarias para el funcionamiento del programa informático, así como las salidas que proporciona, resultantes de la aplicación del modelo propuesto a través del sistema informático, dentro de las cuales se incluyen las herramientas de análisis que ofrece el programa diseñado.

5.4.1. Entradas requeridas por el programa

El sistema informático recoge todos los datos fijados por la empresa, o calculados de manera independiente, que son necesarios para realizar una Planificación de Capacidad a corto plazo. El planificador debe introducir en el programa, caso de que todavía no estén informatizados, los datos que caracterizan el proceso productivo y la Planificación de Capacidad¹³:

- a) Horizonte de planificación para el Plan de Carga (Ilustración 5.1.), especificando el número de cubos de tiempo y la duración de cada uno de ellos en unidades de tiempo reales.
- b) Las rutas de fabricación (Ilustración 5.2.): operaciones, Centros de Trabajo en los que se realizan éstas y orden de ejecución.
- c) La información de los Centros de Trabajo (Ilustración 5.3.): factores de eficiencia y utilización medios ($\overline{E_k}$ y $\overline{U_k}$) y datos necesarios para el cálculo del tiempo real disponible por periodo en cada Centro de Trabajo.
- d) El Plan de Materiales (Ilustración 5.4.): indicando, al menos, tamaño del lote (Q_j) y la fecha de emisión (Fe_{Q_j}).

¹³ Estos están incluidos dentro de los datos fijados por la empresa necesarios para el desarrollo de la técnica de Planificación de Capacidad propuesta, referidos en el Apartado 5.2., datos que ya deben estar en la base de datos tecnológica si la empresa trabaja en entorno ERP. A este respecto, se puede observar que con la aplicación informática se elimina la necesidad de introducir información sobre los pedidos en curso, dado que éstos ya están incluidos en el sistema MRP, que, como punto de partida inevitable, debe utilizar la empresa para obtener el Plan de Pedidos del que parte, tanto CRP, como la técnica que proponemos.



Planificación temporal

PLANIFICACIÓN TEMPORAL

Duración del horizonte de planificación

Horas por periodo: 40
Días por periodo: 5

HORAS POR PERIODO: horas reales por periodo del horizonte de planificación.
DÍAS POR PERIODO: nº de días que conforma cada periodo del horizonte de planificación.

Días no laborables

Fecha	Descripción
12/10/2005	F
15/10/2005	S
18/10/2005	D
22/10/2005	S
23/10/2005	D

Fecha: día, mes y año en el formato DD/MM/AA.
Descripción: S (sábado), D (Domingo), F (Festivo), P (Paradas).

Buttons: Cambiar datos, Guardar cambios, Agregar nueva fecha, Volver al Menú Principal, Menú Anterior, Ayuda.

Ilustración 5.1. Pantalla de introducción de los datos de la planificación temporal.



Operaciones

DATOS DE LAS OPERACIONES

Código de Operación

O2

Datos de la operación

Centro de Trabajo: CT2
Item: P1
Operación Anterior: O1
Operación Siguiente: O3

Buttons: Anterior operación, Siguiente operación, Agregar nueva operación, Volver al Menú Principal, Menú Anterior, Ayuda.

Ilustración 5.2. Pantalla de introducción de datos de las operaciones.

Información de los Centros de Trabajo

Introducir información de los Centros de Trabajo o Talleres

Centro	Número de turno	Hora de comienzo	Hora de fin	Trabajadores con máquinas	Máquinas	Trabajadores por máquina	Trabajadores independientes	Eficiencia	Utilización
CT1	1	8:00:00	16:00:00	20	9	2	0	90	87
CT2	1	8:00:00	16:00:00	10	11	1	0	94	95
CT3	1	8:00:00	16:00:00	3	1	3	0	98	91

Agregar nuevo turno o Centro de Trabajo

Ilustración 5.3. Pantalla de introducción de datos sobre los Centros de Trabajo.

Plan de Materiales

PLAN DE MATERIALES Lotes emitidos no finalizados

Código Pedido	Periodo de emisión	Fecha de Emisión	Código de Item	Tamaño de lote	Fecha prevista de recepción
L011P1	11	17/03/2006	P1	600	28/03/2006
L012P1	12	24/03/2006	P1	500	05/04/2006
L013P1	13	31/03/2006	P1	1000	12/04/2006
L015P1	15	14/04/2006	P1	1000	28/04/2006
L016P3	16	21/04/2006	P3	1000	02/05/2006
L017P1	17	28/04/2006	P1	5000	09/05/2006
L017P3	17	28/04/2006	P3	10000	15/05/2006

Volver al Menú Principal Menú Anterior Agregar nuevo lote Ayuda

Ilustración 5.4. Pantalla de introducción de los lotes que conforman el Plan de Materiales.

Por otro lado, también se requiere información relativa a las variables aleatorias necesarias para el desarrollo de la Planificación de Capacidad¹⁴. En concreto, para el cálculo del valor y la asignación de la carga se precisa conocer los

¹⁴ La cual compone el segundo bloque de información necesario, según se refirió en el Apartado 5.2., para el desarrollo de la Planificación de Capacidad con el modelo propuesto alternativo a CRP.

momentos de entrada para comenzar la preparación de un Centro de Trabajo para realizar una operación concreta a un lote de un ítem, así como los de salida o finalización del procesamiento de la operación a dicho lote. Tales datos se estiman a partir de los valores que se disponen de éstos en las bases de datos del sistema, las cuales se van recogiendo a través de un interfaz con el trabajador de planta, donde éste introducirá estos datos para cada operación de cada lote que se procese en los Centros de Trabajo de los que forme parte, quedando registrados en la base de datos del sistema. Esta información será la que el propio sistema utilizará para calcular los momentos de entrada y finalización de cada operación de los Pedidos Planificados y el término del procesamiento de un lote. Este último se utilizará para el cálculo del tiempo de suministro de los lotes emitidos. En concreto, los datos requeridos al operario de un Centro de Trabajo son los siguientes:

- Fecha y hora de entrada o comienzo de procesamiento en el Centro k del lote Q_j para la operación i (Ilustración 5.5.): con ellas se calculará el tiempo transcurrido desde la emisión del lote hasta la entrada en cada Centro de Trabajo k para ejecutar la operación i , a un lote de tamaño Q_j (Ten_{Qijk}).
- Fecha y hora de finalización de la operación (Ilustración 5.6.): necesarias para determinar las horas que han pasado desde que se emitió el lote hasta que se ejecuta la operación i a todas las unidades que lo componen (Tfo_{Qijk}).
- Fecha y hora de finalización del proceso productivo de un lote¹⁵: utilizadas para calcular las horas transcurridas desde la emisión hasta la terminación completa del lote de tamaño Q_j (Tf_{Qj}).

Para la introducción de los datos de las operaciones, el operario tan sólo debe hacer constar la operación a realizar y el código de lote entrante¹⁶ ya que el

¹⁵ Para obtener esta información se tratará el momento de finalización de un lote como si fuera una operación. A esta operación final tan sólo se le asignará momento de entrada, el cual representa el tiempo en el que el lote queda terminado y dispuesto para su venta o utilización en la fabricación de un ítem más complejo.

¹⁶ La necesidad de introducir el código de lote entrante puede eliminarse mediante un sistema de códigos de barras, reduciéndose así la labor humana e incidiendo sobre el tiempo necesario para recopilar los datos y sobre la veracidad de éstos.

resto de los datos se rellenan automáticamente¹⁷, por lo que apenas interfiere en el proceso productivo.

Datos de las operaciones

Introducir información de las operaciones de los lotes en proceso

Código de pedido: L018P2
Operación: O4

Datos del pedido

Item: P2
Tamaño de lote: 20000
Periodo de emisión: 18
Fecha de emisión: 05/05/2006

Entrada en Centro de Trabajo

Fecha	Entrada	Hora de entrada	Unidades a la entrada
10/10/2006		12:23:58	19860

Guardar

Salir sin guardar (este registro será eliminado)

Ilustración 5.5. Pantalla de introducción de los datos de la entrada de un lote en un Centro de Trabajo.

Datos de las operaciones

Introducir información de las operaciones de los lotes en proceso

Código de pedido: L017P3
Operación: O6

Datos del pedido

Item: P3
Tamaño de lote: 10000
Periodo de emisión: 17
Fecha de emisión: 28/04/2006

Salida del Centro de Trabajo

Fecha de finalización	Hora de finalización	Unidades a la salida
27/02/2007	9:58:00	

Guardar

Recuerde que debe pinchar en "Guardar" para que los datos de la operación queden registrados

Salir sin guardar (este registro será eliminado)

Ilustración 5.6. Pantalla de introducción de los datos de la finalización de la ejecución de una operación a todas las unidades que componen un lote.

¹⁷ Los valores de *unidades a la entrada* y *unidades a la salida* que se reflejan en las Ilustraciones 5.5. y 5.6. también deben ser introducidos por el operario de planta, si bien no son imprescindibles para la Planificación de Capacidad ya que serán utilizados para el análisis de la evolución de los factores de aprovechamiento de las operaciones.

5.4.2. Salidas ofrecidas por el programa

La aplicación informática desarrollada ofrece como salidas principales el Plan de Capacidad para todo el horizonte de planificación fijado y la planificación del tiempo de suministro. Además de ello, el programa proporciona al planificador diversos análisis relativos a la evolución del proceso productivo o a la exactitud de las planificaciones elaboradas.

5.4.2.1. Salidas fundamentales

Como alternativa al uso de CRP, el software elaborado para la técnica de Planificación de Capacidad propuesta en este trabajo debe ofrecer, al menos, todas las salidas de información fundamentales que suelen ofrecer la mayoría de las aplicaciones CRP del mercado. Por ello, el programa informático desarrolla la Planificación de Capacidad a corto plazo (Ilustración 5.7.), resaltando los periodos en los que se producen sobrecargas y permitiendo, además, el análisis de los lotes que las originan. Todo ello a través de menús desplegables que hacen más sencilla su utilización y reducen los inconvenientes del exceso de información.



Ilustración 5.7. Plan de Carga por Centros de Trabajo.

El software diseñado ofrece también la opción de disponer de información individualizada de la carga generada por cada uno de los lotes dentro de cada Centro (Ilustración 5.8.); es decir, elabora un Plan de Talleres. En concreto, el planificador puede conocer, además de la capacidad necesaria para procesar los lotes, el momento previsto de entrada y salida del Centro de Trabajo. Todo ello acompañado de una representación gráfica de la ocupación prevista del Centro, en función de la carga planificada para cada una de las operaciones a realizar en cada lote.

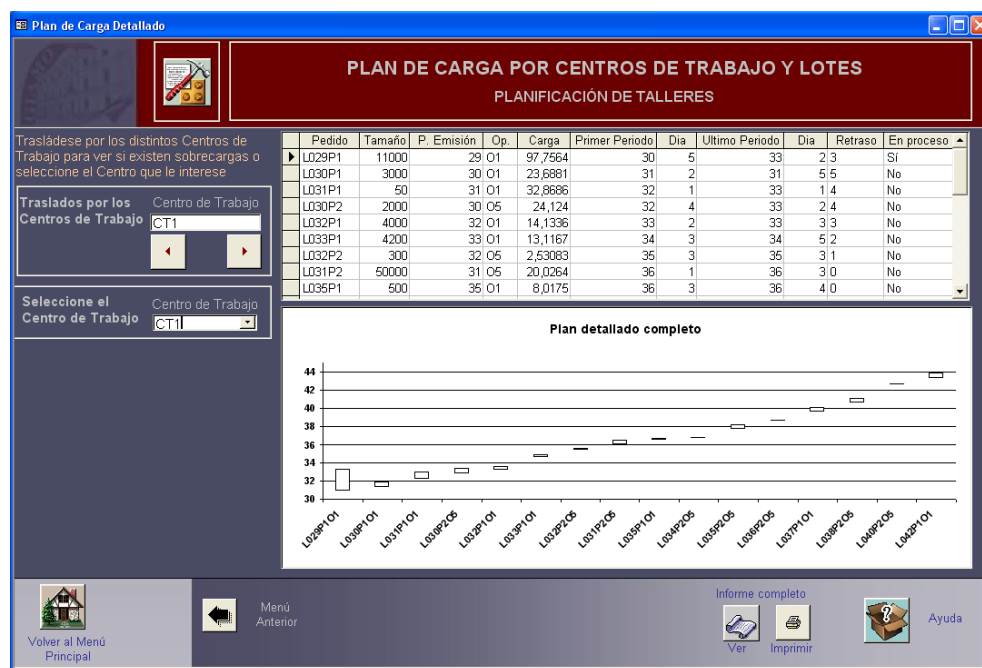


Ilustración 5.8. Plan de Carga por Centros de Trabajo y lotes.

Por otro lado, el programa planifica los tiempos de suministro (Ilustración 5.9.), lo cual, si bien no es imprescindible dentro de las técnicas de Planificación de Capacidad, suele ser habitual encontrarlo en muchas de las aplicaciones CRP comercializadas.

En este sentido, se ofrece el tiempo de suministro en días para cada uno de los lotes que están incluidos en el Plan de Materiales o Plan de Pedidos de la empresa.



Código de Pedido	Tiempo de suministro planificado (días)
L017P1	47,5
L017P3	65
L018P2	70
L018P3	325

Ilustración 5.9. Pantalla que refleja el tiempo de suministro planificado.

5.4.2.2. Herramientas de análisis ofrecidas por el programa

El software elaborado, además de proporcionar los planes fundamentales citados en el apartado anterior, incluye una serie de herramientas de análisis, que ofrecen una información sumamente útil para la toma de decisiones. En este sentido, se incluyen aplicaciones que analizan:

- Las desviaciones de capacidad.
- La exactitud de los tiempos de suministro planificados.
- La evolución del valor de las variables más relevantes.
- Los valores extremos y tendencias de los tiempos de carga y entrada en los Centros de Trabajo.

5.4.2.2.1. Análisis de las desviaciones de capacidad

Uno de los objetivos fundamentales de la Planificación de Capacidad en todos sus niveles, es intentar ajustar lo más posible, necesidades y disponibilidades

de capacidad, persiguiendo con ello reducir al mínimo, los efectos indeseables derivados de las continuas sobrecargas y subempleos de capacidad que podrían producirse en los Centros de Trabajo. Para ello, puede ser muy interesante estudiar la evolución de las desviaciones de la capacidad necesaria real, ya sea con respecto a la planificada o a la disponible (Ilustración 5.10.).

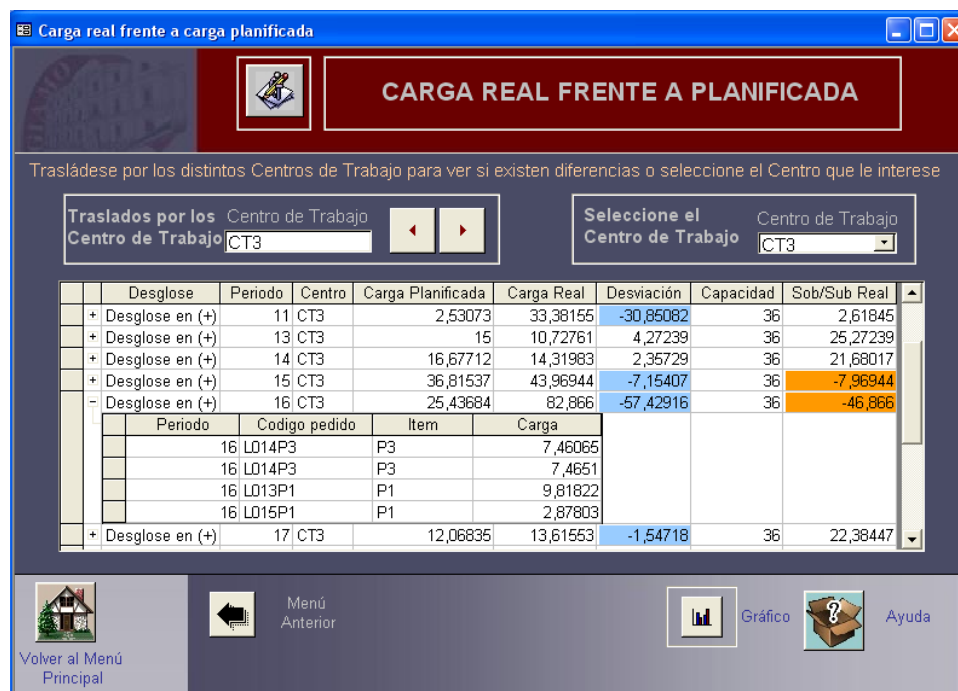


Ilustración 5.10. Comparación de la carga real frente a la planificada.

La exactitud alcanzada con la técnica de planificación diseñada, se puede extraer de las desviaciones de la carga planificada por periodo y Centro de Trabajo, en comparación con la capacidad necesaria real. En este sentido, el programa informático ofrece los valores de estas desviaciones, tanto tabulados como en gráficas, permitiendo analizar si los niveles de exactitud de las estimaciones de carga están dentro de lo que se podría considerar *normal*¹⁸.

Para determinar el intervalo de variación de los valores de las desviaciones de capacidad, se definen unos límites de control, los cuales se obtienen considerando que el valor deseado de desviación debería ser cero, puesto que en tal

¹⁸ Como lo que se desea con el estudio de las desviaciones de la carga real frente a la planificada es analizar la calidad de las estimaciones realizadas se han utilizado, para dicho estudio, las herramientas propias del control de calidad. Véase, por ejemplo, Hansen (1980), Ozeki (1992) o Besterfield (1995).

caso la carga planificada coincidiría con la real. Suponiendo que la variable que estudiamos siguiera una distribución que se aproxime a la Normal¹⁹, los límites de control se calcularán como el valor deseado (VD), más tres veces su desviación típica (límite superior, LCS), y menos tres veces la desviación típica (límite inferior, LCI)²⁰.

$$\begin{aligned}LCS &= VD + 3 \times \sigma \\LCI &= VD - 3 \times \sigma\end{aligned}\tag{5.15}$$

Dado que el sistema de bases de datos, intrínseco al programa informático, almacena la información de todos los lotes que se van procesando, el valor de la desviación típica se actualiza constantemente y con ello los límites de control.

Se considerará normal que los valores de las desviaciones oscilen por encima y por debajo del valor deseado, de forma que:

- No haya valores fuera de los límites de control.
- No haya anomalías en la distribución de los valores, como podrían ser: puntos consecutivos a un lado u otro del valor central, tendencia ascendente o descendente, etc.

Con la representación gráfica de las desviaciones de capacidad (Ilustración 5.11.), el planificador puede observar fácilmente si la distribución temporal de los valores refleja alguna anomalía, lo cual puede ser indicativo de:

- Un cambio en alguna variable externa al sistema que no ha sido recogido por el programa informático. Nos referimos a la información relativa a la configuración productiva de la empresa: rutas, horario de turnos, número de turnos o factores de eficiencia y utilización.
- La sustitución de algunos proveedores, que incida sobre el porcentaje de unidades defectuosas, de manera que afecte a la representatividad de los valores medios de las variables incluidas en el sistema.

¹⁹ Según el Teorema Central del Límite, la suma de un número moderadamente grande de variables aleatorias independientes, distribuidas de manera uniforme (aunque con cualquier tipo de distribución) a lo largo de un intervalo, se puede considerar que está distribuida normalmente. Véase, por ejemplo, Parzen (1972, p. 170) o Prawda (1988, p. 809).

²⁰ También se podrían utilizar unos límites de control menos estrictos que los anteriores, calculando éstos con el valor medio de las desviaciones en vez de utilizar el valor deseado.

- La renovación de maquinarias por otras, cuyas prestaciones resulten claramente superiores o inferiores a las utilizadas anteriormente. Como consecuencia, los tiempos de ejecución medios de las operaciones ya no serían representativos.
- Una variación importante en el mix de productos de la empresa, incluyendo la ampliación o reducción, de la gama de productos elaborados. Este cambio afecta al tiempo de carga de las operaciones a través del tiempo de preparación (cuyo valor medio almacenado por el sistema puede no representar la situación actual) al tiempo de entrada en el Centro de Trabajo (al incidir en las prioridades de la cola de espera).

Por otro lado, el estudio de la evolución de las desviaciones de la capacidad necesaria frente a la disponible (sobrecargas y subcargas), ayudará en las decisiones relativas a las ampliaciones o reducciones de capacidad productiva, permitiendo la identificación de estacionalidades en la producción, proporcionando información para determinar el nivel en el que hacer frente a las desviaciones de capacidad (corto, medio o largo plazo).



Ilustración 5.11. Pantalla con los gráficos representativos de la evolución de las desviaciones.

5.4.2.2.2. Análisis de la exactitud de los tiempos de suministro planificados

Otra de las herramientas disponibles se dedica al estudio de la exactitud de los tiempos de suministro (Ilustración 5.12.), ofreciendo una comparativa entre las fechas previstas de entrega y los tiempos de suministro planificados, con los valores que se produjeron realmente en todos los lotes elaborados y finalizados por la empresa (ver Apartado 5.7.).



Código Pedido	Periodo Emision	Fecha de Emision	Item	Tamaño de lote	FINALIZACIÓN LOTE			TIEMPOS DE SUMINISTRO		
					Fecha Prevista	Fecha Real	Desviación	Planificado	Real	Desviación
L009P2	9	03/03/2006	P2	1500	10/03/2006	15/03/2006	-5	11,21052	12	-0,78948
L009P1	9	03/03/2006	P1	100	13/03/2006	24/03/2006	-11	11,33333	21	-9,66667
L009P3	9	03/03/2006	P3	1500	15/03/2006	25/03/2006	-10	8,75	22	-13,25
L010P1	10	10/03/2006	P1	100	24/03/2006	22/03/2006	2	14	12	2

Ilustración 5.12. Comparación del tiempo de suministro planificado frente a real y de las fechas reales y previstas de entrega.

5.4.2.2.3. Análisis de la evolución de las variables más relevantes

El programa informático también ofrece la posibilidad de analizar la evolución de las variables aleatorias más relevantes para la empresa. En concreto, el prototipo de la aplicación informática anexa a este trabajo, estudia las tendencias de los tiempos de ejecución, preparación y carga unitario, además del factor de defectuosas que se origina en cada operación (Ilustración 5.13.). Para disponer de esta información, el programa requerirá, además de los datos recogidos en el Apartado 5.4.1., otros valores que, si bien no son necesarias para la Planificación de Capacidad, permitirán disponer de información valiosa para la toma de decisiones de la empresa, sin exigir apenas tiempo en su introducción. Nos referimos a:

- Las unidades que entran en el Centro de Trabajo (véase la Ilustración 5.5.) para que se les ejecute la operación i a un lote del ítem j (Q_{ij}).
- Las unidades sin defectos que salen del Centro de Trabajo (como se observa en la Ilustración 5.6.), tras ejecutársele una operación i a un lote del ítem j (Q_{fij}).
- Fecha y hora de comienzo de la ejecución de la operación (Ilustración 5.14.), con las que se calcularán las horas transcurridas desde la emisión, hasta que se inicia la ejecución de una operación i en el Centro de Trabajo k al lote de tamaño Q_j (Tco_{Qijk}).

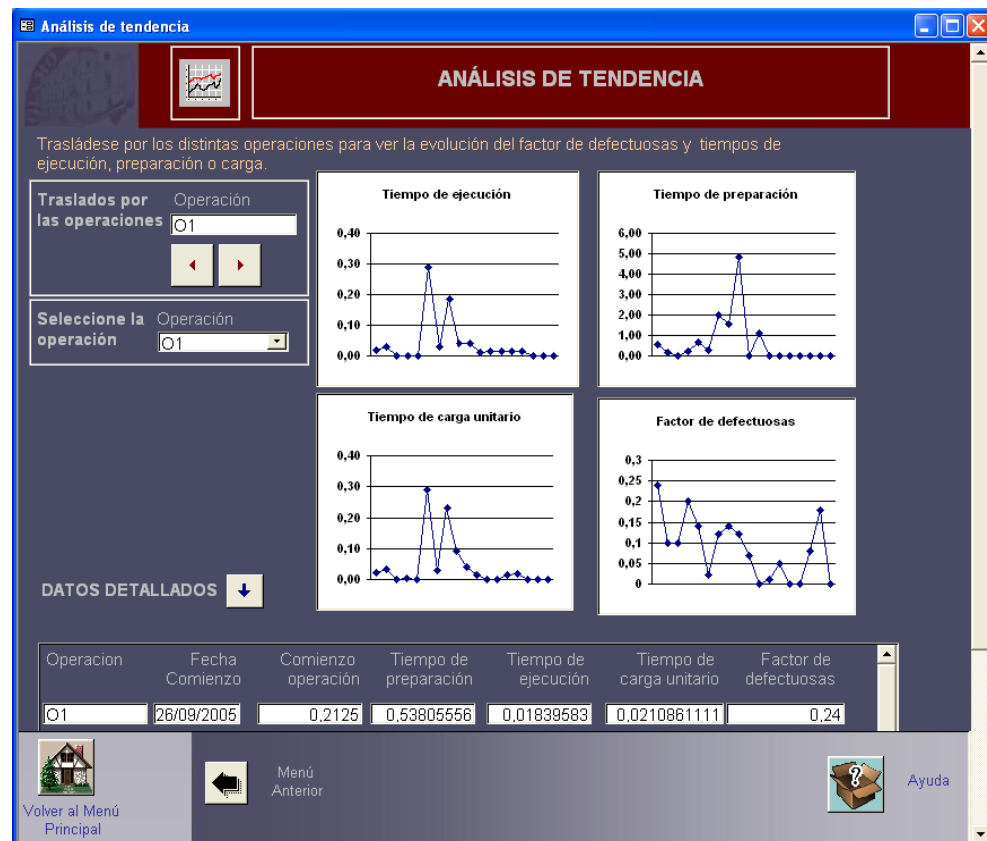


Ilustración 5.13. Pantalla del análisis de tendencias del tiempo de ejecución, preparación, carga unitario y factor de defectuosas.

Ilustración 5.14. Pantalla para introducir los datos del comienzo de la ejecución de una operación a un lote.

Estos datos, junto con los incluidos en las entradas básicas del programa, nos permiten obtener los tiempos de preparación, ejecución y carga unitarios, así como el factor aprovechamiento de cada operación, que serán calculados automáticamente por la aplicación informática.

En este sentido, el tiempo de preparación del Centro de Trabajo, que se origina a la entrada de éste, se calculará como la diferencia entre el momento de comienzo de ejecución de la operación (Tco_{Qijk}) y el de comienzo de la preparación del Centro para el desarrollo de dicha operación (Ten_{Qijk}):

$$tp_{ik} = Tco_{Qijk} - Ten_{Qijk} \quad (5.16)$$

Por otra parte, el tiempo de ejecución por unidad procesada se determinará en función del tamaño del lote que entra en el Centro de Trabajo (Q_{ij}), dado que será después de procesarse cuando se le retiren las unidades defectuosas que se originan tras la operación. Para su cálculo, consideraremos el momento de comienzo de la ejecución (Tco_{Qijk}) y el de salida del Centro (Tfo_{Qijk}), ya que éste indica la finalización del procesamiento:

$$te_i = \frac{Tfo_{Qijk} - Tco_{Qijk}}{Q_{ij}} \quad (5.17)$$

Para la determinación del tiempo de carga unitario se utilizará un procedimiento similar al aplicado para el cálculo del tiempo de ejecución unitario. Se determinará tomando la diferencia del tiempo transcurrido desde la entrada o

comienzo de la preparación del Centro de Trabajo para la realización de la operación en cuestión (Ten_{Qijk}), y la finalización de la operación (Tfo_{Qijk}), y dividiendo dicha diferencia entre el tamaño de lote a la entrada:

$$tc_{ijk} = \frac{Tfo_{Qijk} - Ten_{Qijk}}{Q_{ij}} \quad (5.18)$$

En último lugar, el factor de aprovechamiento de las operaciones que componen las rutas de fabricación de los distintos ítems, se calculará teniendo en cuenta las unidades que entran (Q_{ij}) y salen (Qf_{ij}) del Centro de Trabajo:

$$a_i = \frac{Qf_{ij} - Q_{ij}}{Q_{ij}} \quad (5.19)$$

La información relativa a los cambios en los valores de los tiempos y factores de aprovechamiento, acumulada en el sistema de bases de datos utilizado por el programa informático, nos permite, no sólo la realización de una Planificación de Capacidad más actualizada, sino que además nos ofrece la posibilidad de descubrir tendencias en los valores que nos indiquen problemas en el proceso²¹. Por ejemplo, una reducción sostenida del factor de aprovechamiento, puede ser indicio de la necesidad de aumentar la frecuencia del mantenimiento de las máquinas, de sustituir o haber sustituido alguna de ellas, o de la reducción de la calidad de alguna/s de la/s materia/s prima/s o ítems semiterminados adquiridos a proveedores.

5.4.2.2.4. *Análisis de los valores extremos y tendencias de los tiempos de carga y entrada en los Centros de Trabajo*

La estimación de los tiempos de carga y los momentos de entrada en los Centros de Trabajo²², a partir de la media de los datos almacenados en el sistema, implica asumir los errores propios de la utilización de valores medios, esto es, el

²¹ Igualmente podría realizarse el estudio inverso, es decir, analizar el efecto sobre los tiempos o sobre el aprovechamiento, de un cambio que afecte al proceso productivo (proveedores, regla de prioridad a la entrada de un Centro de Trabajo, simplificaciones en la ejecución de una operación, actualizaciones de máquinas, aumento de la automatización, etc.).

²² Consideramos como entrada en el Centro de Trabajo el momento en que empieza el procesamiento de la operación a un lote (entendido esto cuando se procede al ajuste del Centro si la operación realizada justo anteriormente era distinta) en un Centro de los que componen la ruta de fabricación o bien la llegada a almacén, si ya se le han ejecutado todas las operaciones.

riesgo de que se desvirtúe el resultado a causa de la existencia de valores extremos derivados de circunstancias extraordinarias (por ejemplo, una jornada de huelga o de protesta de los trabajadores), o de tendencias en los datos almacenados.

Así, si se producen retrasos de materiales, averías de maquinarias o niveles de absentismos superiores a lo habitual (es decir, pérdidas de tiempo que no pueden considerarse incluidas en el factor de utilización; ver Apartado 2.4.3.) y, por ejemplo, los tiempos de carga o los momentos de entrada en los Centros de Trabajo pudieran tomar valores inusualmente altos, que no son representativos y convendría eliminarlos antes de calcular el valor medio que se usará para estimar tales tiempos.

Por otro lado, los tiempos reales de carga o de entrada en los Centros de Trabajo, con valores inusualmente bajos, pueden ser debidos, por ejemplo, a recientes cambios en el proceso productivo que reduzcan el tiempo de suministro que podría ser previsto por el planificador, o a un error en la recogida o almacenamiento de esta información. En el primero de los casos sería conveniente eliminar los valores que no representen la situación actual, de manera que sólo se mantengan en la base de datos los que se hayan originado a partir del cambio en el proceso. Sin embargo, en el segundo caso, tan sólo sería conveniente suprimir el tiempo cuyo valor es significativamente menor que los habituales, ya que podría desvirtuar la media que se utiliza como estimador.

También sería conveniente tener en cuenta la existencia de tendencias ascendentes o descendentes en los valores reales de los tiempos de carga o entrada a los Centros de Trabajo, ya que, dado que su variación es progresiva, pueden pasar inadvertidas al planificador.

Por todos los motivos citados, hemos considerado conveniente crear una herramienta dentro del programa informático que permite alertar de los valores extremos y tendencias que se producen en los tiempos de carga de todas las operaciones, así como en los momentos de entrada en los Centros de Trabajo. Para ello, es necesario que el planificador defina qué es para él un valor extremo y cuántos periodos continuados de variación en un mismo sentido considerara tendencia. Una vez introducidos estos datos en la pantalla presentada en la Ilustración 5.15., el programa realiza un análisis de los valores extremos y tendencias (Ilustración 5.16.), identificando el origen de la anomalía y permitiendo eliminar aquellos datos que el planificador considere que pueden alterar la representatividad de los valores medios, que se utilizan para estimar los tiempos de carga de las operaciones y el momento de entrada en los distintos Centros de Trabajo.

CRITERIOS PARA ANALIZAR TENDENCIAS

Defina los criterios que desea utilizar para analizar las posibles tendencias y valores extremos que se pueden originar en el desarrollo de las operaciones

Estimación de las horas de entrada en cada Centro de Trabajo

Porcentaje de variación máximo:

Número de periodos para considerar que existe tendencia:

Estimación del tiempo de carga total de un lote

Porcentaje de variación máximo:

Número de periodos para considerar que existe tendencia:

Ayuda

Realizar análisis de valores extremos y tendencias

Ilustración 5.15. Pantalla para fijar los criterios que se utilizarán en el análisis de valores extremos y tendencias de los tiempos de carga y entrada en los Centros de Trabajo.

ANÁLISIS DE TENDENCIAS Y VALORES EXTREMOS DE LOS TIEMPOS DE CARGA DE LOS LOTES Y LOS MOMENTOS DE ENTRADA EN LOS CENTROS DE TRABAJO

	Código	Periodo	Item	Tamaño	Operación	ENTRADA AL CENTRO DE TRABAJO				TIEMPO DE CARGA DEL LOTE				Ver datos
						Valor actual	Último valor	%Variación	Tendencia	Valor actual	Último valor	%Variación	Tendencia	
Alta variación en la carga	L002P1	2	P1	100	O1	41,7	40,61	2,68	1	0,25	0,19	31,151	0	Ver datos
Alta variación en la entrada	L004P1	4	P1	100	O1	43,68	37,74	15,7427	3	0,32333	0,25	29,333	0	Ver datos
Tendencia en la entrada	L029P1	29	P1	11000	O3	64,93	0	0	8	8,06944	0	0	0	Ver datos

Volver al Menú Principal
 Menú Exactitud de planificaciones
 Informe completo
 Ayuda

Ilustración 5.16. Análisis de valores extremos y tendencias de los tiempos de carga y entrada en los Centros de Trabajo.

Si bien la detección y eliminación de los valores extremos y de las tendencias, podrían realizarse automáticamente por el programa, velando de esta

manera, por la representatividad de las estimaciones de los tiempos que utiliza para la planificación, esta herramienta se plantea como una fuente de información para el planificador, dejándole tomar la última decisión en relación a la incorporación de los datos inusuales al sistema.

De esta manera, además de la utilización de este estudio para evitar la distorsión en el valor medio de los tiempos, con la información resultante del análisis, el planificador puede conocer de manera exacta el origen de los retrasos en el tiempo de suministro de algunos ítems, identificando aquellos que se deben a variaciones de tiempo superiores a los fijados por el planificador y mostrando en qué momento se han producido tales alteraciones.

Por otro lado, con esta herramienta de análisis se pueden observar tendencias en los valores de los tiempos que pueden ser reflejo de cambios en la empresa para los que no se valoró su influencia sobre la reducción del tiempo de suministro. En este sentido, seguramente se esperaría una mejora de los tiempos cuando, por ejemplo, se producen sustituciones de maquinaria, se realizan cambios en la distribución en planta de los Centros de Trabajo o se ofrecen programas de formación a los empleados, en cuyos casos, sería común encontrar valores extremos de tiempos de carga o entrada. Sin embargo, la empresa puede poner en práctica otras medidas que también podrían implicar variaciones en los valores de los tiempos aunque no sea su objetivo prioritario. Como ejemplo, éste podría ser el caso de los efectos de los cambios en materias primas, proveedores, combustibles, lubricantes de máquinas, políticas de personal, etc., que podrían incidir sobre el tiempo de suministro si suponen alteraciones en las unidades defectuosas, las averías de las máquinas o la eficiencia de los trabajadores.

Concluyendo, podemos decir que la utilidad del análisis de tendencias y valores extremos es múltiple:

- Mejora la fiabilidad de las estimaciones de los tiempos de carga y momentos de entrada en los Centros de Trabajo, ya que ayuda a mantener valores representativos de los tiempos en la bases de datos del sistema.
- Complementa el análisis de la exactitud de los tiempos de suministro planificados (véase Apartado 5.4.2.2.2.), pudiendo ofrecer información sobre el origen de las desviaciones, identificando el momento en el que se producen las variaciones. Además, en el caso de que el estudio de los valores extremos y tendencias no incluyan ningún resultado vinculado a los tiempos de suministro para los que se originan desviaciones de los valores planificados con los reales, podemos deducir que éstas se deben

a la acumulación de variaciones en los diferentes tiempos que lo componen, siendo más difícil su control.

- Informa sobre los efectos que pueden tener sobre el tiempo de suministro, las decisiones tomadas por los distintos subsistemas de la empresa (cambios en las políticas de contratación de proveedores, renovación de maquinaria, formación y recompensas de empleados, mix de productos, etc.).

5.5. COMPARACIÓN DE LA MECÁNICA Y UTILIZACIÓN DE CRP, CON LAS DEL MODELO ALTERNATIVO PROPUESTO

A continuación pasaremos a realizar en el presente apartado, una comparación entre CRP y el modelo alternativo propuesto, centrándonos, no sólo en la mecánica de cálculo de ambas, sino además en los aspectos fundamentales que se refieren a su utilización práctica en la empresa, lo que abarca la obtención, mantenimiento y actualización de la información empleada, así como la eficiencia y ajustes necesarios de los Planes de Capacidad obtenidos. Con objeto de identificar y explicar con más claridad las diferencias entre ambas técnicas, utilizaremos un ejemplo muy simple en el que, ante una misma situación (con los mismos valores de tiempos de suministro, tiempos de ejecución, etc.), podamos comparar la mecánica y exigencias de información de ambas técnicas. Como veremos, la única diferencia con respecto al volumen de carga resultante, se origina por el hecho de que CRP no considera la reducción del tamaño de lote que se produce a lo largo del proceso productivo, debido al efecto de las unidades defectuosas²³. Bajo esta consideración utilizaremos el ejemplo que se empleó para describir la mecánica de CRP en el Anexo 2, sólo que en este caso, desarrollaremos el proceso completo para la obtención de toda la información específica que

²³ Como ya se comentó en el Apartado 5.2.1., para calcular la carga que generaría un lote de un ítem del Plan de Pedidos, CRP parte de los lanzamientos de pedidos planificados. Para determinar éstos en MRP, se procede a dividir el tamaño de lote a elaborar (lote a recibir), entre el aprovechamiento de la ruta, resultado del producto de los aprovechamientos de las operaciones que la componen (donde el aprovechamiento es igual a uno menos el factor de defectuosas). Siendo el aprovechamiento de la ruta un valor entre uno y cero, al actuar como denominador, hará siempre que el lote a emitir sea igual o mayor que el lote a recibir. Obviamente, en el segundo caso, que es el más habitual, no en todas las operaciones se procesará un lote igual al que se emite, ya que las unidades defectuosas se irán retirando tras cada operación. Por tanto, al utilizar para todas las operaciones un número de repeticiones igual al lote a emitir, se está inflando la carga calculada en las operaciones segunda y siguientes. Un ejemplo numérico al respecto, puede analizarse en el Apartado 5.5.3.

requiere cada una de las técnicas (ya que la obtención de los datos que son comunes a ambas, se analizó en dicho Anexo 2, por lo que aquí los recordaremos de forma resumida para mayor comodidad del lector), y nos limitaremos a resumir el proceso de cálculo CRP que ya se detalló pormenorizadamente en dicho Anexo, remitiéndonos al mismo para un mayor detalle. De esta forma intentamos poder comparar el proceso de obtención de la información y cálculo de CRP, con el que implicaría el modelo propuesto.

Consideraremos que, en este ejemplo, al igual que en el Anexo 2, la empresa desea realizar una programación hacia delante, es decir, comenzará las actividades relacionadas con el procesamiento de un lote en el momento de emisión del pedido. Este tipo de programación generará un Plan de Carga más fiable (de cara al cumplimiento de las fechas de entrega del Plan de Pedidos), que el obtenido con la programación hacia atrás (la asignación se realiza desde la fecha prevista de entrega) ya que con esta última cualquier aumento en los tiempos que componen el tiempo de suministro provocará retrasos en la finalización prevista²⁴.

Recordemos que el ejemplo desarrollado en el Anexo 2 se centraba en una empresa que elaboraba tres ítems (A, B y C), para lo que precisaba de tres Centros de Trabajo (CT1, CT2 y CT3) en los que realizaba un total de siete operaciones (Figura 5.2.), e inspeccionaba los lotes al final de la ruta.

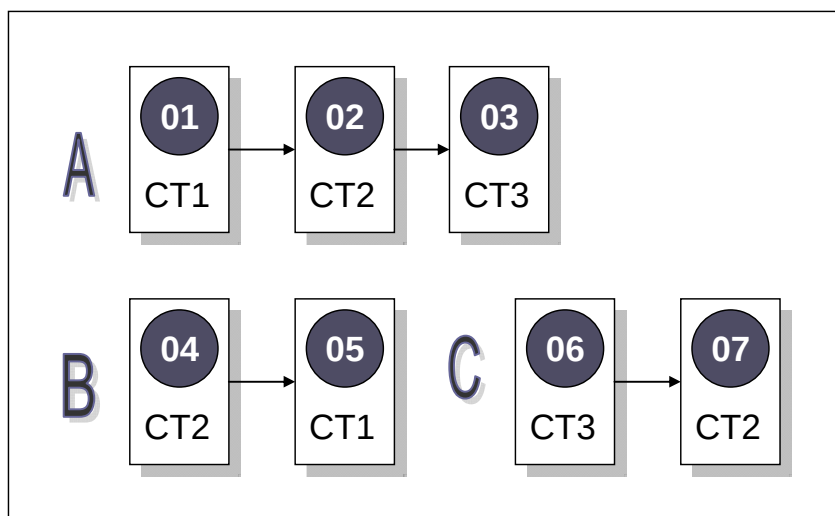


Figura 5.2. Rutas de fabricación de los ítems.

²⁴ No obstante, en CRP el procedimiento más habitual es la programación hacia atrás. Véase, por ejemplo, Wemmerlöv (1984, p. 32), Connor (1986, p. 21), Cheng (1986, p. 443), Scott (1994, p. 162), Companys y Coromias (1995, p. 276), Slack (1997, p. 22) o Jonsson y Mattsson (2002, p. 94).

El programa informático del modelo alternativo propuesto recoge todos los datos de las operaciones en la pantalla “Datos de las operaciones” del menú para la gestión de datos del proceso productivo. Como se puede observar en la Ilustración 5.17., para cada una de las operaciones se incluye información con respecto al Centro donde se realiza, el ítem afectado y el orden dentro de su ruta de fabricación (mediante la inclusión de la operación anterior y siguiente).

The screenshot shows a software window titled "Operaciones". Inside, there's a red header bar with a small icon and the text "DATOS DE LAS OPERACIONES". Below this, the interface is divided into several sections. On the left, under "Código de Operación", there's a large box containing "O1". To the right, under "Datos de la operación", there are four input fields: "Centro de Trabajo" with "CT1", "Item" with "A", "Operación Anterior" with "I", and "Operación Siguiente" with "O2". Below these fields are three buttons: "Anterior operación" (with a left arrow icon), "Siguiente operación" (with a right arrow icon), and "Agregar nueva operación" (with a red cross icon). At the bottom of the window, there are three more buttons: "Volver al Menú Principal" (with a house icon), "Menú Anterior" (with a left arrow icon), and "Ayuda" (with a question mark icon).

Ilustración 5.17. Pantalla para la introducción de los datos de las operaciones en el programa informático.

Una vez conocida la información de las rutas, recabaremos los datos necesarios para realizar la Planificación de Capacidad a corto plazo. En este sentido, precisamos conocer una serie de datos comunes a las dos técnicas (Plan de Materiales, pedidos en curso, factores eficiencia y utilización de los Centros de Trabajo y capacidad disponible) y otros que marcarán la diferencia entre los dos procedimientos utilizados para los cálculos de la carga.

5.5.1. Datos comunes a las dos técnicas²⁵

Para realizar la Planificación de Capacidad a corto plazo en entornos MRP/ERP, además de conocer las rutas de fabricación (Figura 5.2.), necesitamos disponer de una serie de datos concretos, sea cual sea la técnica a emplear.

En primer lugar, es necesario disponer del Plan de Materiales cuya viabilidad se pretende determinar con la Planificación de la Capacidad, que para nuestro ejemplo es el que se transcribe en la Tabla 5.2. Dicho Plan recoge los lotes que se emitirán a lo largo del horizonte de planificación, especificándose el número de unidades y el periodo de emisión de cada pedido.

Obviamente, el Plan de Materiales no contiene los pedidos en proceso de fabricación²⁶, por lo que es necesario considerarlos aparte. La Tabla 5.3. recoge la carga necesaria en cada Centro de Trabajo, que se precisa para terminar todos los lotes en proceso de fabricación a finales del momento cero (momento de arranque del Horizonte de Planificación).

Ítem/Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
A	100		100		100	100		
B		2.000	2.000	2.000			2.000	
C	500	500		500		400		500

Tabla 5.2. Plan de Materiales.

En general, para las técnicas de Planificación Detallada de la Capacidad, también es necesario conocer la carga que generarán los lotes que se encuentran en curso de fabricación, además de los nuevos lotes emitidos. Así, en nuestro ejemplo la capacidad necesaria para el procesamiento de los lotes en proceso es la reflejada en la Tabla 5.3.

El modelo propuesto alternativo a CRP, sin embargo, recoge a través del programa informático, los lotes incluidos en el Plan de Materiales (Ilustración 5.18.), manteniendo dentro de éste todos aquellos lotes que no han sido finalizados, es decir, aquellos que se encuentran en curso.

²⁵ Ver Apartado A2.2. del Anexo 2.

²⁶ Se trata de los pedidos en curso que, en el proceso de bruto a neto, se descuentan de las necesidades brutas del periodo para poder calcular las necesidades netas que dan origen a los pedidos planificados. Ver, por ejemplo, Domínguez y otros (1995a, pp. 131-136), Heizer y Render (2001, pp. 161-163) o Alfalla y otros (2008, pp. 186-160).

Ítem	Centro de Trabajo	Periodos		
		1	2	3
A	CT1	10,868	5,753	
	CT2		14,056	
	CT3		0,569	
B	CT1		20,125	12,833
	CT2	20,113		
C	CT2	3,812	6,165	
	CT3	5,867		

Tabla 5.3. Carga de los pedidos en curso.



Código Pedido	Periodo de emisión	Fecha de Emisión	Código de Ítem	Tamaño de lote	Fecha prevista de recepción
L000A	0	17/03/2006	A	100	28/03/2006
L000B	0	17/03/2006	B	2000	05/04/2006
L000C	0	17/03/2006	C	500	12/04/2006
L001A	1	24/03/2006	A	100	28/04/2006
L001C	1	24/03/2006	C	500	09/05/2006
L002B	2	31/03/2006	B	2000	15/05/2006
L002C	2	31/03/2006	C	500	25/05/2006
L003A	3	07/04/2006	A	100	31/05/2006
L003B	3	07/04/2006	B	2000	31/05/2006
L004B	4	14/04/2006	B	2000	31/05/2006
L004C	4	14/04/2006	C	500	31/05/2006
L005A	5	21/04/2006	A	100	02/06/2006
L006A	6	28/04/2006	A	100	09/06/2006
L006C	6	28/04/2006	C	400	05/06/2006
L007B	7	05/05/2006	B	2000	09/06/2006
L008C	8	12/05/2006	C	500	09/06/2006

Ilustración 5.18. Pantalla “Plan de Materiales” del programa informático.

A diferencia de muchas aplicaciones CRP, el software elaborado para la mecánica de cálculo propuesta no precisa conocer, de forma independiente, la carga generada por los lotes en curso, ya que el programa diseñado mantiene información referente al lugar de la ruta de fabricación en el que se encuentran los distintos lotes en proceso. De esta manera realiza la Planificación de Capacidad para todos los lotes emitidos no finalizados, se encuentren en curso o no estén iniciados aún.

Para elaborar una Planificación de Capacidad completa es preciso conocer la capacidad disponible, con objeto de compararla con la necesaria y así evaluar las desviaciones (ver Apartado 5.5.6.3.). Esta información, junto con los valores de los factores eficiencia²⁷ y utilización²⁸, se recoge en la Tabla 5.4.

Centro de Trabajo	CT1	CT2	CT3
Horas de trabajo/turno en h.r.	8	8	8
Número de turnos/día	1	1	1
Trabajadores con máquinas	3	5	2
Máquinas	2	3	1
Trabajadores por máquina	2	3	2
Trabajadores independientes	0	1	0
Factor eficiencia medio (E_k)	0,8	0,85	0,89
Factor utilización medio (U_k)	0,95	0,92	0,9

Tabla 5.4. Algunos datos necesarios de los Centros de Trabajo.

En este sentido, el programa informático incluido en el modelo propuesto, extrae los datos relativos a la capacidad de los Centros de Trabajo de la pantalla “Información de los Centros de Trabajo” (Ilustración 5.19.)

Por otro lado, la información relativa al horizonte de planificación es recogida por la aplicación informática a través de la pantalla “Planificación Temporal” que se refleja en la Ilustración 5.20.

²⁷ El Apartado A2.2.2.1. del Anexo 2 recoge el detalle del proceso de obtención del factor de eficiencia de cada Centro de Trabajo para el ejemplo en cuestión.

²⁸ El Apartado A2.2.2.2. del Anexo 2 recoge el detalle del proceso de obtención del factor de utilización de cada Centro de Trabajo para el ejemplo en cuestión.

Información de los Centros de Trabajo

Introducir información de los Centros de Trabajo o Talleres

Centro	Número de turno	Hora de comienzo	Hora de fin	Trabajadores con máquinas	Máquinas	Trabajadores por máquina	Trabajadores independientes	Eficiencia	Utilización
CT1	1	8:00:00	17:12:38	3	2	2	0	80	95
CT2	1	9:00:00	14:06:54	5	3	3	1	85	92
CT3	1	8:00:00	10:29:49	2	1	2	0	89	90

Agregar nuevo turno o Centro de Trabajo

Volver al Menú Principal Menú Anterior Ayuda

Ilustración 5.19. Pantalla “Información de los Centros de Trabajo” del programa informático.

Planificación temporal

PLANIFICACIÓN TEMPORAL

Duración del horizonte de planificación

Horas por periodo: 40
Días por periodo: 5

Días no laborables

Fecha	Descripción
30/10/2005	D
01/11/2005	F
05/10/2005	S
06/10/2005	D
21/01/2006	

HORAS POR PERIODO: horas reales por periodo del horizonte de planificación.
DÍAS POR PERIODO: nº de días que conforma cada periodo del horizonte de planificación.

Cambiar datos Guardar cambios

Agregar nueva fecha

Volver al Menú Principal Menú Anterior Ayuda

Ilustración 5.20. Pantalla “Planificación temporal” del programa informático.

A continuación pasamos a detallar los datos necesarios para cada una de las dos técnicas, que no son utilizados por la otra.

5.5.2. Datos para CRP

Con objeto de calcular el valor y momento de asignación de las cargas, además de los datos referidos en el apartado anterior, precisamos información sobre los tiempos de ejecución y preparación de los Centros de Trabajo para el cálculo de la carga, y de los componentes del tiempo de suministro, para la asignación de aquélla a los periodos. Por lo tanto, para realizar una planificación con CRP necesitamos conocer los tiempos de preparación (tp_{ik}), ejecución (te_i), confección de pedido ($Tconf_j$), desplazamiento de materiales (Tdm_j) y de lotes (Td_{ijk}), cola ($Tcola_{ijk}$), espera ($Tesp_{ijk}$) e inspección ($Tinsp_j$, ya que consideramos la inspección únicamente al final de la ruta).

5.5.2.1. Tiempo de preparación de los Centros de Trabajo²⁹

Será necesario destinar un tiempo a la preparación del Centro de Trabajo, cuando sea preciso ajustar las máquinas para realizar una operación diferente a la que se ha ejecutado justamente antes.

En este sentido, para determinar el tiempo de preparación medio en un Centro de Trabajo, se precisará tomar unas observaciones que nos sirvan de muestra para poder estimar un valor adecuado y coherente con los niveles de exactitud y precisión deseados. Así, siguiendo el mismo procedimiento utilizado en el cálculo de los factores eficiencia y utilización en los Apartados A2.2.2.1. y A2.2.2.2. del Anexo 2, tomaremos una muestra piloto de 20 observaciones, que nos permita averiguar el tamaño muestral necesario para cumplir con una exactitud del 5% y un nivel de confianza del 95%.

En la Tabla 5.5. se indican los tiempos de preparación que fueron necesarios para el cálculo del tiempo de ajuste medio para realizar la operación O5 en el Centro de Trabajo CT1, en horas productivas³⁰, así como el ritmo de actividad

²⁹ Para un análisis detallado de los tiempos de preparación, ver el Apartado 3.5.4.2.

³⁰ Este tiempo está medido en horas productivas ya que se analiza la tarea de ajuste del Centro de Trabajo sólo cuando se está trabajando.

observado, apreciándose que en alguna de las observaciones el valor de este tiempo fue cero, ya que no fue preciso ajustar los equipos debido a que la operación se ejecutó después de haberse realizado la misma operación a otro lote diferente.

En este ejemplo se calculará el tiempo de preparación medio considerando el valor que toma en todas las ocasiones, sea necesario o no el ajuste del Centro de Trabajo. No obstante, en el Apartado 3.5.4.2., se analizó el efecto que esta decisión puede tener sobre el tiempo de carga calculado.

Muestra	tp ₅₁ (h.p.)	Ritmo de Actividad (A)
1	0,199	80
2	0,218	90
3	0,19	80
4	0	0
5	0,192	85
6	0,196	80
7	0,2	80
8	0,205	80
9	0,2	80
10	0,205	80
11	0,192	80
12	0,2	90
13	0,19	80
14	0	0
15	0,205	80
16	0,2	80
17	0,218	80
18	0,2	80
19	0,195	80
20	0,21	85
Media	0,1808	73,5
Desviación	0,0623	25,345

Tabla 5.5. Muestra piloto con los tiempos de preparación y ritmos de actividad observados en el Centro de Trabajo CT1 para la ejecución de la operación O5.

Para ello, se utilizará el procedimiento seguido por el Estudio de Tiempos³¹ partiendo de la muestra piloto, lo que nos permitirá determinar la media y desviación típica muestrales, valores que, unidos a la exactitud y nivel de confianza deseados, nos permitirán determinar el tamaño de muestra más adecuado aplicando la siguiente expresión:

$$n = \left(\frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \times \sigma'}{A \times \bar{x}} \right)^2 \quad (5.20)$$

Donde:

α = nivel de confianza.

$Z_{1-(1-\alpha/2)}$ = valor de la cola izquierda de una distribución normal $N(0,1)$, para una probabilidad de $1-(1-\alpha/2)$.

A = acuracidad o exactitud deseada.

$\bar{x}$ = media de los tiempos obtenidos en la muestra piloto.

σ' = cuasi-desviación típica de la muestra piloto.

Aplicando los valores de media y desviación en la fórmula (5.20) obtenemos que, para alcanzar una exactitud del 5% y un nivel de confianza del 95% sería necesario disponer de 183 observaciones. Este alto tamaño de muestra se debe a la mayor dispersión de los valores, a causa de las ocasiones en las que el tiempo de preparación es cero. De acuerdo a este resultado, en la Tabla 5.6. se indican los valores de las muestras extras que hace falta conocer para estimar el tiempo de preparación en las condiciones fijadas.

³¹ Véase, por ejemplo, Alford, Bangs y Hagemann (1969), Domínguez y otros (1995) o Niebel (1996).

Muestra	tp ₅₁	A	Muestra	tp ₅₁	A	Muestra	tp ₅₁	A	Muestra	tp ₅₁	A
21	0,192	100	62	0,205	100	103	0,205	100	144	0,218	95
22	0,218	90	63	0,23	90	104	0,28	90	145	0	0
23	0,192	100	64	0,205	100	105	0	0	146	0,195	110
24	0,205	100	65	0,2	105	106	0,28	90	147	0,205	100
25	0,19	110	66	0,218	90	107	0	0	148	0	0
26	0,192	100	67	0,2	120	108	0,29	90	149	0,205	100
27	0,218	90	68	0,195	115	109	0	0	150	0	0
28	0,23	90	69	0,21	115	110	0	0	151	0,205	100
29	0,192	100	70	0,192	100	111	0,23	90	152	0,23	90
30	0,218	95	71	0,218	90	112	0,205	100	153	0	0
31	0,205	100	72	0,192	100	113	0,195	110	154	0,19	100
32	0,195	110	73	0,205	100	114	0,205	100	155	0	0
33	0,205	100	74	0,166	110	115	0	0	156	0,23	90
34	0,23	90	75	0,192	100	116	0,27	90	157	0	0
35	0,205	100	76	0,23	90	117	0	0	158	0,23	90
36	0,218	90	77	0,27	90	118	0,26	90	159	0	0
37	0,205	100	78	0,192	100	119	0,192	100	160	0,205	100
38	0,28	90	79	0,218	95	120	0	0	161	0,195	110
39	0,23	90	80	0,205	100	121	0,205	100	162	0	0
40	0,25	90	81	0	0	122	0,195	110	163	0,23	90
41	0,29	90	82	0,205	100	123	0,205	100	164	0	0
42	0,25	90	83	0	0	124	0	0	165	0	0
43	0,23	90	84	0,205	100	125	0,205	100	166	0,192	100
44	0	0	85	0,218	90	126	0,218	90	167	0,218	95
45	0,28	90	86	0,205	100	127	0,205	100	168	0,205	100
46	0,205	100	87	0	0	128	0,23	90	169	0,195	110
47	0,195	110	88	0	0	129	0	0	170	0,205	100
48	0,205	100	89	0,23	90	130	0,29	90	171	0	0
49	0,25	90	90	0,25	90	131	0	0	172	0,205	100
50	0,205	100	91	0,23	90	132	0	0	173	0	0
51	0	0	92	0,28	90	133	0,28	90	174	0,205	100
52	0,205	100	93	0,23	90	134	0	0	175	0,23	90
53	0,26	90	94	0	0	135	0	0	176	0	0
54	0	0	95	0,192	100	136	0,205	100	177	0	0
55	0,19	100	96	0	0	137	0,195	110	178	0,21	85
56	0	0	97	0,205	100	138	0,205	100	179	0,23	90
57	0,192	100	98	0,195	110	139	0	0	180	0	0
58	0,196	80	99	0,205	100	140	0	0	181	0	0
59	0,2	115	100	0	0	141	0	0	182	0,23	90
60	0,205	100	101	0,205	100	142	0	0	183	0,2	90
61	0,2	120	102	0,218	90	143	0,192	100			

Tabla 5.6. Muestra extra para el cálculo del tiempo de preparación.

Utilizaremos la fórmula desarrollada para el estudio de tiempos³², donde se incluyen, además de los tiempos observados en las muestras (to_i), el ritmo de actividad (A_i) y el ritmo normal de trabajo (A_N):

$$t = \frac{\sum_{i=1}^N (to_i \times A_i)}{A_N} \quad (5.21)$$

Para calcular el tiempo de preparación medio realizaremos un escrutinio aritmético teniendo en cuenta los tiempos observados (tpo_{5li}) y un nivel de actividad normal (A_N) de 100 (ya que se ha utilizado la escala 100 – 133 para la observación de los ritmos), por lo que aplicando la expresión (5.21), obtenemos:

$$tp_{51} = \frac{\sum_{i=1}^N (tpo_{5li} \times A_{li})}{A_N} = 0,153 \text{ h.e.}$$

Al tomar observaciones de los tiempos sólo en el momento en el que se está preparando el Centro de Trabajo, e incluir el efecto de los ritmos de actividad, estamos considerando la incidencia de los factores utilización y eficiencia, por lo que el resultado obtenido refleja horas estándar. Para calcular los tiempos en horas reales es preciso dividirlos por los factores eficiencia y utilización de los Centros de Trabajo. Según la Tabla 5.4. y dado que la operación O5 se realiza en el Centro CT1, deberíamos usar los factores de 0,8 y 0,95 para la eficiencia y utilización, respectivamente. Sin embargo, para ser más exactos, la eficiencia que debería ser utilizada tendría que ser calculada como el valor medio de los ritmos de actividad utilizados para averiguar el tiempo de preparación medio, cuyo valor es 0,803. El resultado del tiempo de preparación para ejecutar la operación O5 será, por tanto:

$$tp_{51} = \frac{tp_{51}}{E_1 \times U_1} = \frac{0,1525}{0,803 \times 0,95} = 0,2 \text{ h.e.}$$

Para la estimación del tiempo de preparación del resto de las operaciones será necesario hacer un análisis similar al realizado para la operación O5. Así, en la Tabla 5.7. se reflejan los valores obtenidos de estos estudios (ver Apartados A2.2.2.1, y A2.2.2.2 del Anexo 2), indicando el tiempo de preparación en horas reales y estándar por operación.

³² Véase, por ejemplo, Hopeman (1973, p. 602), Fraxanet (1990, p. 56) o Martínez (1984, p. 19).

Operación	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
Horas estándar	0,664	0,156	0,401	0,391	0,153	0,4	0,156
Horas reales	0,87	0,2	0,5	0,5	0,2	0,5	0,2

Tabla 5.7. Tiempo medio de preparación, en horas estándar y reales, de las O1, O2, O3, O4, O5, O6 y O7.

5.5.2.2. Información sobre las rutas y las operaciones que las componen: tiempos de ejecución

Para cada una de las siete operaciones que realiza la empresa del ejemplo es necesario conocer en qué Centro de Trabajo se ejecutan y cuál es el tiempo necesario para ejecutar dicha operación a una unidad del lote (te_i). La estimación de esta variable se puede realizar mediante varios métodos, habiéndose utilizado para este ejemplo el Estudio de Tiempos, como en las estimaciones de los tiempos de preparación.

Para cada una de las observaciones tomadas se reflejarán los valores de los tiempos y el ritmo de actividad. Para evitar ser repetitivos en los cálculos, reflejaremos en este ejemplo, el procedimiento seguido para la estimación del tiempo de ejecución de la operación O1, siendo necesario proceder de una manera similar para la determinación de los tiempos de ejecución del resto de operaciones.

De acuerdo al Estudio de Tiempos, es conveniente dividir la tarea u operación en los distintos elementos que la componen y realizar un análisis por separado de cada una de ellas. Así, la operación O6 se ha dividido en dos partes, separándose los tiempos de la tarea O6a y O6b, reflejándose en la Tabla 5.8. los valores observados de tiempo y nivel de actividad en una muestra piloto de 20 observaciones.

Con los valores de media y desviación extraídos de la Tabla 5.8., un nivel de confianza del 95% y una exactitud del 5%, el tamaño de muestra mínimo necesario es de 34 observaciones para la tarea O6a y 25 para la O6b. El valor del tiempo de ejecución y actividad del resto de observaciones se ha indicado en la Tabla 5.9.

El tiempo de ejecución medio de la operación O6 se calculará como la suma de los tiempos medios de las tareas que la componen. Así, aplicando la fórmula (5.21) para el cálculo de los tiempos de ejecución en horas estándar de las dos tareas, obtenemos los siguientes valores:

$$te_{6a} = \frac{\sum_{i=1}^N (to_{6ai} \times A_{6ai})}{A_N} = 0,00616 \text{ h.e.} \quad te_{6b} = \frac{\sum_{i=1}^N (to_{6bi} \times A_{6bi})}{A_N} = 0,00552 \text{ h.e.}$$

$$te_6 = 0,00616 + 0,00522 = 0,0118 \text{ h.e.}$$

Muestra	te _{6a}	A _{6a}	Te _{6b}	A _{6b}
1	0,0075	80	0,006	100
2	0,0059	110	0,0054	90
3	0,0075	80	0,006	80
4	0,0054	110	0,0051	95
5	0,0102	80	0,006	80
6	0,0075	80	0,0041	80
7	0,0071	100	0,006	80
8	0,0081	90	0,0039	95
9	0,0064	110	0,006	80
10	0,0075	80	0,0053	90
11	0,0075	80	0,0054	90
12	0,0070	100	0,0052	90
13	0,0075	80	0,0057	90
14	0,0075	80	0,0056	100
15	0,0070	90	0,0058	100
16	0,0064	100	0,006	80
17	0,0075	80	0,0053	120
18	0,0075	80	0,006	80
19	0,0097	80	0,0041	100
20	0,0070	100	0,006	80
Media	0,0074	89,5000	0,0054	90,0000
Desviación	0,0011	11,9097	0,0007	10,6376

Tabla 5.8. Muestra piloto para el cálculo de los tiempos de ejecución de las tareas en que se ha dividido la operación O6.

Si bien para el cálculo del tiempo de carga es necesario conocer el tiempo de ejecución en horas estándar, para determinar el momento en que ésta debe ser asignada se precisa conocer los tiempos en horas reales. Para la transformación de estas unidades de tiempo debemos utilizar los factores de eficiencia y utilización. Como ya se indicó en el análisis del tiempo de preparación, el factor de eficiencia que deberíamos utilizar, es el resultado de promediar los ritmos de actividad utilizados para el muestreo del tiempo de ejecución de la operación O6.

Así, el factor eficiencia resultante del estudio completo (Tablas 5.8. y 5.9.) es de 0,896, por lo que tomando el factor utilización de la Tabla 5.4. podemos calcular el tiempo de ejecución en horas reales de la siguiente manera³³:

$$te_6 = \frac{te_6}{E_3 \times U_3} = \frac{0,00118}{0,896 \times 0,9} = 0,015 \text{ h.e.}$$

Muestra	te _{6a}	A _{6a}	te _{6b}	A _{6b}
21	0,0075	90	0,015	80
22	0,0048	100	0,012	90
23	0,0075	80	0,006	100
24	0,0048	100	0,006	100
25	0,0075	80	0,01	90
26	0,0048	100		
27	0,0059	90		
28	0,0064	85		
29	0,0075	80		
30	0,0075	80		
31	0,0075	80		
32	0,0064	90		
33	0,0075	80		
34	0,0048	100		

Tabla 5.9. Muestra extra para el cálculo de los tiempos de ejecución de las tareas en que se ha dividido la operación O6.

Será necesario utilizar un procedimiento similar al aplicado en la operación O6 para el resto de tiempos de ejecución. El resultado de los estudios necesarios para estimar los distintos tiempos de ejecución se han agrupado en la Tabla 5.10.

Operación	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
Horas estándar	0,1596	0,1748	0,0022	0,01	0,019	0,0118	0,0228
Horas reales	0,21	0,23	0,003	0,013	0,025	0,015	0,03

Tabla 5.10. Tiempo medio de ejecución de todas las operaciones en horas reales y estándar.

³³ Resultado de aplicar la siguiente expresión: NHE = NHR x E x U, donde NHE es el número de horas estándar, E indica el factor eficiencia y U es el factor utilización (ver Apartado 2.4.3.).

5.5.2.3. Tiempo de confección de pedido

Este tiempo (ver Apartado 3.5.1.) suele considerarse independiente del tamaño del lote del ítem emitido. Por ello, su estimación se puede hacer a partir del promedio de los valores tomados en unas muestras. En primer lugar, es preciso determinar el número de observaciones necesarias para que el valor estimado del tiempo de confección sea representativo. Para ello se han tomado 20 valores de los tiempos de confección y se ha determinado la media y desviación típica muestrales, valores que unidos a la exactitud y nivel de confianza deseados, nos permitirán determinar el tamaño de muestra más adecuado.

Dado que se utilizará un procedimiento similar para la estimación de todos los tiempos de confección medios, desarrollaremos los cálculos necesarios para la determinación de un lote del ítem A. Para ello, en la Tabla 5.11. se muestran los valores observados en la muestra piloto utilizada.

Muestra	Tconf _A (h.r.)
1	2,01
2	2,02
3	1,98
4	1,5
5	2,03
6	2
7	2,01
8	2,5
9	1,95
10	1,5
11	1,99
12	2,5
13	2
14	2,01
15	2,03
16	1,97
17	1,55
18	2,02
19	2
20	2,5
Media	2,003
Desviación	0,2737

Tabla 5.11. Muestra piloto para el cálculo del tiempo de confección de pedido del ítem A.

Para el caso que nos sirve de ejemplo la empresa ha decidido utilizar un nivel de confianza del 95% y una exactitud del 5%, por lo que, aplicando la expresión (5.20), obtenemos que el tamaño de muestra necesario para cumplir con los objetivos planteados es de 29 observaciones, por lo que en la Tabla 5.12. se indican los valores de las observaciones que restan para alcanzar el tamaño de muestra idóneo.

Muestra	Tconf _A (h.r.)
21	1,8
22	1,89
23	2,21
24	2,01
25	2,02
26	1,95
27	1,67
28	1,88
29	2,5
Media total	2

Tabla 5.12. Muestra extra para el cálculo del tiempo de confección de pedido del ítem A.

De acuerdo al valor medio total calculado con las 29 observaciones, el tiempo medio de confección de pedido para el ítem A es de 2 horas reales. La estimación de los tiempos de confección del resto de los ítems, se realizaría mediante el mismo procedimiento, a través del valor medio del total de observaciones tomadas para cada uno de los tres ítems. El resultado de estos estudios se ha indicado en la Tabla 5.13.

Ítem	A	B	C
Tiempo de confección medio (h.r.)	2	2	2

Tabla 5.13. Tiempo medio de confección para los ítems A, B y C.

5.5.2.4. Tiempo de desplazamiento de materiales

El tiempo de desplazamiento de los materiales necesarios para la elaboración de un lote de un ítem, depende principalmente de las características de éste (ver Apartado 3.5.2.). Por este motivo, para el caso de nuestro ejemplo, será necesario determinar el tiempo de desplazamiento de materiales para los ítems A, B y C.

A continuación reflejaremos los pasos que se han seguido para la estimación del tiempo medio de desplazamiento de los lotes del ítem B, para lo que se ha comenzado con la observación de una muestra piloto con 20 observaciones (Tabla 5.14.).

Muestra	Tdm _B (h.r.)
1	0,252
2	0,250
3	0,252
4	0,289
5	0,216
6	0,260
7	0,264
8	0,210
9	0,235
10	0,291
11	0,228
12	0,270
13	0,284
14	0,239
15	0,215
16	0,245
17	0,252
18	0,287
19	0,238
20	0,311
Media	0,254
Desviación	0,035

Tabla 5.14. Muestra piloto para el cálculo del tiempo de desplazamiento de materiales para un lote del ítem B.

Así, para unos valores de 95% de nivel de confianza y 5% de exactitud, aplicando la expresión (5.20) se determina que serán necesarias 30 observaciones para cumplir tales objetivos. Por este motivo, en la Tabla 5.15. se ha indicado el tiempo que se tardó en el desplazamiento de los materiales para la elaboración del ítem B, en el resto de observaciones necesarias para disponer del tamaño muestral objetivo.

Muestra	Tdm _B (h.r.)
21	0,153
22	0,239
23	0,287
24	0,239
25	0,254
26	0,215
27	0,189
28	0,289
29	0,261
30	0,249
Media total	0,25

Tabla 5.15. Muestra extra para el cálculo del tiempo de desplazamiento de materiales para un lote del ítem B.

Como se puede observar en la Tabla 5.15., el tiempo medio de desplazamiento de materiales para un pedido de B es de 0,25 h.r. Asimismo, en la Tabla 5.16., se indica el valor que toma este tiempo para el resto de los ítems que elabora la empresa.

Ítem	A	B	C
Tiempo de desplazamiento de materiales (h.r.)	1,7	0,25	0,25

Tabla 5.16. Tiempo medio de desplazamiento de materiales para los ítems A, B y C.

5.5.2.5. Tiempo de desplazamiento de los lotes

Los lotes deben ser trasladados de un Centro de Trabajo a otro dentro de su ruta de fabricación. Así, el tiempo de desplazamiento de un lote del ítem j desde el Centro de Trabajo k , donde se le ejecuta la operación i , al siguiente Centro en su ruta o al almacén, si el lote está finalizado, se denotará como Td_{ijk} ³⁴. Para su cálculo, la empresa puede estimar el valor medio que ha tomado este tiempo de acuerdo a la operación tras la que se produce el traslado. Por ejemplo, el tiempo de desplazamiento de un lote del ítem A desde el Centro de Trabajo CT1, donde se le

³⁴ Para un estudio detallado de este elemento, ver Apartado 3.5.2.

ha realizado la operación O1, al Centro CT2, para que se le ejecute la operación O2 (Td_{IA1}), se podría calcular a partir de una muestra, cuyo tamaño será preciso determinar a partir de los datos de una muestra piloto (Tabla 5.17.).

Muestra	Td_{IA1} (h.r.)
1	0,162
2	0,194
3	0,202
4	0,172
5	0,232
6	0,246
7	0,185
8	0,168
9	0,245
10	0,203
11	0,242
12	0,219
13	0,171
14	0,201
15	0,204
16	0,193
17	0,183
18	0,204
19	0,214
20	0,192
Media	0,2016
Desviación	0,0250

Tabla 5.17. Muestra piloto para el cálculo del tiempo de desplazamiento del lote tras la realización de la operación O1 en el Centro de Trabajo CT1.

Los valores de media y desviación de la muestra piloto, junto con la decisión de alcanzar un nivel de confianza mínimo del 95% y una precisión del 5%, nos lleva a la necesidad de disponer de 24 observaciones [aplicando la expresión (5.20)], para poder calcular el valor medio del tiempo de desplazamiento. Por este motivo, en la Tabla 5.18., se indican los valores de este tiempo para las muestras extras necesarias.

Muestra	Td _{IAI} (h.r.)
21	0,186
22	0,189
23	0,193
24	0,2
Media total	0,2

Tabla 5.18. Muestra extra para el cálculo del tiempo de desplazamiento del lote tras la realización de la operación O1 en el Centro de Trabajo CT1.

El resultado obtenido para el desplazamiento desde la operación O1 a la O2 (siguiente de su ruta), así como el que se alcanza al aplicar el mismo procedimiento al resto de operaciones que realiza la empresa se refleja en la Tabla 5.19.

Operación	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
Tiempo de desplazamiento (h.r.)	0,2	0,2	0,25	0,3	0,25	0,3	0,25

Tabla 5.19. Tiempo medio de desplazamiento de los lotes tras la ejecución de las operaciones.

5.5.2.6. Tiempo de cola

Se ha llamado tiempo de cola al tiempo de espera en un Centro de Trabajo, hasta el momento de comienzo de la preparación del mismo o, en el caso de que ésta no fuera necesaria, de ejecución de la operación. El valor medio de este tiempo en cada uno de los Centros puede ser calculado mediante la Teoría de Colas. El análisis de los parámetros fundamentales de una cola de espera, así como su procedimiento de cálculo, se analizaron en el Apartado 3.4. Para este ejemplo, la empresa considerará que las tasas o pauta de llegada (λ) de los lotes se distribuye como una Poisson, y que las tasas de salida (μ) o ritmo al que se terminan de procesar los lotes en cada Centro de Trabajo, sigue una distribución exponencial negativa (este tipo de colas de espera se denota como M/M/1)³⁵. Considerando además, que el criterio de entrada para el procesamiento de los lotes en el Centro es el orden de llegada y que sólo hay una máquina dedicada a hacer cada operación, el tiempo de cola medio se calculará como:

³⁵ “En una gran cantidad de casos de la teoría de colas, las llegadas de clientes a recibir un determinado servicio estarán regidas por una distribución de Poisson, mientras que sus tiempos de servicio por una distribución exponencial o normal” (Prawda, 1988, p. 814).

$$\overline{Tcola_k} = \frac{\overline{\lambda_k}}{\overline{\mu_k}(\overline{\mu_k} - \overline{\lambda_k})} \quad (5.22)$$

Donde:

$\overline{\lambda_k}$ = suma de las tasas de llegada de todas las operaciones que se ejecutan en el Centro de Trabajo (λ_{ik}).

$\overline{\mu_k}$ = suma de las tasas de salida de todas las operaciones que se realizan en el Centro de Trabajo (μ_{ik}).

Es necesario, por tanto, estimar los ritmos de llegada y salida de las operaciones que se ejecutan en cada uno de los Centros de Trabajo, los cuales dependen de los lotes en proceso y planificados, así como de la capacidad de trabajo de los distintos Centros. Para realizar la estimación será preciso utilizar muestras que nos permitan calcular los valores medios.

En este sentido, desarrollaremos el proceso de cálculo del tiempo de cola del Centro de Trabajo CT1, en el que se realizan las operaciones O1 y O5 (como se aprecia en la Figura 5.2.), para lo cual es necesario, en primer lugar, estimar las tasas medias de llegada y salida de tales operaciones. Para ello seguiremos el mismo procedimiento que el utilizado para la estimación del factor de eficiencia, del factor de utilización y del tiempo de preparación, utilizando una muestra piloto que nos permita averiguar el tamaño de la muestra total necesario para cumplir con una exactitud del 5% y un nivel de confianza del 95%.

De esta manera, en la Tabla 5.20. se aprecian los valores de las muestras piloto de las tasas de llegada y salida de las operaciones O1 (λ_{11} y μ_{11} respectivamente) y O5 (λ_{51} y μ_{51} respectivamente), indicadas en lotes por hora real.

Según los valores medios y desviación que se aprecian en la Tabla 5.20., aplicando la expresión (5.22), los tamaños de muestra necesarios para alcanzar los niveles de exactitud y confianza fijados por la empresa, serían de 37 observaciones para las tasas de llegada y 32 para las de salida. Dado este resultado, será preciso analizar las tasas de llegadas en 16 ocasiones más y las de salida en 12 nuevos casos, los cuales se reflejan en la Tabla 5.21.

Muestra	Tasas de llegada (lotes/h.r.)		Tasas de salida (lotes/h.r.)	
	λ_{11}	λ_{51}	μ_{11}	μ_{51}
1	0,0127	0,0191	0,0282	0,0423
2	0,0086	0,0130	0,0192	0,0287
3	0,0110	0,0165	0,0244	0,0366
4	0,0079	0,0118	0,0202	0,0302
5	0,0149	0,0224	0,0331	0,0496
6	0,0110	0,0165	0,0244	0,0366
7	0,0104	0,0156	0,0230	0,0345
8	0,0118	0,0177	0,0261	0,0392
9	0,0094	0,0141	0,0209	0,0314
10	0,0110	0,0165	0,0244	0,0366
11	0,0110	0,0165	0,0244	0,0366
12	0,0102	0,0153	0,0226	0,0340
13	0,0110	0,0165	0,0244	0,0366
14	0,0110	0,0165	0,0244	0,0366
15	0,0102	0,0153	0,0226	0,0340
16	0,0094	0,0141	0,0209	0,0314
17	0,0102	0,0153	0,0226	0,0340
18	0,0102	0,0153	0,0226	0,0340
19	0,0141	0,0212	0,0314	0,0470
20	0,0102	0,0153	0,0226	0,0340
Media	0,0108	0,0162	0,0241	0,0362
Desviación	0,0017	0,0025	0,0035	0,0052

Tabla 5.20. Muestra piloto para el cálculo de las tasas de llegada y salida del sistema de cola que se genera a la entrada del CT1.

De acuerdo con el resultado obtenido, podemos decir que la tasa media de llegada al Centro de Trabajo 1 ($\bar{\lambda}_1$) es de 0,252 lotes por hora (suma de las tasas de llegada medias de las operaciones O1 y O5), y la tasa media de salida de este Centro es de 0,0555 lotes por hora (resultado de sumar 0,0222 que es la tasa de salida media de la operación O1 y 0,0333 que es la de la operación O5). Una vez que se dispone de estos datos, aplicando la expresión (5.22) podemos determinar el tiempo de cola medio en el Centro CT1:

$$\overline{Tcola_1} = \frac{\overline{\lambda_1}}{\overline{\mu_1}(\overline{\mu_1} - \overline{\lambda_1})} = \frac{0,0252}{0,0555(0,0555 - 0,0252)} = 15 \text{ h.r.}$$

Muestra	Tasas de llegada (lotes/h.r.)		Tasas de salida (lotes/h.r.)	
	λ_{11}	λ_{51}	μ_{11}	μ_{51}
21	0,0110	0,0165	0,0244	0,0366
22	0,0071	0,0106	0,0157	0,0235
23	0,0063	0,0094	0,0139	0,0209
24	0,0071	0,0106	0,0157	0,0235
25	0,0094	0,0141	0,0209	0,0314
26	0,0071	0,0106	0,0157	0,0235
27	0,0086	0,0130	0,0192	0,0287
28	0,0094	0,0141	0,0209	0,0314
29	0,0071	0,0106	0,0157	0,0235
30	0,0110	0,0165	0,0244	0,0366
31	0,0086	0,0130	0,0192	0,0287
32	0,0094	0,0141	0,0222	0,0333
33	0,0094	0,0141		
34	0,0071	0,0106		
35	0,0132	0,0198		
36	0,0149	0,0224		
37	0,0100	0,0150		
Media total	0,0101	0,0151	0,0222	0,0333

Tabla 5.21. Muestra extra para el cálculo de las tasas de llegada y salida del sistema de cola que se genera a la entrada del CT1.

Para el cálculo de los tiempos de cola que se generan en los Centros de Trabajo 2 y 3, será necesario utilizar el mismo procedimiento, estimando las tasas de llegada y salida de las operaciones O2, O4 y O7, para el Centro CT2, y O3 y O6 para el Centro CT3. Los tiempos de cola calculados para estos Centros, así como para el Centro de Trabajo CT1 se han agrupado en la Tabla 5.22.

Centro de Trabajo	CT1	CT2	CT3
Tiempo de cola (h.r.)	15	10	10

Tabla 5.22. Tiempo medio de cola de los Centros de Trabajo.

5.5.2.7. Tiempo de espera

A la salida del Centro de Trabajo también se puede generar una cola de espera, ya que los lotes que acaban de ser procesados deben ser desplazados hacia el siguiente Centro de Trabajo o, si el lote está finalizado, hacia el almacén. El tiempo de espera a la salida del Centro de Trabajo (ver Apartado 3.5.5.), depende del ritmo al que se finalicen los lotes, indicador de la tasa de llegada al sistema de cola, y la pauta de desplazamiento de los mismos, que refleja la tasa de salida.

El valor medio del tiempo de espera se calculará con un procedimiento similar al utilizado en el tiempo de cola, usando las fórmulas de la Teoría de Colas. Como en el caso anterior, asumiremos que la cola que se genera a la salida de los Centros de Trabajo es del tipo M/M/1³⁶, en el que consideraremos que la tasa de llegada al sistema de cola para el desplazamiento es la misma que la tasa de salida del Centro de Trabajo³⁷.

Así, para el cálculo del tiempo de espera en el Centro de Trabajo CT1, tomaremos, como tasa media de llegada al sistema, la tasa de salida de la cola de espera en la entrada al Centro, es decir $\bar{\lambda}_1 = 0,0555$ lotes/hora (calculado en el Apartado 5.5.2.6.). De esta manera sólo será necesario estimar la tasa de salida del sistema, para lo que se ha tomado una muestra de 20 datos (Tabla 5.23.) que nos permitirán averiguar el valor de tamaño muestral que permite alcanzar un nivel de confianza del 95% y una precisión del 5%.

Utilizando los datos de media y desviación típica de la Tabla 5.23. en la expresión (5.20), obtenemos que los tamaños de muestra necesarios para alcanzar la exactitud y nivel de confianza deseados son 32 observaciones para la operación O1 y 27 para la operación O5. Las muestras extra que se precisan para alcanzar tales valores se reflejan en la Tabla 5.24.

La tasa media de salida del sistema de cola generado en el CT1 ($\bar{\mu}_1$), en el momento de espera para el desplazamiento, se calcula como la suma de las tasas de salida de las operaciones O1 y O5, por lo que el resultado será de 0,499 lotes/hora (0,2041 más 0,2958). Teniendo en cuenta que la tasa media de llegada a esta cola

³⁶ Tasas de llegada distribuidas como una Poisson, tasas de salida con una exponencial negativa, población infinita, criterio de entrada primero en llegar primero en atender y longitud de la cola ilimitada.

³⁷ Esto se cumple por la propiedad de equivalencia, según la cual “si los clientes al salir de una instalación, tienen que entrar en otra, la primera tendrá un proceso de salida Poisson, y por lo tanto, el proceso de entrada de la segunda instalación será también un proceso de Poisson, igual que el de la primera, con igual media λ ” (De la Fuente y Pino, 2001, p. 89).

de espera ($\bar{\lambda}_1$) es de 0,0555 lotes/hora, valor de la tasa de salida de la cola generada a la entrada del Centro de Trabajo, el tiempo de espera medio en el CT1 se calculará, aplicando la expresión (5.22) como:

$$\overline{Tesp_1} = \frac{\bar{\lambda}_1}{\mu_1(\mu_1 - \bar{\lambda}_1)} = \frac{0,0555}{0,4999(0,4999 - 0,0555)} = 0,25 \text{ h.r.}$$

Muestra	Tasas de salida (lotes/h.r.)	
	μ_{11}	μ_{51}
1	0,2547	0,3820
2	0,1729	0,2594
3	0,2201	0,3301
4	0,1572	0,2358
5	0,2800	0,2800
6	0,2201	0,3301
7	0,2075	0,3113
8	0,2358	0,3537
9	0,1886	0,2830
10	0,2201	0,3301
11	0,2201	0,3301
12	0,2044	0,3065
13	0,2201	0,3301
14	0,2201	0,3301
15	0,2044	0,3065
16	0,1886	0,2830
17	0,2044	0,3065
18	0,2044	0,3065
19	0,2830	0,4244
20	0,2044	0,3065
Media	0,2155	0,3163
Desviación	0,0309	0,0412

Tabla 5.23. Muestra piloto de las tasas de salida del sistema de cola que se genera a la salida del CT1.

Muestra	Tasas de salida (lotes/h.r.)	
	μ_{11}	μ_{51}
21	0,2201	0,3301
22	0,1415	0,2122
23	0,3033	0,1517
24	0,1415	0,2122
25	0,1886	0,2830
26	0,1415	0,2122
27	0,1729	0,2594
28	0,1886	
29	0,1415	
30	0,2201	
31	0,1729	
32	0,1886	
Media total	0,2041	0,2958

Tabla 5.24. Muestra extra para el cálculo de las tasas de salida del sistema de cola que se genera a la salida del CT1.

La espera media en el resto de los Centros de Trabajo se puede calcular de manera similar, considerando las tasas de salida utilizadas en el cálculo de los tiempos de cola como tasas de llegada del nuevo sistema. Desarrollando este procedimiento, se obtienen los tiempos de espera medios que se han reflejado en la Tabla 5.25., donde también se ofrece el resultado para el Centro de Trabajo CT1 calculado anteriormente.

Centro de Trabajo	CT1	CT2	CT3
Tiempo de espera (h.r.)	0,25	0,25	0,2

Tabla 5.25. Tiempo medio de espera a la salida de los Centros de Trabajo.

5.5.2.8. Tiempo de inspección de los lotes³⁸

En este ejemplo, con objeto de simplificar los cálculos, se ha considerado que la empresa sólo realiza la inspección al final de la ruta de fabricación de cada

³⁸ Para un análisis más detallado de este elemento, ver Apartado 3.5.6.

ítem, por lo que será necesario determinar el tiempo medio que dedica a cada lote de los tres ítems que fabrica. No obstante, en el caso de que se realizaran inspecciones a lo largo del proceso productivo, sería necesario determinar el tiempo que se dedica a la inspección en cada una de esas fases.

Realizaremos los cálculos para el tiempo de inspección del ítem C, debiéndose seguir el mismo procedimiento para el resto de los ítems de la empresa. Utilizaremos el mismo procedimiento que para el cálculo de otros tiempos dependientes del ítem (como el tiempo de confección o el de desplazamiento de materiales), utilizando una muestra piloto de 20 observaciones (Tabla 5.26.), para determinar el tamaño muestral necesario para alcanzar un 95% de nivel confianza y un 5% de precisión.

Muestra	T _{inspC} (h.r.)
1	0,505
2	0,500
3	0,505
4	0,577
5	0,433
6	0,520
7	0,527
8	0,420
9	0,470
10	0,582
11	0,455
12	0,540
13	0,567
14	0,478
15	0,430
16	0,490
17	0,505
18	0,575
19	0,475
20	0,622
Media	0,5088
Desviación	0,0700

Tabla 5.26. Muestra piloto para el cálculo de los tiempos de inspección de un lote del ítem C.

Aplicando la expresión (5.20), obtenemos que el tamaño de muestra que precisamos es de 30 observaciones, reflejándose en la Tabla 5.27., el resto de datos que necesitamos.

Muestra	T _{inspC} (h.r.)
21	0,306
22	0,478
23	0,575
24	0,478
25	0,507
26	0,430
27	0,378
28	0,577
29	0,522
30	0,498
Media total	0,5

Tabla 5.27. Muestra extra para el cálculo de los tiempos de inspección de un lote del ítem C.

El valor medio del tiempo de inspección para el ítem C, indicado en la Tabla 5.27., así como el resultado de este tiempo para los ítems A y B, se han reflejado en la Tabla 5.28.

Ítem	A	B	C
Tiempo de inspección (h.r.)	0,25	0,5	0,5

Tabla 5.28. Tiempo medio de inspección para los ítems A, B y C.

5.5.2.9. A modo de resumen

Teniendo en cuenta que, tal y como hemos podido observar, todos los tiempos incluidos en el Apartado 5.5.2., son variables aleatorias, la empresa necesita recurrir a la estimación de cada una de ellas utilizando, para ello, alguna de las técnicas de Medición del Trabajo o la aplicación de la Teoría de Colas (analizadas en el Capítulo 3 y aplicadas en los apartados anteriores). Para que los tiempos estimados sean realistas y no se queden desfasados (debido a los múltiples cambios que se podrían dar en las características del proceso productivo desarrollado y su entorno), estos estudios deberían hacerse con asiduidad, lo que

supone un alto coste para la empresa. Los procedimientos necesarios con CRP para la estimación de las variables tienen, además del inconveniente anterior, otra serie de limitaciones entre las que podemos resaltar:

- La necesidad de personal especializado para estimar las variables aleatorias.
- El tiempo necesario para elaborar los datos y tomar las observaciones de las muestras.
- El efecto sobre la actitud de los trabajadores del análisis de su trabajo, pudiendo variar su desempeño ante la mirada de un analista (incluso pueden considerarse vigilados por la empresa, lo que repercute sobre su índice de satisfacción)³⁹.
- La necesidad de tomar muestras y utilizarlas para realizar los estudios que nos lleven a los valores medios de las variables necesarias, lo cual afecta a la exactitud de las estimaciones de los tiempos.
- Los errores humanos propios de la toma de datos, tanto de los tiempos anotados como de los ritmos de trabajo considerados por los analistas (afectados, en cierto margen, por la subjetividad)⁴⁰.

Una vez visto esto, si comparamos las necesidades de datos y de los estudios necesarios para obtenerlos que requiere CRP, con las que requiere el modelo propuesto, que se detallarán en el siguiente apartado, podremos comprobar que en este segundo caso son mucho menores y requieren el empleo de menor tiempo y recursos, lo que, al menos en teoría, debe paliar notablemente los inconvenientes de CRP que acabamos de señalar.

Por último, para una mayor comodidad del lector en el desarrollo de los cálculos de CRP que se describen más adelante, en las Tablas 5.29. y 5.30. se exponen los resultados obtenidos en los estudios necesarios para la estimación de cada uno de los tiempos que se precisan.

³⁹ Véase, por ejemplo, Adam y Ebert (1991, p. 350) o Niebel (1996, pp. 730-732).

⁴⁰ “En general se espera que el analista de tiempos sea capaz de establecer regularmente sus estándares dentro de más o menos el 5 por 100 de la calificación verdadera, cuando estudia operarios que actúan dentro de un intervalo de 0,70 a 1,30 de lo normal [...] y cuando la actuación está fuera de este intervalo...] se puede esperar del analista experimentado un error mucho mayor” (Niebel, 1996, p. 427).

Operación	te_i (h.r.)	tp_{ik} (h.r.)	Td_{ijk} (h.r.)	$Tcola_{ijk}$ (h.r.)	$Tesp_{ijk}$ (h.r.)
O1	0,21	0,87	0,2	15	0,25
O2	0,23	0,2	0,2	10	0,25
O3	0,003	0,5	0,25	10	0,2
O4	0,013	0,5	0,3	10	0,25
O5	0,025	0,2	0,25	15	0,25
O6	0,015	0,5	0,3	10	0,2
O7	0,03	0,2	0,25	10	0,25

Tabla 5.29. Tiempos de ejecución (te_i), preparación (tp_{ik}), desplazamiento (Td_{ijk}), cola ($Tcola_{ijk}$) y espera ($Tesp_{ijk}$).

Ítem	$Tconf_j$ (h.r.)	Tdm_j (h.r.)	$Tinsp_j$ (h.r.)
A	2	1,7	0,25
B	2	0,25	0,5
C	2	0,25	0,5

Tabla 5.30. Tiempos de confección de pedido ($Tconf_j$), desplazamiento de materiales (Tdm_j) e inspección ($Tinsp_j$) de los ítems.

5.5.3. Datos para el modelo alternativo propuesto

Una vez proporcionada toda la información necesaria para realizar la planificación mediante CRP, damos paso a los datos que precisamos en el modelo alternativo propuesto, los cuales sustituirán a los detallados en los Apartados 5.5.2.1. a 5.5.2.8. Como se puede observar en la Tabla 5.31., tan sólo se precisan los tiempos de carga de lote (Tc_{Qijk}) y el momento de entrada en el Centro de Trabajo para el comienzo del procesamiento de cada operación (Ten_{Qijk}), incluida la preparación del Centro si fuera necesaria, distinguiendo entre los distintos tamaños de lote incluidos en el Plan de Materiales (Tabla 5.2.). Esa última variable refleja el tiempo transcurrido desde la emisión del lote hasta la entrada para el procesamiento de la operación en el Centro de Trabajo donde se realizará.

En esta última tabla se han reflejado, además de las operaciones que componen las distintas rutas de fabricación (Figura 5.2.), los tiempos de entrada de las operaciones OF_A , OF_B y OF_C , las cuales representan el final de la ruta de fabricación de los ítems. Esto se debe a que se ha codificado la finalización de un pedido como OF_j , considerando que se inicia esta “operación” con la colocación del lote en almacén o en el lugar donde será utilizado para la elaboración de otro

más complejo. Es decir, los momentos de entrada de estas “operaciones” (Ten_{QFA} , Ten_{QFB} y Ten_{QFC}) coinciden con los de finalización del proceso productivo (Tf_{QA} , Tf_{QB} y T_{QC}), a los que nos referimos en el Apartado 5.2. Lógicamente, estas “operaciones” no originan carga, ya que sólo indican que un lote de un ítem ha sido completado y tienen como finalidad la determinación del tiempo de suministro.

Operación	Tamaño	Tc_{Qijk} (h.r.)	Ten_{Qijk} (h.r.)
O1	100	21,87	18,7
O2	100	17,974	51,02
O3	100	0,711	79,44
OF _A	100		80,85
O4	2.000	25,72	12,25
O5	2.000	43,365	53,52
OF _B	2.000		97,885
O6	400	5,96	12,25
	500	7,325	12,25
O7	400	10,246	28,71
	500	12,758	30,075
OF _C	400		39,95
	500		43,88

Tabla 5.31. Tiempo de carga del lote (Tc_{Qijk}) y momento de entrada de cada operación (Ten_{Qijk}) en función del tamaño de lote emitido.

Los valores medios de los tiempos de carga (Tc_{Qijk}) y de comienzo de procesamiento de una operación (Ten_{Qijk}), que utiliza el modelo propuesto para el desarrollo del Plan de Carga, son calculados automáticamente por el programa informático siguiendo la mecánica descrita en el Apartado 5.2.1., a partir de la información referente al procesamiento de cada lote realizado en el pasado, que se ha ido registrando por los operarios en el mismo Centro de Trabajo y que queda guardada en el histórico de la base de datos del sistema. Los datos almacenados incluyen los momentos de comienzo (incluida la preparación del Centro de Trabajo) y finalización de cada operación, los cuales son introducidos por los operarios de planta a medida que se van procesando los lotes. Para ello la aplicación informática dispone de un interfaz con los Centros de Trabajo donde se les requiere la siguiente información:

- Fecha y hora de comienzo del procesamiento de la preparación de la operación en el Centro (Ilustración 5.21.), o de su ejecución (caso de que no sea necesaria la preparación): identificativas del momento de entrada (Ten_{Qijk}).

- Fecha y hora de finalización de la operación (Ilustración 5.22.): que reflejan el momento en el que se termina de ejecutar una operación a un lote completo (Tfo_{Qijk}). Con este valor y el anterior se calculará el tiempo de carga de un lote, tal y como se indicó en la expresión (5.2):

$$Tc_{Qijk} = Tfo_{Qijk} - Ten_{Qijk}$$

Ilustración 5.21. Pantalla para datos de la entrada de un lote en un Centro de Trabajo⁴¹.

Ilustración 5.22. Pantalla para datos de la finalización de la ejecución de una operación a un lote.

⁴¹ Las unidades a la entrada y a la salida del Centro de Trabajo, requeridas en las pantallas del programa informático y reflejadas en las Ilustraciones 5.21. y 5.22., serán utilizadas para el análisis del factor aprovechamiento de cada operación. Dicho estudio supone un valor añadido más ofrecido por la técnica propuesta de Planificación de Capacidad a corto plazo, en comparación con CRP.

La facilidad de obtención de la información necesaria para el desarrollo de la Planificación de Capacidad con la mecánica de cálculo del modelo propuesto, así como la simplificación que se alcanza en el número de datos, en comparación con los que precisa CRP, se puede observar a través de la Figura 5.3. En ella se aprecia que donde existe una mayor diferencia entre ambas técnicas es en las variables necesarias para la asignación de la carga; ya que mientras que el modelo alternativo requiere tan sólo el tiempo de entrada y el de carga, CRP precisa conocer los tiempos de confección, desplazamiento de materiales y de lote, espera, cola y carga, para cuyas estimaciones necesita de un gran número de variables aleatorias y emplear una gran cantidad de recursos y de tiempo.

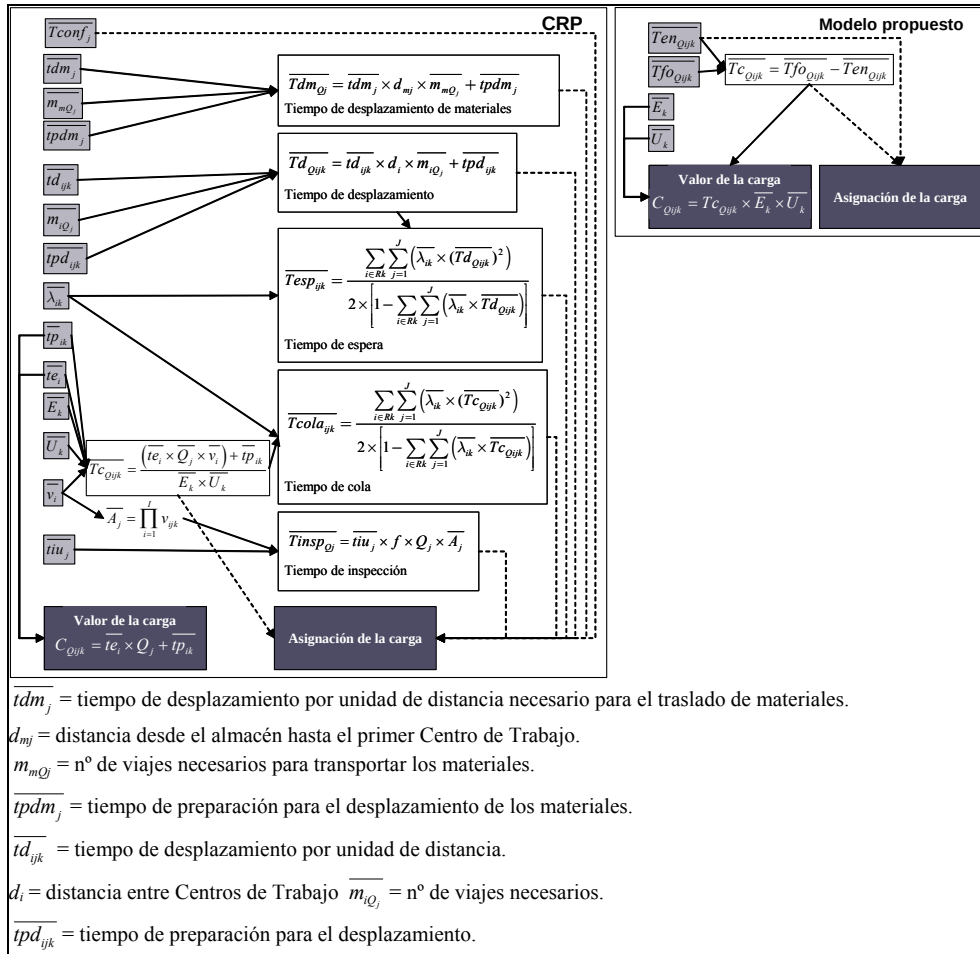


Figura 5.3. Comparativa de la obtención de datos necesarios para CRP y el modelo propuesto.

Por otro lado, con respecto al procedimiento de obtención de los datos, podemos decir que CRP necesita un control continuado para observar las variaciones que se producen en los valores, momento en el cual se debe proceder a volver a estimar la gran cantidad de datos necesarios. Sin embargo, la técnica planteada en este trabajo, a través del software elaborado, no requiere la introducción de nuevos valores tras haberlos calculado, sino que recalcula automáticamente los valores medios de los dos únicos tipos de variables que precisa (tiempo de entrada y carga), por lo que mantiene actualizada la información que utiliza, incluyendo además, como vimos en el Apartado 5.4.2.2., herramientas que ponen de manifiesto la existencia de desviaciones anómalas en los datos y planes que elabora.

Dado que pretendemos comparar las dos técnicas, hemos de poner de manifiesto que los valores del tiempo de carga de un lote en una operación i para el modelo propuesto, incluidos en la Tabla 5.31., coincidirán con el resultado de calcular este tiempo para CRP a través de los datos de la Tabla 5.29. si el tamaño real del lote que se procesa dicha operación i , es el mismo que el de emisión, lo cual supondría que no se habrían originado unidades defectuosas.

Así, por ejemplo, el tiempo de carga para la operación O1 de un lote de 100 unidades de A, según los datos de CRP (Tabla 5.29.), sería⁴²:

$$Tc_{Qijk} = tp_{ik} + (te_i \times Q_j)$$

$$Tc_{100'1A1} = tp_{11} + (te_1 \times Q_A) = 0,87 + (0,21 \times 100) = 21,87 \text{ h.r.}$$

Como se puede observar, este valor coincide con el indicado en la Tabla 5.31. por lo que podemos deducir que desde la emisión del lote hasta su entrada en el Centro de Trabajo para realizarle la operación O1, no se produjeron unidades defectuosas. Obviamente, esto debe ser lo habitual, puesto que ésta es la primera operación de la ruta de este ítem, por lo que el número de unidades que comienza a procesarse en la misma, coincide con el tamaño de lote a emitir planificado.

No tiene que ocurrir lo mismo sin embargo, para la segunda y siguientes operaciones de la ruta. Por ejemplo, en la operación O2, el valor de la capacidad necesaria para procesar un lote de 100 unidades de A, según el modelo propuesto es de 17,974 h.r. (Tabla 5.31.), mientras que, aplicando los datos utilizados para CRP (Tabla 5.29.) el resultado sería:

$$Tc_{100'2A2} = tp_{22} + (te_2 \times Q_A) = 0,2 + (0,23 \times 100) = 23,2 \text{ h.r.}$$

⁴² Véase, por ejemplo, Fogarty (1991, p. 438), Scout (1994, p. 151) o Markland (1995, p. 534).

La diferencia entre esos valores se debe a que la técnica presentada en este trabajo tiene en consideración la reducción del tamaño de lote que se produce a causa del factor aprovechamiento acumulado⁴³, que se origina desde el comienzo del proceso productivo hasta la finalización de la operación objeto de estudio. El efecto de las dos diferentes formas de cálculo sobre el Plan de Carga desarrollado por cada una de las dos técnicas puede ser importante, tal y como se analizará para un ejemplo concreto en el Apartado 5.5.6.3.

Los tiempos de carga del lote (Tc_{Qijk}) y momentos de entrada para el comienzo del procesamiento del lote (incluyendo la preparación del Centro de Trabajo, caso de ser necesaria), en cada operación (Ten_{Qijk}), son calculados por nuestro modelo a partir de la media de los valores que se produjeron en las ocasiones en las que se emitió un lote del mismo tamaño. Ello supone que:

- Ya se ha tenido en cuenta las unidades defectuosas que se desecharon en el proceso.
- No es necesario calcular, por separado, los tiempos de ejecución y preparación.
- Tomamos toda la población para hacer la estimación y no sólo una muestra, por lo que el error muestral desaparece.
- No es necesario realizar análisis de tiempo complejos, por lo que no son necesarios trabajadores especializados.
- Los valores estimados están actualizados constantemente, incluyendo en la base de datos cada una de las operaciones que se realizan.
- Los trabajadores no se sienten intimidados ante los analistas de tiempos, dado que no es necesaria una estimación directa. Ello repercute en la moral de los operarios y en la veracidad de los datos al no ser alterados por la presencia de un estimador.

Con objeto de representar gráficamente el orden en el que se desarrolla el proceso productivo de los ítems A, B y C, así como las variables que inciden en el tiempo de suministro, se ha elaborado la Figura 5.4., la cual está basada en las rutas de fabricación indicadas en la Figura 5.2. Dado el menor número de variables que

⁴³ Este factor de aprovechamiento acumulado engloba los relacionados con todas las operaciones anteriores en su ruta y las disminuciones de unidades que se produzcan en los desplazamientos del lote.

necesita la mecánica de cálculo del modelo propuesto para el desarrollo de la planificación de la carga, puede observarse que la representación de los componentes del tiempo de suministro es mucho más simple que la reflejada para CRP.

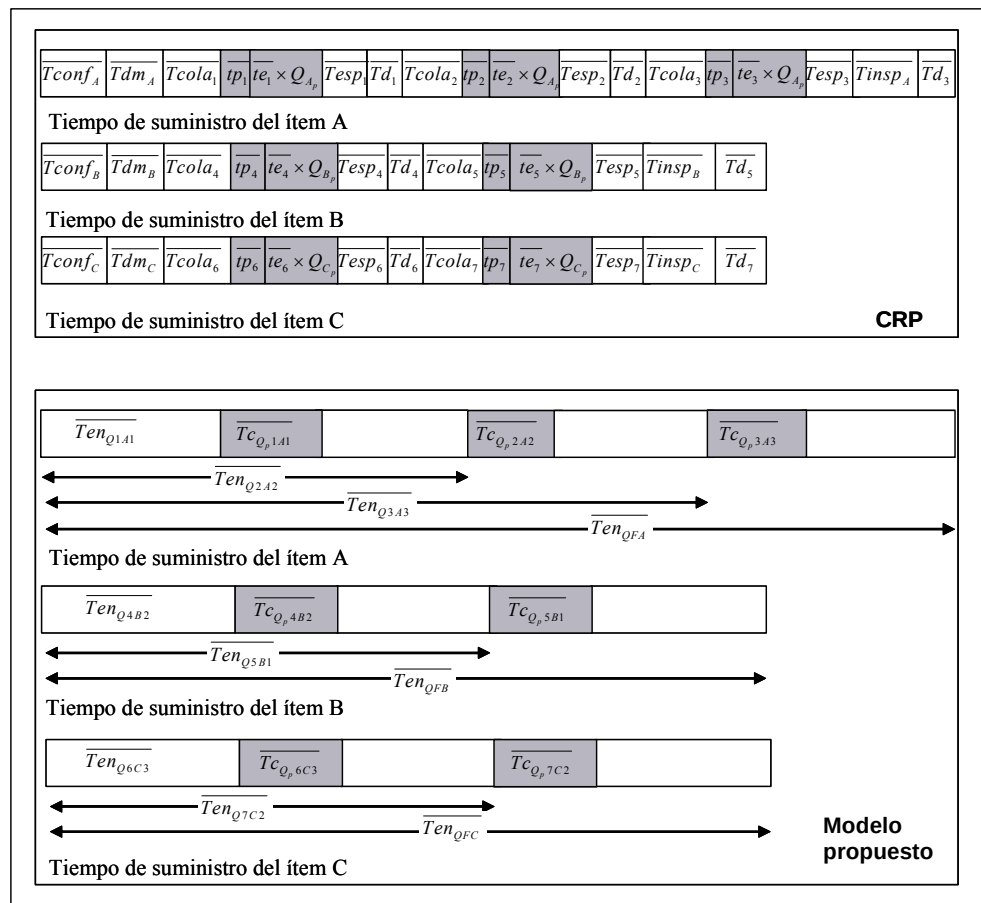


Figura 5.4. Comparativa de la representación de los componentes del tiempo de suministro en CRP y en el modelo propuesto, con programación hacia delante.

La diferencia en el volumen de datos que se precisan para ambas técnicas se puede apreciar claramente en la Figura 5.5., basada en las Tablas 5.29., 5.30 y 5.31., donde se refleja la información en la que difieren CRP y el modelo propuesto.

Operación	te_i (h.r.)	tp_{ik} (h.r.)	Td_{ijk} (h.r.)	$Tcola_{ijk}$ (h.r.)	$Tesp_{ijk}$ (h.r.)
O1	0,21	0,87	0,2	15	0,25
O2	0,23	0,2	0,2	10	0,25
O3	0,003	0,5	0,25	10	0,2
O4	0,013	0,5	0,3	10	0,25
O5	0,025	0,2	0,25	15	0,25
O6	0,015	0,5	0,3	10	0,2
O7	0,03	0,2	0,25	10	0,25

Ítem	$Tconf_j$ (h.r.)	Tdm_j (h.r.)	$Tinsp_j$ (h.r.)
A	2	1,7	0,25
B	2	0,25	0,5
C	2	0,25	0,5

Datos para CRP

Operación	Tamaño	Tc_{Qijk} (h.r.)	Ten_{Qijk} (h.r.)
O1	100	21,87	18,7
O2	100	17,974	51,02
O3	100	0,711	79,44
OF _A	100		80,85
O4	2.000	25,72	12,25
O5	2.000	43,365	53,52
OF _B	2.000		97,885
O6	400	5,96	12,25
	500	7,325	12,25
O7	400	10,246	28,71
	500	12,758	30,075
OF _C	400		39,95
	500		43,88

Datos para el modelo propuesto

Figura 5.5. Datos exclusivos necesarios para CRP y para la mecánica de cálculo propuesta.

Una vez comparados los datos que se precisan en cada una de las técnicas, pasamos a realizar la Planificación de Capacidad a corto plazo. Recordemos que el Plan de Carga contiene la capacidad necesaria, por Centro de Trabajo y periodo, para procesar los lotes incluidos en el Plan de Materiales (Tabla 5.2.) y finalizar los lotes en proceso (Tabla 5.3.). Para obtenerlo precisamos estimar el valor y el momento en el que se asignarán las cargas que se originen en el procesamiento de tales lotes. Según observamos en la Tabla 5.2., en este ejemplo sólo hay cuatro tamaños de lote diferentes, que se emiten en distintos periodos de tiempo: cuatro lotes de 100 unidades del ítem A, cuatro lotes de 2.000 unidades del ítem B, un lote de 400 unidades del ítem C, y cuatro lotes de 500 unidades del ítem C. Por lo tanto sólo será preciso determinar la programación hacia delante y carga para cada uno de estos cuatro lotes, aplicando el resultado a los distintos periodos de emisión.

5.5.4. Cálculo de la carga con CRP

Tal y como comentamos en el Apartado 5.5.2., en esta técnica necesitamos conocer, no sólo los datos relativos al Plan de Materiales (Tabla 5.2.), a la carga de los pedidos en curso (Tabla 5.3.) y a los Centros de Trabajo (Tabla 5.4.), que también requiere la técnica que proponemos, sino que además, para calcular el

valor y momento de asignación de las cargas para realizar una planificación con CRP necesitamos conocer los tiempos de preparación (tp_{ik}), ejecución (te_i), confección de pedido ($Tconf_j$), desplazamiento de materiales (Tdm_j) y de lotes (Td_{ijk}), cola ($Tcola_{ijk}$), espera ($Tesp_{ijk}$) e inspección ($Tinsp_j$), resumidos en las Tablas 5.29. y 5.30.

Para el cálculo del tiempo de carga producido en cada operación necesitamos conocer, además del tamaño del lote emitido (Q_j), el tiempo de ejecución unitario (te_i) y el de preparación del lote (tp_{ik}). Dado que CRP considera por separado los dos tiempos que generan carga, los calcularemos de manera independiente.

El tiempo de preparación del Centro de Trabajo, tal como vimos en el Apartado 5.5.2.1., es independiente del tamaño de lote a procesar. Por otro lado, el tiempo de ejecución total o tiempo necesario para realizar la operación a todas las unidades que componen el lote, depende del tamaño real de éste (ver Apartado 5.5.2.2.), aunque, tal como vimos en el Apartado 5.5.3., CRP utiliza, para su cálculo, el número de unidades emitidas, no considerando la reducción del tamaño del lote ocasionada por la eliminación de las unidades defectuosas en la segunda y siguientes operaciones de la ruta del ítem. Así, por ejemplo, la ejecución de la operación O1 a un lote emitido en el periodo 1 de 100 unidades de A (Q_{A1}), tomando los datos de la Tabla 5.29., precisaría de:

$$Ejecución_i(h.r.) = te_i \times Q_j = te_i \times Q_{A1} = 0,21 \times 100 = 21 h.r.$$

Con objeto de poder comparar la carga con la capacidad disponible, debemos averiguar el tiempo de preparación y ejecución en horas estándar. Así, con el cálculo anterior y el valor de los factores eficiencia y utilización, que se indican en la Tabla 5.4., podemos determinar el tiempo estándar para la ejecución completa de la operación O1, a realizar sobre el lote de 100 unidades del ítem A emitido en el periodo 1 (Q_{A1}):

$$\begin{aligned} Ejecución_i(h.e.) &= Ejecución_i(h.r.) \times E_k \times U_k = \\ &= Ejecución_i(h.r.) \times E_1 \times U_1 = 21 h.r. \times 0,8 \times 0,95 = 15,96 h.e. \end{aligned}$$

Por otro lado, el tiempo de preparación en horas estándar se calculará de manera similar, multiplicando el tiempo de preparación en horas reales (Tabla 5.29.) por los factores utilización y eficiencia del Centro de Trabajo (Tabla 5.4.). Para el ejemplo que estamos siguiendo el resultado será:

$$\begin{aligned}
 tp_{ik}(h.e.) &= tp_{ik}(h.r.) \times E_k \times U_k = \\
 &= tp_{11}(h.r.) \times E_1 \times U_1 = 0,87 h.r. \times 0,8 \times 0,95 = 0,661 h.e.
 \end{aligned}$$

La carga total originada por el procesamiento de O1 a Q_{A1} unidades, será la suma del tiempo de preparación y ejecución en horas estándar, calculados anteriormente⁴⁴:

$$\begin{aligned}
 C_{Q_{ijk}}(h.e.) &= Ejecución_i(h.e.) + tp_{ik}(h.e.) \\
 C_{(100)1.A1}(h.e.) &= Ejecución_1(h.e.) + tp_{11}(h.e.) = 15,96 + 0,661 = 16,621 h.e.
 \end{aligned}$$

Para distribuir la carga entre los periodos que componen el horizonte de planificación, es preciso tomar en consideración el resto de los tiempos que componen el tiempo de suministro⁴⁵. Siguiendo el ejemplo de los lotes emitidos de 100 unidades del ítem A, el procedimiento para la asignación de las cargas consiste en determinar el momento de inicio y finalización de cada una de las tareas que se incluyen en el tiempo de suministro (confección del pedido, desplazamientos de materiales o del lote, cola, preparación del Centro de Trabajo, ejecución de la operación, espera para el traslado e inspección al final de su ruta) considerando el orden indicado por su ruta de fabricación (Figura 5.2.). Para ello se ha elaborado la Tabla 5.32., donde se reflejan esos valores, permitiendo calcular los periodos transcurridos desde la emisión del lote hasta el momento en el que se genera la carga, así como la cuantía que le corresponde a cada periodo.

Para diferenciar los datos utilizados por CRP de los cálculos realizados, se han resaltado los primeros en las tablas que reflejan la asignación de las cargas (Tablas 5.32., 5.33., 5.34. y 5.35.).

En este proceso de cálculo se han determinado las horas (columna “Hora final” de la Tabla 5.32. y periodos (columna “Periodo” de la Tabla 5.32.) transcurridos desde la emisión del lote hasta la finalización de cada tarea, representativa de los tiempos que componen el tiempo de suministro, considerando la terminación de una tarea como el momento de comienzo de la siguiente. El instante en el que finaliza cada una de ellas, u hora final, se ha calculado con los valores acumulados de los tiempos (en horas reales) de cada componente del tiempo de suministro y, para determinar el periodo, se ha tenido en cuenta que éste tiene una duración de 40 h.r. [cada periodo está compuesto por cinco días

⁴⁴ Se ha preferido calcular el tiempo de carga a partir de los tiempos de ejecución y preparación totales para reflejar más claramente sus incidencias en el proceso productivo.

⁴⁵ Para un análisis más pormenorizado de la distribución de la carga para nuestro ejemplo, en los distintos periodos del horizonte de planificación, ver Apartado A2.3.2. del Anexo 2.

laborables de 8 h.r. al día (Tabla 5.32.)). Así, por ejemplo, para el procesamiento de un lote de 100 unidades del ítem A, la hora final del tiempo de cola para la operación O1 ($Cola_1$, incluido en la Tabla 5.32.) se calcula como la suma de los tiempos de confección y desplazamiento que se generan con anterioridad en su ruta más el tiempo de cola para dicha operación (valores tomados de las Tablas 5.29. y 5.30.):

$$Cola_1 = Tconf_A + Tdm_A + Tcola_{1A1} = 2 + 1,7 + 15 = 18,7 \text{ h.r.}$$

Ítem	A					
Tamaño	100					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Inicio	CT1			0	1	
Confección _A		2		2	1	
Desplazamiento _A		1,7		3,7	1	
Cola ₁		15		18,7	1	
Preparación ₁	O1	0,87	0,661	19,57	1	16,188
Ejecución ₁	CT2	21	15,960	40,57	2	0,433
Espera ₁		0,25		40,82	2	
Desplazamiento ₁		0,2		41,02	2	
Cola ₂		10		51,02	2	
Preparación ₂	O2	0,2	0,156	51,22	2	18,142
Ejecución ₂	CT3	23	17,986	74,22	2	
Espera ₂		0,25		74,47	2	
Desplazamiento ₂		0,2		74,67	2	
Cola ₃		10		84,67	3	
Preparación ₃	O3	0,5	0,401	85,17	3	0,641
Ejecución ₃	CT3	0,3	0,240	85,47	3	
Espera ₃		0,2		85,67	3	
Inspección _A		0,25		85,92	3	
Desplazamiento ₃		0,25		86,17	3	

Tabla 5.32. Programación hacia delante y carga para un lote de 100 unidades del ítem A, utilizando CRP.

Siguiendo el ejemplo anterior, el periodo en el que finaliza el tiempo de cola de la operación O1 será el primer periodo en el que comience a procesarse el lote, es decir, cuando empiece la preparación del Centro de Trabajo. Utilizando una lógica similar a la aplicada en la expresión (5.8), considerando el momento de entrada como el final de la cola de espera y sabiendo que la duración del periodo es de 40 h.r. (T_p), se puede determinar que el primer cubo de tiempo en el que se asignará la carga será un periodo después de la emisión:

$$\text{Periodo Cola}_i = E\left(\frac{\text{Cola}_i}{T_p}\right) + 1$$

$$\text{Periodo Cola}_1 = E\left(\frac{\text{Cola}_1}{T_p}\right) + 1 = E\left(\frac{18,7}{40}\right) + 1 = 1$$

El último periodo en el que se distribuirá la carga se calculará analizando la hora en la que finaliza la ejecución de la operación O1. Siguiendo el mismo procedimiento que el utilizado anteriormente, podemos determinar que la carga de la operación O1, a realizar sobre un lote de 100 unidades de A, terminará de asignarse en el segundo periodo desde la emisión de dicho lote:

$$\text{Periodo Ejecución}_i = E\left(\frac{\text{Ejecución}_i}{T_p}\right) + 1$$

$$\text{Periodo Ejecución}_1 = E\left(\frac{\text{Ejecución}_1}{T_p}\right) + 1 = E\left(\frac{40,57}{40}\right) + 1 = 2$$

Cuando el periodo de finalización del tiempo de cola, indicador de la entrada del lote en el Centro de Trabajo para la realización de una operación, sea diferente que el periodo en que acaba la ejecución de dicha operación, será necesario calcular qué cantidad de carga se debe asignar a cada cubo de tiempo. Para la operación O1 la carga se distribuye en dos periodos, por lo que sólo es preciso diferenciar entre: el tiempo transcurrido desde que comienza a prepararse el Centro de Trabajo hasta el final del periodo (carga asignada al primero de los periodos en que se asigne ésta) y el tiempo que se origina desde que empieza el periodo siguiente hasta que finaliza la ejecución (carga asignada al cubo de tiempo posterior). Basándonos en la lógica seguida para desarrollar la expresión (5.9) y tomando la finalización de la cola (Cola_1) como el momento de entrada en el Centro de Trabajo, obtendremos la carga que se asignará al primero de los dos

periodos en los que se distribuye la capacidad necesaria para el procesamiento de la operación O1 a un lote de 100 unidades del ítem A:

$$C_{Qijk(p_e+p_i)} = \left[Tp \times \left[E(Cola_{ijk} / Tp) + 1 \right] - Cola_{ijk} \right] \times E_k \times U_k$$

$$C_{100'1A1(p_e+1)} = \left[Tp \times \left[E(Cola_{1A1} / Tp) + 1 \right] - Cola_{1A1} \right] \times E_1 \times U_1 =$$

$$= \left[40 \times \left[E(18,7 / 40) + 1 \right] - 18,7 \right] \times 0,8 \times 0,95 = 16,188 \text{ h.e.}$$

Para el segundo y último periodo en el que se distribuye la carga originada por el procesamiento de O1 al lote de 100 A, se asignará el resto de aquella:

$$C_{100'1A1(p_e+2)} = C_{100'1A1} - C_{100'1A1(p_e+1)} = 16,621 - 16,188 = 0,433 \text{ h.e.}$$

Continuando con el análisis de la Tabla 5.32., si consideramos que el fin de un lote se produce cuando éste se desplaza hasta el almacén o el lugar donde vaya a ser utilizado como componente de otro ítem, el último valor de la columna “Hora final” de la Tabla 5.32. refleja el tiempo transcurrido desde la emisión del lote hasta su finalización. Así, por ejemplo, el lote de 100 unidades de A estará terminado transcurridas 86,17 horas laborables desde que se emita.

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para la determinación del valor y distribución de la carga de los lotes de 100 unidades de A, se elaboran las Tablas 5.33., 5.34. y 5.35., donde se desarrollan los cálculos necesarios para averiguar la cuantía y asignación de las cargas originadas por el procesamiento de los lotes de 2.000 unidades de B, 500 unidades de C y 400 unidades del ítem C, respectivamente.

Según se aprecia en la Tabla 5.33., para la obtención de un lote de 2.000 unidades del ítem B se precisan 20,723 h.e. en el Centro de Trabajo 2, un periodo después de la emisión; mientras que la carga que genera este lote en el Centro de Trabajo 1, para que se ejecute la operación O5, se repartirá entre el segundo y tercer periodo desde la emisión, con unos valores de 19,532 h.e. y 18,62 h.e. respectivamente.

También podemos apreciar en esta misma tabla que para la finalización de un lote de 2.000 B se necesitan 105,5 horas reales (último valor de la columna “Hora final”), lo que supone que se terminará tres periodos después del comienzo de la fabricación.

Ítem	B					
Tamaño	2.000					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Inicio				0	1	
Confección _B		2		2	1	
Desplazamiento _B		0,25		2,25	1	
Cola ₄	CT2 O4	10		12,25	1	
Preparación ₄		0,5	0,391	12,75	1	20,723
Ejecución ₄		25,22	20,332	38,75	1	
Espera ₄		0,25		39	1	
Desplazamiento ₄	CT1 O5	0,3		39,3	1	
Cola ₅		15		54,3	2	
Preparación ₅		0,2	0,152	54,5	2	19,532
Ejecución ₅		43,165	38	104,5	3	18,62
Espera ₅		0,25		104,75	3	
Inspección _B		0,5		105,25	3	
Desplazamiento ₅		0,25		105,5	3	

Tabla 5.33. Programación hacia delante y carga para un lote de 2.000 unidades del ítem B, utilizando CRP.

En relación a los lotes de 500 unidades del ítem C, según se aprecia en la Tabla 5.34., para el procesamiento de la primera operación de su ruta se necesita 6,408 h.e. en el Centro de Trabajo 3, durante el periodo siguiente a su emisión (recuérdese que se ha considerado que los lotes se emiten al final del periodo). Sin embargo, la carga que precisa en el Centro de Trabajo 2 se dividirá entre los periodos primero y segundo tras la emisión a una razón de 7,233 h.e. y de 4,653 h.e., respectivamente.

Los lotes de 500 C finalizarán dos periodos después de su emisión, habiéndose estimado que será necesario un tiempo total de 46,95 horas reales (Tabla 5.34.) para que los lotes queden preparados para su uso como producto final o componente de otro más complejo.

Ítem	C					
Tamaño	500					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Inicio	CT3 O6			0	1	6,408
Confección _C		2		2	1	
Desplazamiento _C		0,25		2,25	1	
Cola ₆		10		12,25	1	
Preparación ₆		0,5	0,4005	12,75	1	
Ejecución ₆		7,5	6,0075	20,25	1	
Espera ₆		0,2		20,45	1	
Desplazamiento ₆		0,3		20,75	1	
Cola ₇		10		30,75	1	
Preparación ₇	CT2 O7	0,2	0,1564	30,95	1	7,233
Ejecución ₇		15	11,73	45,95	2	4,653
Espera ₇		0,25		46,2	2	
Inspección _C		0,5		46,7	2	
Desplazamiento ₇		0,25		46,95	2	

Tabla 5.34. Programación hacia delante y carga para un lote de 500 unidades del ítem C, utilizando CRP.

Como ocurre en los lotes de 500 unidades de C, para el caso de que el tamaño de lote sea de 400 unidades, también se necesitan 2 periodos para completarlo (Tabla 5.35.), aunque en total el número de horas reales que se precisan es de 42,45.

Aunque las diferencias entre los lotes de 500 C y 400 C se podrían producir tanto en el valor de la carga como en su momento de asignación, en este ejemplo sólo se originan en la cantidad de carga que habría que asignar a los dos Centros de Trabajo que se utilizan para elaborar este ítem. De manera que, según apreciamos en la Tabla 5.35., se precisarían 5,207 h.e. para desarrollar la operación O6 a un lote completo de 400 unidades de C, en el Centro de Trabajo 3 y el periodo siguiente a la emisión; mientras que para la operación O7, que se desarrolla en el Centro de Trabajo 2, serían necesarias 8,406 h.e. en el primer periodo tras la emisión del lote y 1,134 h.e. en el segundo periodo después de la emisión.

Ítem	C					
Tamaño	400					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Inicio				0	1	
Confección _C		2		2	1	
Desplazamiento _C		0,25		2,25	1	
Cola ₆	CT3 O6	10		12,25	1	
Preparación ₆		0,5	0,4005	12,75	1	5,207
Ejecución ₆		6	4,806	18,75	1	
Espera ₆		0,2		18,95	1	
Desplazamiento ₆	CT2 O7	0,3		19,25	1	
Cola ₇		10		29,25	1	
Preparación ₇		0,2	0,1564	29,45	1	8,406
Ejecución ₇		12	9,384	41,45	2	1,134
Espera ₇		0,25		41,7	2	
Inspección _C		0,5		42,2	2	
Desplazamiento ₇		0,25		42,45	2	

Tabla 5.35. Programación hacia delante y carga para un lote de 400 unidades del ítem C, utilizando CRP.

5.5.5. Cálculo de la carga con el modelo alternativo propuesto

Los cálculos necesarios para determinar el valor y asignación de la carga se reducen en gran medida con el modelo propuesto. Esto es debido a que no es preciso calcular el tiempo de carga de las operaciones, ni el momento de entrada o de comienzo del procesamiento de los lotes en cada Centro de Trabajo⁴⁶ (incluyendo la preparación de éste si fuera necesaria), ya que son datos proporcionados por la Tabla 5.31. Nuestro trabajo se centra, únicamente, en determinar la distribución de la carga, en horas estándar, entre los periodos.

⁴⁶ Este tiempo estaba indicado en las tablas desarrolladas para CRP mediante la “Hora final” de las colas de espera.

Los resultados de los cálculos realizados se han reflejado en las Tablas 5.36. a 5.39. (para los distintos tamaños de lote emitidos de los ítems), donde se ha utilizado una nomenclatura similar a la aplicada en CRP. La columna “Carga (h.r.)” coincide con el tiempo de carga del lote ($T_{C_{Oijk}}$) proporcionado en la Tabla 5.31. y, por otro lado, los datos de “Hora final” de las entradas a los Centros de Trabajo se toman también directamente de la Tabla 5.31., siendo necesario calcular, tan solo, la hora de finalización de los tiempos de carga (sumándole a la hora de entrada el valor de dicho tiempo). Igualmente, se han diferenciado los datos utilizados por el modelo propuesto, de los cálculos realizados resaltando los primeros en las tablas que reflejan la asignación de las cargas (Tablas 5.36., 5.37., 5.38. y 5.39.).

El programa informático que se ha elaborado para la mecánica de cálculo propuesta recalcula, interna y automáticamente, las Tablas 5.36. a 5.39., cada vez que se incorpora algún nuevo dato de procesamiento de lote, ya que utiliza los nuevos valores medios de las variables aleatorias, manteniéndolos actualizados⁴⁷.

El cálculo del periodo de asignación y de la carga por periodo, se realiza de manera similar a la utilizada en CRP, utilizando las expresiones ya detalladas en el Apartado 5.2.

Ítem	A					
Tamaño	100					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Entrada O1				18,7	1	
Tc	CT1 O1	21,87	16,621	40,57	1	16,188
					2	0,433
Entrada O2				51,02	2	
Tc	CT2 O2	17,974	14,056	68,99	2	14,056
Entrada O3				79,44	2	
Tc	CT3 O3	0,711	0,569	80,15	2	0,445
					3	0,1245
Fin lote				80,85	2	

Tabla 5.36. Programación hacia delante y carga para un lote de 100 unidades del ítem A, según el modelo propuesto.

⁴⁷ Esto se debe a la continua actualización de los datos utilizados, incluidos en la Tabla 5.31.

Ítem	B					
Tamaño	2.000					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Entrada O4				12,25	1	
Tc	CT2 O4	25,72	20,113	37,97	1	20,113
Entrada O5				53,52	2	
Tc	CT1 O5	43,365	32,957	96,885	2	20,125
					3	12,833
Fin lote				97,885	3	

Tabla 5.37. Programación hacia delante y carga para un lote de 2.000 unidades del ítem B, según el modelo propuesto.

Para ilustrar el proceso de determinación del periodo de asignación y de la carga por periodo, tomaremos como ejemplo, la operación O5, a realizar sobre un lote de 2.000 unidades de B (Tabla 5.37.), en la que la carga total en horas estándar, según la expresión (5.3) y tomando los datos de las Tablas 5.4. y 5.31., es la siguiente:

$$C_{Qijk} = Tc_{Qijk} \times E_k \times U_k$$

$$C_{2000'5B1} = Tc_{2000'5B1} \times E_1 \times U_1 = 43,365 \times 0,8 \times 0,95 = 32,957 \text{ h.e.}$$

El número de periodos en los que se distribuirá esta carga se puede calcular aplicando la expresión (5.5). Así, tomando los datos de la Tabla 5.37., tendremos que la carga se repartirá entre dos periodos:

$$\begin{aligned} \alpha_{2000'5B1} &= E(Tfo_{2000'5B1} / Tp) - E(Ten_{2000'5B1} / Tp) + 1 = \\ &= E(96,885 / 40) - E(53,52 / 40) + 1 = 2 \end{aligned}$$

En función de la expresión (5.6), la carga de esta operación debe empezar a distribuirse en el segundo periodo desde la emisión del lote:

$$Periodo\ Entrada_i = E\left(\frac{Ten_{Qijk}}{Tp}\right) + 1$$

$$Periodo\ Entrada_5 = E\left(\frac{Ten_{2000'5B1}}{Tp}\right) + 1 = E\left(\frac{53,52}{40}\right) + 1 = 2$$

La cantidad de carga que se debe asignar en el segundo periodo tras la emisión (Periodo de entrada₅ = 2) será, según la expresión (5.9):

$$\begin{aligned}
C_{Qijk(p_e+p_i)} &= \left[Tp \times \left[E(Ten_{Qijk} / Tp) + 1 \right] - Ten_{Qijk} \right] \times E_k \times U_k \\
C'_{2000'5B1(p_e+2)} &= \left[Tp \times \left[E(Ten_{2000'5B1} / Tp) + 1 \right] - Ten_{2000'5B1} \right] \times E_1 \times U_1 = \\
&= \left[40 \times \left[E(53,52 / 40) + 1 \right] - 53,52 \right] \times 0,8 \times 0,95 = 20,125 \text{ h.e.}
\end{aligned}$$

En el tercer periodo desde el comienzo del procesamiento del lote de 2.000 unidades de B se asignará la carga restante, cuyo valor será:

$$C_{2000'5B1(p_e+3)} = C_{2000'5B1} - C_{2000'5B12} = 32,957 - 20,125 = 12,833 \text{ h.e.}$$

Ítem	C					
Tamaño	500					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Entrada O6				12,25	1	
Tc	CT3 O6	7,325	5,867	19,575	1	5,867
Entrada O7				30,0755	1	
Tc	CT2 O7	12,758	9,977	42,833	1	7,761
					2	2,215
Fin lote				43,833	2	

Tabla 5.38. Programación hacia delante y carga para un lote de 500 unidades del ítem C, según el modelo propuesto.

Ítem	C					
Tamaño	400					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Entrada O6				12,25	1	
Tc	CT3 O6	5,96	4,774	18,21	1	4,774
Entrada O7				28,71	1	
Tc	CT2 O7	10,246	8,013	38,95	1	8,013
Fin lote				39,95	2	

Tabla 5.39. Programación hacia delante y carga para un lote de 400 unidades del ítem C, según el modelo propuesto.

Comparando las Tablas 5.32. a 5.35. elaboradas para la técnica CRP, con sus homólogas para el modelo propuesto (Tablas 5.36. a 5.39.), observamos que el número de datos necesarios para los cálculos de la carga se reduce en más de un 60 % (para una ruta de tres operaciones - ítem A - se pasa de 18 datos a tan sólo 7 y para el caso de dos operaciones - ítem B y C -, de 13 a 5 datos). Ello implica menores cálculos para la obtención de los valores y momentos de asignación de las cargas y una mayor fiabilidad de éstos al utilizar datos más agregados.

Como ejemplo ilustrativo de la simplificación alcanzada en los cálculos necesarios para desarrollar la programación de la carga con CRP y el modelo propuesto, se han reflejado, en la Figura 5.6., las Tablas 5.35. y 5.39. En ellas se representa el procedimiento seguido para la determinación de las cargas de las operaciones correspondientes a la elaboración de un lote de 400 unidades del ítem C, identificando los datos extraídos del sistema y los calculados por las técnicas de Planificación de Capacidad. De esta manera se puede observar la importante simplificación alcanzada, no solo en el volumen de datos con los que tratar, sino además en el número de cálculos necesarios para la determinación del valor y asignación de la carga.

Ítem	C						Ítem	C					
Tamaño	400						Tamaño	400					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)	Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Inicio				0	1		Entrada O6				12,25	1	
Confección _C		2		2	1		Tc	CT3 O6	5,96	4,774	18,21	1	4,774
Desplazamiento _C		0,25		2,25	1		Entrada O7				28,71	1	
Cola ₆		10		12,25	1		Tc	CT2 O7	10,246	8,013	38,95	1	8,013
Preparación ₆	CT3 O6	0,5	0,4005	12,75	1	5,207	Fin lote				39,95	2	
Ejecución ₆		6	4,806	18,75	1		Modelo propuesto						
Espera ₆		0,2		18,95	1								
Desplazamiento ₆		0,3		19,25	1								
Cola ₇		10		29,25	1								
Preparación ₇	CT2 O7	0,2	0,1564	29,45	1	8,406							
Ejecución ₇		12	9,384	41,45	2	1,134							
Espera ₇		0,25		41,7	2								
Inspección _C		0,5		42,2	2		CRP						
Desplazamiento ₇		0,25		42,45	2								

Figura 5.6. Comparativa de los cálculos necesarios para la programación de la carga de un lote de 400 unidades de C, con CRP y con el modelo propuesto.

De la comparación de las cargas obtenidas para un lote de 400 unidades de C, con CRP y con el modelo propuesto, observamos que no sólo se producen cambios en el valor, sino también en la asignación de aquélla. Así, la carga de la operación O7, calculada con CRP, se distribuirá en el primer y segundo periodo desde la emisión del lote, mientras que con la consideración de las unidades

defectuosas incluidas en el modelo propuesto, la carga se ubicará íntegramente en el primer periodo a partir del lanzamiento del pedido⁴⁸.

Con objeto de aclarar las diferencias entre el modelo propuesto de Planificación de la Capacidad a Corto Plazo y CRP, se han elaborado las Tablas 5.40. y 5.41., donde se realiza una comparativa entre ambas técnicas, lo que nos permite identificar adecuadamente las ventajas que entendemos que podría proporcionar el modelo propuesto. En dicha tabla se comparan los datos requeridos por ambas técnicas, así como su forma de obtención y el proceso de cálculo del valor y distribución de la carga.

CRP	Modelo propuesto
El Plan de Materiales (fecha de emisión y tamaño de lote emitido Q_j). Los pedidos en curso. Información sobre los periodos que componen el horizonte de planificación. Las rutas de fabricación. Factores eficiencia y utilización (E_k y U_k). Tiempo real disponible por periodo en cada Centro de Trabajo.	
$Tconf_j$ = tiempo de confección de un pedido de j . Tdm_{Q_j} = tiempo de desplazamiento de los materiales. $Td_{Q_{jk}}$ = tiempo de desplazamiento de un lote. $Tcola_{ijk}$ = tiempo de espera medio en cola. te_i = tiempo de ejecución unitario para la operación i . tp_{ik} = tiempo de preparación del Centro de Trabajo k para la operación i . $Tesp_{ijk}$ = tiempo de espera, a la salida del Centro de Trabajo para su traslado. $Tinsp_{Q_j}$ = tiempo dedicado a la inspección de un lote.	$Ten_{Q_{ijk}}$ = momento de entrada o de comienzo del procesamiento del pedido (comienzo de la preparación) en el Centro de Trabajo k para ejecución de la operación i . $Tfo_{Q_{ijk}}$ = fin de la operación i a un lote de Q_j unidades. Tf_{Q_j} = finalización del proceso productivo de un lote.
<u>Obtención:</u> Los tiempos, eficiencia y utilización se calculan con Medición del Trabajo o Teoría de Colas.	<u>Obtención:</u> Los tiempos son calculados con datos históricos. Los factores de eficiencia y utilización se calculan con Medición del Trabajo.
<u>Actualización:</u> Necesita realizar nuevos estudios para actualizarse.	<u>Actualización:</u> Continua y automática a partir de los datos que se van registrando.

Tabla 5.40. Comparativa de los datos necesarios en las técnicas CRP y la propuesta en este trabajo.

⁴⁸ También existe diferencia en la asignación de las cargas con los lotes de 100 unidades de A en la operación O3 (Tablas 5.32. y 5.36.), mientras que en el resto de lotes de B y C (Tablas 5.33., 5.34., 5.37. y 5.38.) tan sólo se producen diferencias en los valores de las cargas, coincidiendo los periodos en los que se asignan éstas.

	CRP	Modelo propuesto
Valor	Necesita: tiempo de ejecución, tamaño de lote emitido y tiempo de preparación. $Tc_{Qijk} = (te_i \times Q_j) + tp_{ijk}$ No considera las unidades defectuosas que se van descartando en la segunda y sucesivas operaciones de las rutas.	Está en función del tamaño de lote emitido. Incluye el efecto de las defectuosas. Tc_{Qijk}
Distribución	Según los componentes del tiempo de suministro. $\overline{TS_{Qj}} = \overline{Tconf_j} + \overline{Td_{Qmj}} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Td_{Qijk}} +$ $+ \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tc_{Qijk}} +$ $+ \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tesp_{ijk}} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tinsp_{Qijk}}$	Determinada por la entrada prevista en el Centro de Trabajo. $\overline{Ten_{Qijk}}$

Tabla 5.41. Comparativa de la mecánica de cálculo de valor y distribución de la carga en las técnicas CRP y la propuesta en este trabajo.

5.5.6. Planificación de Capacidad a corto plazo

Una vez determinada la distribución de la carga originada por todos los tamaños de lote incluidos en el Plan de Materiales, debemos acumularlas en los distintos cubos de tiempo que componen el horizonte de planificación, teniendo en cuenta el momento de la emisión de cada lote e identificando la carga por periodo y Centro de Trabajo para, posteriormente, compararla con la capacidad disponible.

5.5.6.1. Elaboración del Plan de Carga

Los valores incluidos en el Plan de Carga variarán en función de la técnica aplicada, ya que, tal como señalamos en varias ocasiones (ver Apartados 5.2.1. y 5.5.3.), el resultado de los cálculos de los tiempos de carga difiere por el hecho de que CRP no toma en consideración las unidades defectuosas que se van descartando en la segunda y sucesivas operaciones de la ruta.

La identificación de la capacidad necesaria para el procesamiento de los lotes incluidos en el Plan de Materiales y la continuación de los que se encuentran en proceso, así como la distribución de ésta entre los periodos del horizonte de planificación, se ha reflejado por separado en tablas para una mejor comprensión del origen de las cargas. Así, por ejemplo, en las Tablas 5.42. y 5.43., se desarrolla el procedimiento seguido para la elaboración del Plan de Carga en el Centro de Trabajo CT1, para CRP y el modelo alternativo, respectivamente. Se observa que la carga total está compuesta por la suma de:

- La capacidad necesaria para finalizar los lotes en curso (sólo A y B se fabrican en el Centro de Trabajo 1), incluida en la Tabla 5.3.
- La carga generada por los lotes planificados de A que, tal como consta en el Plan de Materiales (ver Tabla 5.2.), se emitirán en los periodos 1, 3, 5 y 6 (Carga de los pedidos A1, A3, A5 y A6).
- La carga generada por los lotes planificados de B que, tal como consta en el Plan de Materiales (ver Tabla 5.2.), se emitirán en los periodos 2, 3, 4 y 7 (Carga de los pedidos B2, B3, B4 y B7).

Ítem/Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
A	100		100		100	100		
B		2000	2000	2000			2000	
C	500	500		500		400		500
P. Curso A	10,868	5,753						
P. Curso B		20,125	12,833					
Carga A1		16,188	0,433					
Carga A3				16,188	0,433			
Carga A5						16,188	0,433	
Carga A6							16,188	0,433
Carga B2				19,532	18,62			
Carga B3					19,532	18,62		
Carga B4						19,532	18,62	
Carga B7								
TOTAL	10,868	42,066	13,266	35,72	38,585	54,34	35,241	0,4332

Tabla 5.42. Plan de Carga para el Centro de Trabajo 1 (CT1) con CRP (h.e.).

Ítem/Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
A	100		100		100	100		
B		2.000	2.000	2.000			2.000	
C	500	500		500		400		500
P. Curso A	10,868	5,753						
P. Curso B		20,125	12,833					
Carga A1		16,188	0,433					
Carga A3				16,188	0,433			
Carga A5						16,188	0,433	
Carga A6							16,188	0,433
Carga B2				20,125	12,833			
Carga B3					20,125	12,833		
Carga B4						20,125	12,833	
Carga B7								
TOTAL	10,868	42,066	13,266	36,313	33,391	49,146	29,454	0,4332

Tabla 5.43. Plan de Carga para el Centro de Trabajo 1 (CT1), con el modelo propuesto (h.e.).

Para la distribución de la carga se ha considerado que un lote comienza su andadura en el periodo siguiente al que se emite, dado que se atribuye la emisión al final del periodo. Así, por ejemplo, la capacidad necesaria para el procesamiento de un lote de 2.000 unidades de B, emitido en el periodo 2 (Carga B2) se podría originar a partir del periodo 3. En concreto, si se utiliza el modelo alternativo propuesto y según la Tabla 5.36. se debe asignar, en el Centro de Trabajo CT1, 20,125 horas estándar al segundo periodo tras la emisión (periodo 4) y 12,833 horas estándar al tercer periodo después del lanzamiento del pedido (periodo 5), como se observa en la Tabla 5.43.

El mismo procedimiento seguido para este Centro de Trabajo CT1 se utilizará para la distribución de las cargas dentro de los Centros CT2 y CT3 (Tablas 5.44. y 5.46. para CRP y Tablas 5.45. y 5.47. para el modelo propuesto).

En este sentido, en las Tablas 5.44. y 5.45. se incluyen las cargas generadas por la finalización del procesamiento de los lotes en curso de los ítems A, B y C (Tabla 5.3.), así como la capacidad necesaria, dentro del horizonte de planificación, para fabricar los lotes de A, B y C incluidos en el Plan de Materiales (Tabla 5.2.).

Ítem/Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
A	100		100		100	100		
B		2.000	2.000	2.000			2.000	
C	500	500		500		400		500
P. Curso A		14,056						
P. Curso B	20,113							
P. Curso C	3,812	6,165						
Carga A1			18,142					
Carga A3					18,142			
Carga A5							18,142	
Carga A6								18,142
Carga B2			20,723					
Carga B3				20,723				
Carga B4					20,723			
Carga B7								20,723
Carga C1		7,2335	4,6529					
Carga C2			7,2335	4,6529				
Carga C4					7,2335	4,6529		
Carga C6							8,4065	1,1339
TOTAL	23,925	27,455	50,751	25,376	46,099	4,6529	26,549	39,999

Tabla 5.44. Plan de Carga para el Centro de Trabajo 2 (CT2) con CRP (h.e.).

Podemos observar en la Tabla 5.44. que se podría originar una clara subcarga en el periodo 6, dado que tan sólo se necesitan 4,6529 h.e. cuando el valor medio de la capacidad necesaria durante el horizonte de planificación está en torno a las 30 h.e. Una situación similar a la observada en la Tabla 5.44. se aprecia en la Tabla 5.45., en la que se presenta el Plan de Carga elaborado con el modelo propuesto, necesitándose, en el periodo 6, tan sólo 2,2154 h.e.

El desarrollo de los Planes de Carga mediante el modelo propuesto para los Centros de Trabajo 2 y 3 (Tablas 5.45. y 5.47.) ofrecen diferencias en relación a los elaborados por CRP (Tablas 5.44. y 5.46.) por el hecho de que este último no tiene en cuenta la reducción del tamaño de lote a causa de las unidades defectuosas que se van generando a lo largo del proceso productivo. Esto ocasiona variaciones en los valores de la carga e incluso, en algunos casos, cambios en los periodos en los que éstas se originan.

Éste es el caso de los lotes de 400 unidades de ítem C, que generan carga en los Centros de Trabajo 2 y 3, donde, como se mostró en la Figura 5.6., existen diferencias en los periodos de asignación de la capacidad necesaria de la operación O7 (ejecutada en el Centro de Trabajo 2), ya que para CRP la carga estimada se distribuiría uno y dos periodos después de la emisión del lote; mientras que según el modelo propuesto sólo se necesitaría capacidad en el periodo siguiente a la emisión.

Ítem/Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
A	100		100		100	100		
B		2.000	2.000	2.000			2.000	
C	500	500		500		400		500
P. Curso A		14,056						
P. Curso B	20,113							
P. Curso C	3,812	6,165						
Carga A1			14,056					
Carga A3					14,056			
Carga A5							14,056	
Carga A6								14,056
Carga B2			20,113					
Carga B3				20,113				
Carga B4					20,113			
Carga B7								20,113
Carga C1		7,761	2,215					
Carga C2			7,761	2,215				
Carga C4					7,761	2,215		
Carga C6							8,013	
TOTAL	23,925	27,982	44,146	22,328	41,93	2,2154	22,069	34,169

Tabla 5.45. Plan de Carga para el Centro de Trabajo 2 (CT2) con el modelo propuesto (h.e.).

El desarrollo del Plan de Carga del Centro de Trabajo 3 para CRP (Tabla 5.46.) y el modelo de Planificación de Capacidad propuesto (Tabla 5.47.) incluye la carga generada por los pedidos en curso de fabricación de los ítems A y C (Tabla 5.3.), así como la producida por los incluidos en el Plan de Materiales (Tabla 5.2.), que suponen necesidades de capacidad dentro del horizonte de planificación.

Ítem/Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
A	100		100		100	100		
B		2.000	2.000	2.000			2.000	
C	500	500		500		400		500
P. Curso A		0,569						
P. Curso C	5,867							
Carga A1				0,641				
Carga A3						0,641		
Carga A5								0,641
Carga A6								
Carga C1		6,408						
Carga C2			6,408					
Carga C4					6,408			
Carga C6							5,207	
TOTAL	5,867	6,977	6,408	0,641	6,408	0,641	5,207	0,641

Tabla 5.46. Plan de Carga para el Centro de Trabajo 3 (CT3) con CRP (h.e.).

Ítem/Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
A	100		100		100	100		
B		2.000	2.000	2.000			2.000	
C	500	500		500		400		500
P. Curso A		0,569						
P. Curso C	5,867							
Carga A1			0,445	0,1245				
Carga A3					0,445	0,1245		
Carga A5							0,445	0,1245
Carga A6								0,445
Carga C1		5,867						
Carga C2			5,867					
Carga C4					5,867			
Carga C6							4,774	
TOTAL	5,867	6,436	6,312	0,1245	6,312	0,1245	5,219	0,5695

Tabla 5.47. Plan de Carga para el Centro de Trabajo 3 (CT3) con el modelo propuesto (h.e.).

5.5.6.2. Determinación de la capacidad disponible

Para comparar la capacidad necesaria por periodo y Centro de Trabajo con la capacidad disponible, es necesario determinar las horas estándar que dispone cada cubo de tiempo en cada Centro. Basándonos en la información recogida en la Tabla 5.4., teniendo en cuenta que todos los periodos tienen la misma duración y que en cada Centro de Trabajo hay un único turno, al aplicar la expresión (5.14) en el Centro de Trabajo CT1, obtenemos:

$$\begin{aligned}\overline{CD}_1 &= u.r._1 \times \left[\min \left(\frac{n^\circ \text{trab } maq_1}{n^\circ \text{trab por } maq_1}, n^\circ \text{maq}_1 \right) + n^\circ \text{trab}_1 \right] \times \\ &\quad \times \text{días laborables del periodo} \times \overline{E}_1 \times \overline{U}_1 = \\ &= 8 \text{ h.r.} \times \left[\min \left(\frac{3}{2}, 2 \right) + 0 \right] \times 5 \text{ días} \times 0,8 \times 0,95 = 30,4 \text{ h.e.}\end{aligned}$$

Siguiendo el mismo procedimiento se determina que la capacidad disponible por periodo en los Centros CT2 y CT3 de este ejemplo es de 62,56 h.e. y 32,04 h.e., respectivamente.

5.5.6.3. Desviaciones de la capacidad necesaria frente a la disponible

La Planificación de Capacidad a corto plazo pretende determinar las divergencias entre la capacidad necesaria y la disponible, por lo que será preciso comparar ambas. Por este motivo se ha recogido en la Tabla 5.48. el cálculo de las desviaciones que se originan en este ejemplo, si utilizamos CRP, incluyendo los valores agregados de las Tablas 5.42., 5.44. y 5.46. (separando la carga por pedidos en curso de la generada por los lotes de cada ítem incluidos en el Plan de Materiales) y comparándolos con la capacidad disponible (C. Disp.), calculada en el apartado anterior.

Se puede observar que existen desviaciones negativas, es decir, periodos en los que la capacidad necesaria supera a la disponible, en el Centro de Trabajo CT1; en concreto en los periodos 2, 5, 6 y 7. Esto supondría que algunos de los lotes incluidos en el Plan de Materiales no podrán ser entregados a tiempo, por lo que la empresa debería plantearse utilizar medidas de ajuste transitorio de capacidad en el Centro de Trabajo CT1 (como pueden ser horas extras, cambios en las vacaciones de los trabajadores, etc.), o bien proponer cambios en el Programa Maestro de Producción.

Ítem/Periodo		1	2	3	4	5	6	7	8
A		100		100		100	100		
B			2.000	2.000	2.000			2.000	
C		500	500		500		400		500
CT1	P. Curso A	10,868	5,753						
	P. Curso B		20,125	12,833					
	P. Mat. A		16,188	0,433	16,188	0,433	16,188	16,621	0,433
	P. Mat. B				19,532	38,152	38,152	18,620	
	TOTAL	10,868	42,066	13,266	35,720	38,585	54,34	35,241	0,433
	C. Disp.	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4
	DESV.	19,532	-11,66	17,134	-5,320	-8,185	-23,94	-4,841	29,967
CT2	P. Curso A		14,056						
	P. Curso B	20,113							
	P. Curso C	3,812	6,165						
	P. Mat. A			18,142		18,142		18,142	18,142
	P. Mat. B			20,723	20,723	20,723			20,723
	P. Mat. C		7,234	11,886	4,653	7,234	4,653	8,407	1,134
	TOTAL	23,925	27,455	50,751	25,376	46,099	4,653	26,549	39,999
	C. Disp.	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56
	DESV.	38,635	35,106	11,809	37,184	16,462	57,907	36,012	22,561
CT3	P. Curso A	0,000	0,569						
	P. Curso C	5,867							
	P. Mat. A			0,000	0,641	0,000	0,641	0,000	0,641
	P. Mat. C		6,408	6,408	0	6,408	0	5,207	0
	TOTAL	5,867	6,977	6,408	0,641	6,408	0,641	5,207	0,641
	C. Disp.	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04
	DESV.	26,173	25,063	25,632	31,399	25,632	31,399	26,833	31,399

Tabla 5.48. Planificación de Capacidad por periodo y Centro de Trabajo con CRP (h.e.).

En el caso de aplicar el modelo propuesto, la Planificación de Capacidad resultante es la indicada en la Tabla 5.49., creada a partir de la capacidad disponible calculada en el Apartado 5.5.6.2. y los cálculos reflejados en las Tablas 5.43., 5.45. y 5.47.

Ítem/Periodo		1	2	3	4	5	6	7	8
A		100		100		100	100		
B			2.000	2.000	2.000			2.000	
C		500	500		500		400		500
CT1	P. Curso A	10,868	5,753						
	P. Curso B		20,125	12,833					
	P. Mat. A		16,188	0,433	16,188	0,433	16,188	16,621	0,433
	P. Mat. B				20,125	32,958	32,958	12,833	
	TOTAL	10,868	42,066	13,266	36,313	33,391	49,146	29,454	0,433
	C. Disp.	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4
	DESV.	19,532	-11,66	17,134	-5,913	-2,991	-18,74	0,946	29,967
CT2	P. Curso A		14,056						
	P. Curso B	20,113							
	P. Curso C	3,812	6,165						
	P. Mat. A			14,056		14,056		14,056	14,056
	P. Mat. B			20,113	20,113	20,113			20,113
	P. Mat. C		7,761	9,977	2,215	7,761	2,215	8,013	
	TOTAL	23,925	27,982	44,146	22,328	41,930	2,215	22,069	34,169
	C. Disp.	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56
	DESV.	38,635	34,578	18,414	40,232	20,630	60,345	40,491	28,391
CT3	P. Curso A		0,569						
	P. Curso C	5,867							
	P. Mat. A			0,445	0,1244	0,445	0,1245	0,445	0,569
	P. Mat. C		5,867	5,867		5,867	0	4,774	0
	TOTAL	5,867	6,436	6,312	0,1245	6,312	0,1245	5,219	0,569
	C. Disp.	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04
	DESV.	26,173	25,604	25,728	31,916	25,728	31,916	26,821	31,471

Tabla 5.49. Planificación de Capacidad por periodo y Centro de Trabajo con el modelo propuesto (h.e.).

Puesto que la diferencia de resultados en la Planificación de Capacidad de ambas técnicas se debe al hecho de tener o no en cuenta las unidades defectuosas, podemos observar, comparando las Tablas 5.48. y 5.49., la incidencia del factor aprovechamiento. La técnica CRP, al no reducir los tamaños de lote por efecto de la eliminación de unidades con defectos, genera un Plan de Carga inflado que origina unas sobrecargas superiores a las que se establecen con el modelo

alternativo propuesto. Las diferencias en estos valores pueden ser superiores al 600%, como en el Centro de Trabajo CT1 en el periodo 7, donde la desviación negativa planificada por CRP es de 4,841 h.e. (Tabla 5.48.) mientras que, según la mecánica del modelo propuesto, al tener en cuenta las unidades defectuosas, existiría un exceso de capacidad de 0,946 h.e. (Tabla 5.49.). Es decir, en el caso de aplicar CRP, se podrían haber tomado medidas de ajuste transitorio de capacidad para hacer frente a una sobrecarga en el periodo 7 cuando, teniendo en cuenta el factor aprovechamiento, sobraría capacidad.

El resultado de estos cálculos que hemos realizado manualmente, los expone el programa informático diseñado mediante la opción de “Elaborar Plan de Carga” que se ofrece dentro del menú para la gestión de la capacidad y del tiempo de suministro. En primer lugar se obtendría un análisis resumido de las sobrecargas (Ilustración 5.23.) obteniéndose, al hacer clic sobre el icono “Plan de Carga Detallado”, la identificación de la carga por periodo y Centro de Trabajo (Ilustración 5.24.). En esta última pantalla se ofrece un análisis detallado de las sobrecargas, ya que se indican los valores de la carga, capacidad disponible, desviación y porcentaje de sobrecarga o subcarga generado, permitiendo además determinar el origen de las desviaciones al hacer clic sobre “Desglose”.

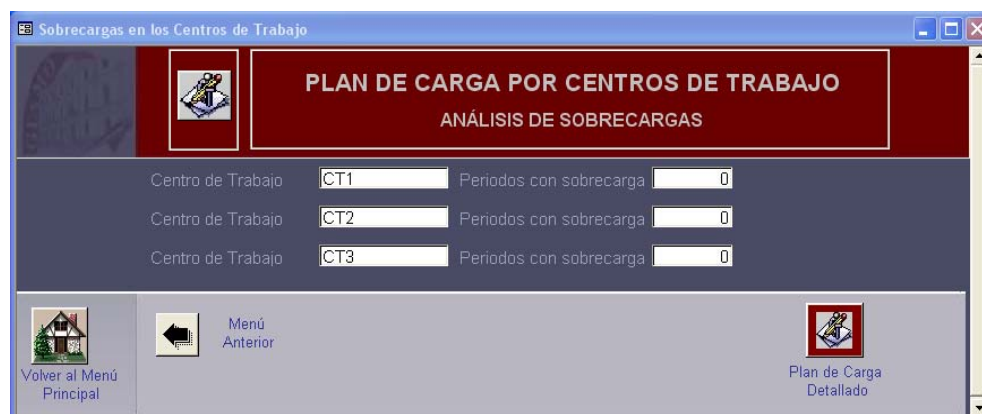


Ilustración 5.23. Pantalla dedicada al análisis de sobrecargas en los Centros de Trabajo.

Dado que no es habitual conocer con certeza el valor de los tiempos que se originan en la ruta de fabricación de los distintos ítems que elabora una empresa, es necesario estudiar el efecto de la aleatoriedad sobre los resultados de la planificación elaborada a través de la mecánica de cálculo del modelo propuesto, en comparación a la obtenida con CRP. Esta última necesita que el planificador se percatara de que se ha producido un cambio en los valores de los datos necesarios para la Planificación de Capacidad y, en su caso, hacer nuevos estudios para analizarlos, los cuales, además de ser muy costosos, requieren bastante tiempo para

su realización. Por otro lado, una de las características diferenciadoras de la técnica aquí planteada, es la de utilizar para las estimaciones de las variables, los valores históricos actualizados, lo que proporciona una mayor exactitud al Plan de Carga.



Ilustración 5.24. Pantalla con el Plan de Carga detallado para el Centro de Trabajo CT1 reflejando el desglose de la carga para el periodo 4.

Ello supone que la Planificación de Capacidad, según el modelo propuesto, a diferencia de CRP, permite adecuarse a los cambios en los valores de los tiempos. Aplicándolo al caso del ejemplo, si tan sólo consideramos que los tiempos de ejecución de las operaciones O1 y O5, ambas realizadas en el Centro de Trabajo CT1, aumentan en un 5 %, se producirá un cambio en el valor y asignación de la carga, ya que variarán los momentos de entrada de las operaciones posteriores a sus rutas de fabricación⁴⁹. La variación en el tiempo de ejecución provocará diferencias, no sólo en la estimación de la carga de los lotes incluidos en el Plan de Materiales, sino también en los lotes en proceso, por lo que los nuevos valores de la capacidad necesaria para finalizar tales lotes serían los incluidos en la Tabla 5.50.

⁴⁹ En el caso de la operación O5, al ser la última de su ruta, el cambio en el tiempo de ejecución sólo afecta a su propio tiempo de carga y al momento de finalización del lote.

Ítem	Centro de Trabajo	Periodos		
		1	2	3
A	CT1	10,868	6	
	CT2		14,056	
	CT3		0,569	
B	CT1		20,125	13,51
	CT2	20,113		
C	CT2	3,812	6,165	
	CT3	5,867		

Tabla 5.50. Carga de los pedidos en curso tras el aumento, en un 5%, del tiempo de ejecución de las operaciones O1 y O5 (h.e.).

Como se ha indicado, las estimaciones del tiempo de carga de los lotes emitidos para las operaciones O1 y O5, así como el momento de entrada en el Centro de Trabajo para el procesamiento de las operaciones siguientes a O1, variarán con respecto a las indicadas en la Tabla 5.31. Los valores recalculados, considerando que el tiempo de ejecución de las operaciones O1 y O5 aumenta en un 5 %, son los que se indican en la Tabla 5.51., donde se han resaltado los datos que han variado con respecto a la situación inicial.

Operación	Tamaño	$T_{c_{Qijk}}$ (h.r.)	$T_{en_{Qijk}}$ (h.r.)
O1	100	22,92	18,7
O2	100	17,974	52,07
O3	100	0,711	80,49
OF _A	100		81,2
O4	2.000	25,72	12,25
O5	2.000	45,523	53,52
OF _B	2.000		100,043
O6	400	5,96	12,25
	500	7,325	12,25
O7	400	10,246	28,71
	500	12,758	30,075
OF _C	400		39,95
	500		43,883

Tabla 5.51. Tiempo de carga del lote ($T_{c_{Qijk}}$) y momento de entrada de cada operación ($T_{en_{Qijk}}$) tras el aumento, en un 5%, del tiempo de ejecución de las operaciones O1 y O5.

Aun cuando hayan aumentado los tiempos de ejecución de las operaciones O1 y O5, la planificación realizada con CRP no variaría, ya que sería preciso que el planificador se percatara de dicho cambio (normalmente a través de la Medición del Trabajo) y que lo introdujera manualmente en la base de datos del sistema. El software desarrollado a partir de mecánica de cálculo para el modelo propuesto, sin embargo, recalcularía automáticamente el Plan de Carga⁵⁰ (Tabla 5.52.), indicando una variación importante en las desviaciones de los periodos 2, 3, 5, 6 y 7, del Centro de Trabajo CT1.

Por la tanto, mientras que CRP seguiría manteniendo la Planificación de Capacidad incluida en la Tabla 5.48., la que realmente se produciría sería la reflejada en la Tabla 5.52. (también se puede apreciar el cambio, en la Planificación de Capacidad del Centro de Trabajo CT1, a través de la Ilustración 5.25., que refleja el resultado obtenido mediante el programa informático diseñado). En este sentido, se observa que el aumento en un 5% del tiempo de ejecución de las operaciones O1 y O5 genera un incremento de las sobrecargas, con respecto a lo planificado con CRP (Tabla 5.48.), en los periodos 2 y 4, siendo, en este último caso superior al 11% (pasando de -5,32 h.e. a -5,91 h.e., en la Tabla 5.52.). También se originan reducciones de las sobrecargas de determinados periodos, como se observa en los periodos 3, 5, 6, 7 y 8 (con variaciones del 8,6%, 33,6%, 14,8%, 69,2%, donde se pasa de -4,841 h.e. a -1,492 h.e., y 2,6%, respectivamente).

No hay que perder de vista que estas variaciones del Plan de Carga se originan al cambiar únicamente dos de los cincuenta tipos de variables aleatorias consideradas por CRP para este ejemplo⁵¹. Tras analizar el efecto de la variación de la planificación, se observa que el hecho de que el software CRP no actualice los valores de sus variables automática y constantemente, como lo hace el desarrollado para el modelo alternativo propuesto, puede generar unas variaciones más que proporcionales en la Planificación de Capacidad, reduciéndose la utilidad del Plan de Carga elaborado.

⁵⁰ Para ello, se ha procedido a calcular nuevamente las Tablas 5.36. y 5.37. (donde se encuentran las operaciones O1 y O5), sustituyendo los valores de los tiempos de carga y entrada de las operaciones por los reflejados en la Tabla 5.52.

⁵¹ 7 operaciones x 5 datos/operación (tiempo de desplazamiento, cola, preparación, ejecución y espera) + 3 rutas x 3 datos/ruta (tiempo de confección, desplazamiento de materiales e inspección) + 3 Centros de Trabajo x 2 datos/Centro de Trabajo (factores eficiencia y utilización).

Ítem/Periodo		1	2	3	4	5	6	7	8
A		100		100		100	100		
B			2.000	2.000	2.000			2.000	
C		500	500		500		400		500
CT1	P. Curso A	10,868	6						
	P. Curso B		20,125	13,517					
	P. Mat. A		16,188	1,231	16,188	1,231	16,188	17,419	1,231
	P. Mat. B				20,125	34,598	34,598	14,473	
	TOTAL	10,868	42,313	14,748	36,313	35,829	50,786	31,892	1,231
	C. Disp.	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4	30,4
	DESV.	19,532	-11,91	15,652	-5,913	-5,429	-20,386	-1,492	29,169
CT2	P. Curso A		14,056						
	P. Curso B	20,113	0						
	P. Curso C	3,812	6,165						
	P. Mat. A			14,056		14,056		14,056	14,056
	P. Mat. B			20,113	20,113	20,113			20,113
	P. Mat. C		7,761	9,977	2,215	7,761	2,215	8,013	
	TOTAL	23,925	27,982	44,146	22,328	41,930	2,215	22,069	34,169
	C. Disp.	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56	62,56
	DESV.	38,635	34,578	18,414	40,232	20,630	60,345	40,491	28,391
CT3	P. Curso A		0,569						
	P. Curso C	5,867							
	P. Mat. A				0,569		0,569		0,569
	P. Mat. C		5,867	5,867		5,867		4,774	
	TOTAL	5,867	6,436	5,867	0,569	5,867	0,569	4,774	0,569
	C. Disp.	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04	32,04
	DESV.	26,173	25,604	26,173	31,471	26,173	31,471	27,266	31,471

Tabla 5.52. Plan de Carga por periodo y Centro de Trabajo, con el modelo alternativo y considerando un aumento del tiempo de ejecución de O1 y O5 de un 5% (h.e.).

Si tenemos en cuenta que las empresas suelen fabricar cientos (e incluso miles) de ítems (componentes elaborados internamente o productos finales), la posibilidad de que se produzcan variaciones en los tiempos de confección de pedido, desplazamientos, cola, preparación del Centro de Trabajo, ejecución,

espera o inspección, en los factores de aprovechamiento, de eficiencia o de utilización es bastante alta.



Ilustración 5.25. Pantalla con el Plan de Carga por periodo para el Centro de Trabajo 1, con el modelo propuesto y considerando un aumento del tiempo de ejecución de O1 y O5 de un 5%.

Otra de las ventajas de este modelo es el ahorro de tiempo que se consigue al simplificar los cálculos. Esto se hace patente, por ejemplo, si consideramos una empresa que maneje 200 ítems, siendo la mitad de ellos elaborados internamente con cinco operaciones, en cuyo caso se necesitarían 2.800 datos para un sólo lote emitido de cada ítem, para desarrollar la planificación CRP (5 datos por operación - tiempo de desplazamiento, cola, preparación, ejecución y espera- más el tiempo de confección, desplazamiento de materiales e inspección)⁵² o 1.100 datos, si utiliza el modelo propuesto (2 datos por operación - tiempo de carga del lote y entrada en el Centro de Trabajo- más el tiempo de finalización)⁵³. La reducción conseguida en el total de variables con el cambio de técnica es de un 60 % y además, si suponemos que fuera preciso una media de 5 horas por cada tiempo estimado mediante Medición del Trabajo o a través de la Teoría de Colas, se necesitarían 14.000 horas

⁵² 100 ítems elaborados x (5 operaciones/ítem x 5 datos/operación + 3 datos/ítem) = 2800 datos.

⁵³ 100 ítems elaborados x (5 operaciones/ítem x 2 datos/operación + 1 datos/ítem) = 1100 datos.

para realizar dichos estudios cada vez que se deseen actualizar los datos. El modelo propuesto sin embargo, calcula automáticamente los valores de las variables necesarias, reduciéndose ese último tiempo al mínimo, ya que tan solo es preciso que se vayan recogiendo los datos de las operaciones que se van realizando a los diferentes lotes que se van procesando.

5.6. CUMPLIMIENTO DE LA PLANIFICACIÓN ELABORADA MEDIANTE EL MODELO ALTERNATIVO PROPUESTO

En el apartado anterior se ha puesto de manifiesto, mediante un ejemplo, la importante reducción en el número de cálculos que podría obtenerse con la aplicación del modelo alternativo a CRP que hemos propuesto, permitiendo, además, una actualización continua de los Planes de Carga. Por tanto, de los dos objetivos que planteamos en el Apartado 5.1. del presente capítulo, nos queda por determinar si la fiabilidad de la Planificación de Capacidad conseguida con el modelo propuesto, puede mejorar o, al menos igualar, la obtenida mediante la aplicación de CRP. Con este propósito, estudiaremos las desviaciones que pueden producirse entre la realidad y la planificación plasmada en los Planes de Carga y Capacidad, comparándolas con las que se producen con la aplicación de la técnica CRP (estudiadas en el Capítulo 4).

Como premisa, eso sí, debemos establecer previamente qué condición ha de cumplirse para poder afirmar o refutar, que la probabilidad de cumplimiento de la Planificación de Capacidad desarrollada mediante el modelo propuesto, iguala o mejora la alcanzada por CRP. A este respecto, es obvio que los planes desarrollados por ambas técnicas (hecha la salvedad, del exceso de carga calculado por CRP, al considerar que en todas las operaciones de la ruta se procesa un número de unidades igual al lote emitido; ver Apartado 5.5.6.3.) tendrían una probabilidad de cumplimiento igual a la unidad, si todas las variables empleadas en sus mecánicas de cálculo fueran determinísticas, es decir, si la empresa actuara en un universo cierto. Pero la realidad es que todas son variables aleatorias, por lo que la calidad de las estimaciones de los valores medios de las mismas, será un factor fundamental para lograr en ambos casos, una alta probabilidad de cumplimiento de la planificación de la capacidad desarrollada.

No obstante, la realidad es que la probabilidad de que el valor real de cada una de esas variables sea igual al valor estimado, es algo que depende de cada caso concreto. No pretendemos además, valorar la dificultad y calidad de la estimación de cada una de las variables aleatorias empleadas por ambas técnicas, sino la del cumplimiento de los planes de capacidad que desarrollan. A este respecto, con el

propósito de comparar dicha probabilidad de cumplimiento, partiremos de la **hipótesis de que es igual la probabilidad de cumplimiento del valor estimado de cada una de las variables empleadas por CRP y por el modelo alternativo propuesto**; de lo contrario, fueran cuales fueran las bondades de cada una de las técnicas, si una emplea variables cuyos valores estimados difieren mucho de los reales, mientras que la otra emplea valores estimados que se ajustan mucho a los reales, es obvio que la calidad del plan obtenido siempre será mejor en el segundo caso, lo que no nos permitiría decir que esta última metodología es mejor que la primera, sino solamente que en la primera se han empleado valores peor estimados de las variables que forman parte de su mecánica de cálculo.

5.6.1. Las desviaciones del Plan de Carga

Como ya se estableció en el Apartado 4.2., las diferencias que pueden existir entre la planificación de la carga y la producida pueden deberse a dos causas:

- Las desviaciones en el valor calculado del tiempo de carga de los lotes en los diferentes Centros de Trabajo, con respecto al real.
- El traslado total o parcial del tiempo de carga, estando éste bien estimado, a un periodo distinto del planificado, como consecuencia de variaciones en el resto de los componentes del tiempo de suministro.

Por supuesto, al igual que ya comentamos en el Capítulo 4 para el caso de la técnica CRP, el hecho de que la planificación realizada no se cumpla de manera exacta, no siempre implicará el rechazo del Plan elaborado o de la técnica utilizada para la Planificación de Capacidad, ya que la empresa suele establecer unos márgenes de variación dentro de los cuales considerará que la planificación es realista. Es obvio que no puede pretenderse que, en un universo aleatorio y tan complejo como el de las empresas que trabajan en configuraciones por lotes, el Plan de Capacidad realizado se cumpla al cien por cien.

Una vez expuesto esto, pasaremos a estudiar la probabilidad de cumplimiento del Plan de Capacidad elaborado mediante el modelo propuesto, comparándola con la que podría obtenerse con el plan elaborado mediante CRP.

5.6.1.1. El valor de la carga asignada a un periodo

El primero de los criterios que se deben cumplir para considerar una Planificación de Capacidad como fiable, es que no existan diferencias entre el valor de la carga real y el planificado. Por lo tanto, es preciso determinar qué cantidad de carga debe asignarse a un periodo, para lo que es necesario averiguar si quedará alguna operación sin finalizar en el cubo de tiempo.

Cuando no quedan operaciones inconclusas al final de un periodo p y suponiendo que se realizan desde la operación n hasta la m , la carga originada en este periodo por un lote del ítem j , para el Centro de Trabajo k , se puede calcular, basándonos en la expresión (5.2), como:

$$\overline{C_{Qjpk}} = \sum_{i=n}^m \overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{E_{kp}} \times \overline{U_{kp}} \quad (5.23)$$

Donde:

E_{kp} = factor eficiencia del Centro de Trabajo k en el periodo p .

U_{kp} = factor utilización del Centro de Trabajo k en el periodo p .

En caso contrario, si la operación comienza y termina en periodos distintos, el cálculo de la carga generada por un lote, en un Centro de Trabajo k y en un periodo concreto p , suponiendo que queden inconclusas al principio y al final del periodo las operaciones $n-1$ y $m+1$, será:

$$\begin{aligned} \overline{C_{Qjpk}} = & f_{x_{n-1}/y_{n-1}} \times \overline{Tc_{Qn-1,jk}} \times \overline{E_{kp}} \times \overline{U_{kp}} + \sum_{i=n}^m \overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{E_{kp}} \times \overline{U_{kp}} + \\ & + f_{1/y_{m+1}} \times \overline{Tc_{Qm+1,jk}} \times \overline{E_{kp}} \times \overline{U_{kp}} \end{aligned} \quad (5.24)$$

Siendo $f_{x_{n-1}/y_{n-1}}$ la fracción de carga, asignada al periodo p , de la operación $n-1$, para el ítem j , que se realiza en el Centro de Trabajo k , reflejando x_{n-1} el número de ordinal del periodo en el que se reparte la carga de la operación sobre el total de y_{n-1} periodos. Así por ejemplo, $f_{2/300 \cdot 5.41}$ será la fracción de carga asignada al segundo de los tres periodos, entre los que se reparte la carga de un lote de 300 unidades de A al que se le realiza la operación O5 en el Centro de Trabajo 1. El valor de dicha fracción, es decir el multiplicador del tiempo de carga, variará de 0 a 1. Lógicamente, la suma de las fracciones consideradas en los distintos periodos, en los que se distribuye la carga de una operación, tiene que ser uno.

En términos generales, la probabilidad de cumplimiento de la carga generada por un lote del ítem j de tamaño Q_j , asignada a un periodo p en el que se realicen desde la operación $n-1$ hasta $m+1$ de su ruta, en un Centro de Trabajo k , quedará determinada como:

$$P(C_{Qjkp} = \overline{C_{Qjkp}}) = P(C_{Qjkp} = f_{x_{n-1}/y_{n-1}}^{Q_{n-1}jk} \times \overline{Tc_{Q_{n-1}jk}} \times \overline{E_{kp}} \times \overline{U_{kp}} + \sum_{i=n}^m \overline{Tc_{Qijk}} \times \overline{E_{kp}} \times \overline{U_{kp}} + f_{y_{m+1}}^{Q_{m+1}jk} \times \overline{Tc_{Q_{m+1}jk}} \times \overline{E_{kp}} \times \overline{U_{kp}}) \quad (5.25)$$

5.6.1.2. Asignación de la carga a un periodo

Como ya comentamos, la carga calculada para un periodo y Centro de Trabajo puede verse desplazada con respecto a la inicialmente planificada. Para calcular la fiabilidad del Plan de Carga, será preciso determinar qué margen de movimiento de la carga se considera que no originaría un incumplimiento de la Planificación de Capacidad.

En este sentido, para poder desarrollar la probabilidad de cumplimiento del plan desarrollado mediante el modelo propuesto y compararla con la determinada para CRP, utilizaremos algunos de los tiempos estimados para el desarrollo del Plan de Carga, además de unas variables teóricas, calculadas a partir de las utilizadas para la Planificación de Capacidad, que nos permitan representar el tiempo de suministro como un sumatorio de tiempos.

Para cumplir con nuestro objetivo de reducir el número de variables aleatorias del modelo, con objeto de obtener unos mayores niveles de cumplimiento de la Planificación de Capacidad, desagregaremos el tiempo de suministro (en horas reales) en tan sólo cuatro variables: el tiempo de entrada (entendido éste como el momento en que comienza el procesamiento, incluida la preparación en caso de que fuera necesaria) en la primera operación de la ruta (Ten_{Q1jk} , si consideramos que la primera operación es la 1), tiempo entre operaciones o intermedio ($Tint_{Qijk}$, calculado únicamente para comparar la probabilidad de cumplimiento), tiempo de carga (Tc_{Qijk}) y tiempo final (Tfi_{Qj} , utilizado sólo para el estudio de la fiabilidad). De esta manera, el tiempo de suministro medio para un lote del ítem j de tamaño Q_j , suponiendo que precisa de la ejecución de I operaciones que se realizan en M Centros de Trabajo, se calculará como sigue:

$$\overline{TS_{Qj}} = \sum_{k=1}^M \overline{Ten_{Q1jk}} + \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{k=1}^M \overline{Tint_{Qijk}} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tc_{Qijk}} + \overline{Tfi_{Qj}} \quad (5.26)$$

Cuando una operación no se ejecute en el Centro de Trabajo k , el valor del tiempo correspondiente será cero.

Analizando más detalladamente las variables que componen el tiempo de suministro, será preciso tener en cuenta que el tiempo de entrada en la primera operación de la ruta (Ten_{Q1jk}), es el que transcurre desde la emisión del pedido hasta que se inicia el procesamiento de dicha operación. Este tiempo incluiría, por tanto, el tiempo de confección del pedido, el tiempo de desplazamiento de materiales y el tiempo de cola en el primer Centro de Trabajo.

El tiempo intermedio o tiempo que transcurre entre operaciones, se ha notado como $Tint_{Qijk}$, indicando el intervalo existente desde que finaliza el procesamiento de la operación i hasta la entrada en el siguiente Centro de Trabajo de su ruta. Para su cálculo tomaremos los datos referentes a los momentos de salida, o fin de operación (Tfo_{Qijk}), y entrada (Ten_{Qijk}) de los Centros:

$$Tint_{Qijk} = Ten_{Q_{i+1}jk} - Tfo_{Qijk} \quad (5.27)$$

De este modo conseguimos aglutinar, dentro de una única variable, los tiempos de espera a la salida del Centro de Trabajo, el tiempo de inspección, el tiempo de desplazamiento y el tiempo de cola que se genera en el siguiente Centro de Trabajo de la ruta.

Otro componente del tiempo de suministro es el tiempo de carga (Tc_{Qijk}), cuya diferencia entre el que se utiliza en nuestro modelo y el aplicado en CRP está en su fórmula de cálculo. En concreto, y dadas las dificultades para una adecuada estimación del tiempo de preparación⁵⁴, en el modelo propuesto se ha utilizado el valor medio del tiempo de carga para el tamaño de lote, calculado a través de los datos históricos.

En último lugar, notaremos como Tfi_{Qj} al tiempo que transcurre una vez finalizada la última operación de la ruta y hasta que el lote quede localizado en su lugar de destino (almacén o Centro de Trabajo en el que se utilice como componente de otro ítem de nivel superior). Se calculará por diferencia entre el momento de finalización del proceso productivo (Tf_{Qj}) y la terminación de la última operación de la ruta (Tfo_{Qzjk} , suponiendo que la operación final sea z):

$$Tfi_{Qj} = Tf_{Qj} - Tfo_{Qzjk} \quad (5.28)$$

⁵⁴ Véase Apartado 3.5.4.2.

Dentro de esta última variable están incluidos los tiempos que se originan en la espera para el desplazamiento hasta el almacén, o el lugar donde será utilizado para la elaboración de un ítem más complejo y en la inspección pertinente.

El efecto de la simplificación realizada en el tiempo de suministro, con la agrupación de variables, puede apreciarse a través del ejemplo reflejado en la Figura 5.7. En éste, para el procesamiento de un lote de un ítem j , que recibe 3 operaciones, es necesaria la estimación de 7 variables aleatorias, en comparación con las 13 que se precisarían (suponiendo que sólo se originase tiempo de espera e inspección tras la última operación), para la Planificación de Capacidad mediante CRP.

$\overline{Tconf}_j$	$\overline{Tdm}_j$	$\overline{Tcola}_{1j1}$	$\overline{Tc}_{Q1j1}$	$\overline{Td}_{j1}$	$\overline{Tcola}_{2j2}$	$\overline{Tc}_{Q2j2}$	$\overline{Td}_{2j2}$	$\overline{Tcola}_{3j3}$	$\overline{Tc}_{Q3j1}$	$\overline{Tesp}_j$	$\overline{Tinsp}_j$	$\overline{Td}_{3j1}$
Periodo 1					Periodo 2				Periodo 3			
Tiempo de suministro con CRP												

$\overline{Tent}_{Q1j1}$	$\overline{Tc}_{Q1j1}$	$\overline{Tint}_{Q1j1}$	$\overline{Tc}_{Q2j2}$	$\overline{Tint}_{Q2j2}$	$\overline{Tc}_{Q3j1}$	$\overline{Tfi}_{Qj}$
Periodo 1		Periodo 2			Periodo 3	
Tiempo de suministro con el modelo propuesto						

Figura 5.7. Comparación de elementos considerados en el cálculo del tiempo de suministro mediante CRP y en el modelo propuesto.

Una vez definidos los componentes del tiempo de suministro considerados en el modelo alternativo propuesto, podemos determinar los márgenes de variación de la carga, dentro de los cuales puede variar la asignación planificada, sin que ello signifique para la empresa un incumplimiento del Plan de Carga elaborado.

Con objeto de desarrollar analíticamente la probabilidad de cumplimiento de la Planificación de Capacidad elaborada con el modelo propuesto, teniendo en cuenta que la empresa puede retrasar el comienzo de las operaciones, asumiendo tiempos ociosos, estableceremos como hipótesis que la carga sólo se adelantará en la realidad, en relación al momento planificado, si con ello no traslada su periodo de comienzo. Dicha hipótesis, además de obligada, es realista para el problema de la Planificación de la Capacidad a Corto Plazo al que se refiere nuestro trabajo. Téngase en cuenta, que el Plan de Carga a corto plazo elaborado con CRP, con el modelo propuesto o cualquier otra técnica, trabaja en periodos o cubos de tiempo (normalmente semanales), pero en ningún caso se distingue la carga por unidades

de tiempo inferiores a dichos cubos de tiempo (por ejemplo, para los diferentes días de una semana), por lo que sería imposible comprobar si en esas unidades menores de tiempo se produce o no, la carga planificada: simplemente porque no se ha planificado la carga para esas unidades de tiempo inferiores. Si, por ejemplo, el plan se elaborara para un horizonte de 26 semanas, la carga que se determina en el Plan, es la que se produciría en cada Centro de Trabajo en cada una de las semanas del horizonte, sin distinguir la que se daría por ejemplo, en el día 3 de la primera semana o en el cuarto. Ese nivel de detalle corresponde a la Gestión de Talleres (*Shop Floor Control*), dentro de la que se desarrolla la Programación de Operaciones y la Planificación de la Capacidad a muy corto plazo, que se elaboran para periodos de varios días divididos, incluso, en horas si fuera necesario. En el nivel a que corresponde la Planificación de Capacidad a que se refiere nuestro trabajo pues, no se distinguen periodos inferiores dentro de cada cubo de tiempo y, por tanto, tampoco se distingue si la carga asignada comenzó o comenzará, en el primer día, en el segundo o tercero de un cubo de tiempo: siempre que la carga caiga realmente dentro de la semana que abarca el cubo de tiempo en el que se planificó, el Plan de Carga será correcto. Como consecuencia, el hecho de que la carga real de un lote sea inferior a la planificada, no conllevará que las operaciones posteriores de su ruta comiencen en periodos previos a los planificados.

Esta premisa permite que sólo haya que considerar, para el cumplimiento del periodo de asignación, el intervalo de variación de la carga que no origine traslado hacia el periodo siguiente, no siendo necesario incluir ninguna restricción referente al adelantamiento, hacia el periodo de estudio, de carga asignada al cubo de tiempo posterior (ya que, según la hipótesis, no se asignará, como mínimo, hasta el momento planificado).

Siguiendo el ejemplo reflejado en la Figura 5.7., podemos definir los márgenes de desplazamiento de las cargas planificadas que no originen incumplimiento del Plan de Carga. Así para el primer periodo (cuya duración es T_p), el intervalo será:

$$Tent_{Q1j1} + Tc_{Q1j1} \leq T_p \quad (5.29)$$

Esta expresión refleja el hecho de que el momento de entrada en el Centro de Trabajo 1, para desarrollar la operación 1, y el tiempo de carga generado por ésta, pueden ser superiores a los valores estimados, siempre y cuando la suma de ellos sea menor o igual a la duración del periodo, no originándose de esta manera desplazamiento de la carga.

Para determinar el intervalo de variación de la carga que no provoque desplazamientos en los periodos intermedios, es preciso conocer el tiempo entre

operaciones que se origina al comienzo del periodo ($Tint_{Qijkp}$), para lo que llamaremos $Tint_{Qijl2}$ al producido tras la operación 1, en el Centro de Trabajo 1 y asignado al cubo de tiempo 2. En este sentido, el intervalo de variación permitido en el segundo periodo será:

$$Tint_{Q1j2} + Tc_{Q2j2} \leq Tp \quad (5.30)$$

Siguiendo el ejemplo, para el tercer y último periodo, el margen permitido para el desplazamiento de la carga queda determinado como:

$$Tint_{Q2j23} + Tc_{Q3j3} \leq Tp \quad (5.31)$$

Si se desea, no sólo el cumplimiento de las cargas planificadas, sino también el del periodo de entrega planificado, se deberá considerar, en vez de la expresión (5.31), la siguiente:

$$Tint_{Q2j23} + Tc_{Q3j3} + Tfi_{Qj} \leq Tp \quad (5.32)$$

Para generalizar los intervalos de movimiento de la carga es preciso tener en cuenta que la capacidad necesaria para el procesamiento de una operación a un lote, puede no ser asignada totalmente a un periodo del horizonte de planificación, como ocurre en el ejemplo de la Figura 5.7. Por el contrario, debido al resto de los elementos que componen el tiempo de suministro, puede verse repartida entre varios periodos; ello generará diferentes escenarios que afectarán al intervalo dentro del cual se pueden desplazar las cargas sin originar desviaciones con respecto a la planificación. En un cubo de tiempo concreto nos podemos encontrar varias situaciones posibles, con respecto al procesamiento de un lote de un determinado ítem:

1. Todas las operaciones que se realizan en un periodo se procesan totalmente en él.
2. Se origina carga fraccionada únicamente al final del periodo.
3. En un mismo cubo de tiempo se termina la ejecución de una operación comenzada en periodos anteriores y queda algún lote en proceso.
4. El periodo comienza con la finalización de una operación parcialmente ejecutada, no quedando carga fraccionada para periodos posteriores.
5. Todo el tiempo del periodo se destina al procesamiento parcial de una única operación.

Si consideramos que la Planificación de Capacidad, en los periodos anteriores al cubo de tiempo objeto de estudio, ha sido correcta, podemos desarrollar el intervalo de variación permitido para las situaciones descritas, que evite desplazamientos de la carga de un periodo hacia el siguiente.

En el **primero** de los casos, para un periodo p , si éste no es ni el primero ni el último que conforman el tiempo de suministro, en el que se realizan desde la operación n hasta la m , el intervalo de variación que debe cumplirse será:

$$\sum_{k=1}^M Tint_{Q_{n-1}jkp} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M Tc_{Qijk} + \sum_{i=n}^{m-1} \sum_{k=1}^M Tint_{Qijk} \leq Tp \quad (5.33)$$

En un **segundo** escenario, se origina carga fraccionada únicamente al final del periodo, por lo que, para evitar movimientos de la carga planificada y, suponiendo que se procesan desde la operación n a m completamente, realizándose una fracción $f_{\frac{1}{y_{m+1}} Q_{m+1}jk}$ de la operación $m+1$, es preciso que se cumpla:

$$\sum_{k=1}^M Tint_{Q_{n-1}jkp} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M Tint_{Qijk} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M Tc_{Qijk} + \sum_{k=1}^M (f_{\frac{1}{y_{m+1}} Q_{m+1}jk} \times Tc_{Q_{m+1}jk}) \leq Tp \quad (5.34)$$

En **tercer** lugar, podría ocurrir que, tanto al final como al comienzo del periodo, exista un corte en la ejecución de una operación, por ejemplo si se realiza desde la operación $n-1$, aunque parcialmente, hasta la $m+1$, quedándose esta última también sin terminar. Resultará necesario, para evitar traslados de carga, que se cumpla que:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^M (f_{\frac{x_{n-1}}{y_{n-1}} Q_{n-1}jk} \times Tc_{Q_{n-1}jk}) + \sum_{i=n-1}^m \sum_{k=1}^M Tint_{Qijk} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M Tc_{Qijk} + \\ & + \sum_{k=1}^M (f_{\frac{1}{y_{m+1}} Q_{m+1}jk} \times Tc_{Q_{m+1}jk}) \leq Tp \end{aligned} \quad (5.35)$$

Una **cuarta** situación se produce cuando en un periodo sólo existe una operación parcialmente realizada ($n-1$), que se termina al principio de éste, siendo procesadas totalmente el resto de operaciones (desde n a m). El margen de variación permitido, para que no se incumpla el Plan de Carga, suponiendo que en el periodo anterior no hubo desplazamientos de carga, está determinado por:

$$\sum_{k=1}^M (f_{\frac{x_{n-1}}{y_{n-1}} Q_{n-1}jk} \times Tc_{Q_{n-1}jk}) + \sum_{i=n-1}^{m-1} \sum_{k=1}^M Tint_{Qijk} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M Tc_{Qijk} \leq Tp \quad (5.36)$$

En un **quinto** y último lugar, cuando un periodo comienza con la continuación de la ejecución de una operación que no es terminada en él (operación $m+1$), debe cumplirse que:

$$\sum_{k=1}^M (f_{x_{m+1}/y_{m+1}}^{Q_{m+1,jk}} \times Tc_{Q_{m+1,jk}}) \leq Tp \quad (5.37)$$

5.6.1.3. Probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga para un lote

Para poder determinar la probabilidad de cumplimiento de la planificación realizada, es necesario definir, en primer lugar, cuándo considerará la empresa que una técnica es fiable. En este sentido, es preciso aclarar que el cumplimiento de la carga, en la práctica, puede ser tomado desde, al menos, tres puntos de vista. Así, podría considerarse que se cumple la planificación cuando:

- El valor de la carga planificada para un periodo y Centro de Trabajo coincide, dentro de unos márgenes, con la que se produzca realmente.
- No se origina sobrecarga en el Centro de Trabajo y periodo estudiados, es decir, la carga real no supera la capacidad disponible, pudiendo tener aquélla valores superiores o inferiores a los estimados.
- La carga real por Centro y periodo es menor o igual a la planificada; en este caso la empresa se podría plantear no adelantar el procesamiento de operaciones si con ello traslada su periodo de comienzo, realizándose el ajuste a través de tiempos ociosos.

Para el desarrollo de la probabilidad de cumplimiento teórica alcanzada por CRP y el modelo alternativo propuesto, comenzaremos considerando el primero de los casos, que es el más restrictivo. Utilizaremos, por tanto, un margen de variación (V) que permitirá que la probabilidad de cumplimiento no sea nula⁵⁵.

Independientemente del criterio considerado por el planificador para el cumplimiento, la carga asignada, a cada Centro de Trabajo, en cada periodo del

⁵⁵ Dado que la carga es una variable continua, la probabilidad de que tome un valor determinado es cero.

horizonte de planificación, depende del número de operaciones que se ejecutan en él. Estas operaciones pueden estar incluidas en las rutas de fabricación de diferentes lotes emitidos en distintos periodos anteriores.

Para conocer el riesgo de incumplimiento de un Plan de Carga, se estimarán las probabilidades de cumplimiento de la carga estimada por periodo en cada Centro de Trabajo ($\overline{C}_{kp}$), ya que supone el estudio más relevante para la Planificación de Capacidad a Corto Plazo. Sin embargo, no vamos a considerar únicamente el valor de esta carga, sino que se analizará cada uno de los sumandos que la componen, valorando el cumplimiento de la planificación elaborada para cada uno de los lotes incluidos en el Plan de Materiales. Dejamos a parte, por tanto, la carga originada por los lotes en proceso, si bien su incidencia restringiría aún más la fiabilidad de la planificación.

Según la expresión (4.35), del Capítulo 4, la probabilidad de cumplimiento de la planificación de la carga, para un horizonte de planificación HP , donde se procesen hasta L lotes (emitiéndose, como máximo, un lote en cada uno de los periodos del horizonte) de cada uno de los J ítems (cuyo tiempo de suministro abarque P_{ji} periodos), que elabora la empresa utilizando M Centros de Trabajo, se puede representar como:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Cumpla Plan de Carga}) &= \prod_{j=1}^J P(\text{Cumpla } PC_j) = \\
 &= \prod_{j=1}^J \prod_{l=1}^{HP} P(\text{Cumpla } PC_{j_l}) = \\
 &= \prod_{j=1}^J \prod_{l=1}^{HP} \left[P(\text{Cumpla } PC_{j_l}) \times \right. \\
 &\quad \left. \times \prod_{p=2}^{P_{j_l}} P(\text{Cumpla } PC_{j_l p} / \text{Cumpla } PC_{j_l h} \forall h / h < p) \right] = \\
 &= \prod_{j=1}^J \prod_{l=1}^{HP} \left\{ \left[\prod_{k=1}^M P(\text{Cumpla carga}_{Q_{l k 1}}) \right] \times \right. \\
 &\quad \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_l / \text{Cumplida carga}_{Q_{l k 1}} \forall k) \right\} \times \\
 &\quad \left\{ \prod_{p=2}^{P_{j_l}} \left[\prod_{k=1}^M P(\text{Cumpla carga}_{Q_{l k p}}) \right] \times \right. \\
 &\quad \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_p / \text{Cumplidas cargas}_{Q_{l k h}} \right. \\
 &\quad \left. \text{y periodo}_h \forall k \text{ y } \forall h / h < p) \right\}
 \end{aligned}$$

Para el ejemplo reflejado en la Figura 5.7., donde sólo se ha considerado la emisión de un lote en todo el horizonte de planificación, la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga se ha desarrollado a partir de la fórmula anterior, en la expresión (5.38). Para ello se han incluido los intervalos de variación calculados en la expresiones (5.29), (5.30) y (5.31), donde se ha sustituido Tc_{Qijk} por la carga en horas estándar asignada al periodo (C_{Qjkp}) dividida entre los factores eficiencia (E_{kp}) y utilización (U_{kp}) de cada Centro y periodo, según la expresión (5.23).

$$\begin{aligned}
 P(\text{Cumpla Plan de Carga modelo propuesto}) = & \\
 = & \left[P(C_{Q11} = \overline{C_{Q11}} \pm V) \times P(\overline{Tent_{Q1j1}} + \frac{\overline{C_{Q11}}}{\overline{E_{11}} \times \overline{U_{11}}} \leq Tp) \right] \times \\
 & \times \left[P(C_{Q22} = \overline{C_{Q22}} \pm V) \times P(\overline{Tint_{Q1j12}} + \frac{\overline{C_{Q22}}}{\overline{E_{22}} \times \overline{U_{22}}} \leq Tp) \right] \times \\
 & \times \left[P(C_{Q13} = \overline{C_{Q13}} \pm V) \times P(\overline{Tint_{Q2j23}} + \frac{\overline{C_{Q13}}}{\overline{E_{13}} \times \overline{U_{13}}} \leq Tp) \right]
 \end{aligned} \tag{5.38}$$

Con objeto de comparar la fiabilidad del modelo propuesto con la de CRP, desarrollaremos la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga elaborado por esta última técnica, en el ejemplo reflejado en la Figura 5.7. Para ello, hemos adaptado la expresión (4.37) según la hipótesis de no adelantamiento de las cargas de periodos posteriores:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Cumpla Plan de Carga CRP}) = & \left[P(C_{Q11} = \overline{C_{Q11}} \pm V) \times \right. \\
 & \times \left. P(\overline{Tconf_j} + \overline{Tdm_{Qj}} + \overline{Tcola_{1j1}} + \frac{\overline{C_{Q11}}}{\overline{E_{11}} \times \overline{U_{11}}} \leq Tp) \right] \times \\
 & \times \left[P(C_{Q22} = \overline{C_{Q22}} \pm V) \times P(\overline{Td_{Q1j12}} + \overline{Tcola_{2j22}} + \frac{\overline{C_{Q22}}}{\overline{E_{22}} \times \overline{U_{22}}} \leq Tp) \right] \times \\
 & \times \left[P(C_{Q13} = \overline{C_{Q13}} \pm V) \times P(\overline{Td_{Q2j23}} + \overline{Tcola_{3j13}} + \frac{\overline{C_{Q13}}}{\overline{E_{13}} \times \overline{U_{13}}} \leq Tp) \right]
 \end{aligned} \tag{5.39}$$

Cuando se produzcan tiempos de espera e inspección tras cada operación, la expresión anterior resultaría:

$$\begin{aligned}
P(\text{Cumpla Plan de Carga CRP}) = & \left[P(C_{Qj11} = \overline{C_{Qj11}} \pm V) \times \right. \\
& \times \left. P(\overline{Tconf_j} + \overline{Tdm_{Qj}} + \overline{Tcola_{1j1}} + \frac{\overline{C_{Qj11}}}{\overline{E_{11}} \times \overline{U_{11}}} \leq Tp) \right] \times \\
& \times \left[P(C_{Qj22} = \overline{C_{Qj22}} \pm V) \times P(\overline{Tesp_{Q1j12}} + \overline{Tinsp_{Q1j12}} + \right. \\
& \times \left. \overline{Td_{Q1j12}} + \overline{Tcola_{2j22}} + \frac{\overline{C_{Qj22}}}{\overline{E_{22}} \times \overline{U_{22}}} \leq Tp) \right] \times \\
& \times \left[P(C_{Qj13} = \overline{C_{Qj13}} \pm V) \times P(\overline{Tesp_{Q2j23}} + \overline{Tinsp_{Q2j23}} + \right. \\
& \times \left. \overline{Td_{Q2j23}} + \overline{Tcola_{3j13}} + \frac{\overline{C_{Qj13}}}{\overline{E_{13}} \times \overline{U_{13}}} \leq Tp) \right]
\end{aligned} \tag{5.40}$$

Comparando las expresiones (5.38) y (5.40) observamos que el número de variables a considerar se reduce casi a la mitad (pasando de 20 a 12) y aumenta la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga al disminuir la aleatoriedad de las variables, ya que en el modelo propuesto están más agregadas y se dispondría de valores más actualizados.

Si consideramos que el cumplimiento del Plan de Carga debería llevar implícita la finalización de los lotes en los periodos planificados, las expresiones (5.38) y (5.40) deberían sustituirse, según se ha indicado en la expresión (5.32), por las siguientes:

$$\begin{aligned}
P(\text{Cumpla Plan de Carga modelo propuesto}) = & \\
= & \left[P(C_{Qj11} = \overline{C_{Qj11}} \pm V) \times P(\overline{Tent_{Q1j1}} + \frac{\overline{C_{Qj11}}}{\overline{E_{11}} \times \overline{U_{11}}} \leq Tp) \right] \times \\
& \times \left[P(C_{Qj22} = \overline{C_{Qj22}} \pm V) \times P(\overline{Tint_{Q1j12}} + \frac{\overline{C_{Qj22}}}{\overline{E_{22}} \times \overline{U_{22}}} \leq Tp) \right] \times \\
& \times \left[P(C_{Qj13} = \overline{C_{Qj13}} \pm V) \times P(\overline{Tint_{Q2j23}} + \frac{\overline{C_{Qj13}}}{\overline{E_{13}} \times \overline{U_{13}}} + \overline{Tfi_{Qj}} \leq Tp) \right]
\end{aligned} \tag{5.41}$$

$$\begin{aligned}
P(\text{Cumpla Plan de Carga CRP}) = & \left[P(C_{Qj11} = \overline{C_{Qj11}} \pm V) \times \right. \\
& \times \left. P(\overline{Tconf_j} + \overline{Tdm_{Qj}} + \overline{Tcola_{1j1}} + \frac{\overline{C_{Qj11}}}{E_{11} \times U_{11}} \leq Tp) \right] \times \\
& \times \left[P(C_{Qj22} = \overline{C_{Qj22}} \pm V) \times P(\overline{Tesp_{Q1j12}} + \overline{Tinsp_{Q1j12}} + \right. \\
& \times \left. \overline{Td_{Q1j12}} + \overline{Tcola_{2j22}} + \frac{\overline{C_{Qj22}}}{E_{22} \times U_{22}} \leq Tp) \right] \times \\
& \times \left[P(C_{Qj13} = \overline{C_{Qj13}} \pm V) \times P(\overline{Tesp_{Q2j23}} + \overline{Tinsp_{Q2j23}} + \overline{Td_{Q2j23}} + \right. \\
& \times \left. \overline{Tcola_{3j13}} + \frac{\overline{C_{Qj13}}}{E_{13} \times U_{13}} + \overline{Tesp_j} + \overline{Tinsp_{Qj}} + \overline{Td_{Q3j1}} \leq Tp) \right]
\end{aligned} \tag{5.42}$$

En las expresiones (5.41) y (5.42) se observa que, para el ejemplo seguido, es preciso considerar la aleatoriedad de 23 variables si se utiliza CRP y tan sólo 13 cuando se aplica el modelo propuesto. Para casos más complejos (con más operaciones por periodo, mayor número de lotes emitidos, etc.), el número de variables aleatorias aumenta considerablemente, por lo que la simplificación obtenida, en términos absolutos, por la utilización del modelo propuesto en este trabajo, sería superior.

Las expresiones anteriores corresponden a la consideración, como determinante para el cumplimiento de la planificación, de que la carga estimada debe ser cercana a la real, pero el criterio tomado por la empresa podría ser otro. Así, en el caso de que se tomara la segunda de las opciones planteadas al inicio de este apartado, en el que se permitirían variaciones en el valor de la carga siempre y cuando ésta sea menor que la capacidad disponible, la probabilidad de cumplimiento aumentaría. Según las condiciones consideradas en la expresión (5.41)⁵⁶ la fiabilidad alcanzada por el modelo propuesto se podría representar como se indica en la expresión (5.43), donde $\overline{CD_{kp}}$ indica la capacidad disponible en el Centro de Trabajo k y el periodo p .

En último lugar, si la empresa decidiese que el mejor criterio para el cumplimiento del Plan de Carga es considerar que la carga real debe ser igual o inferior a la planificada, la expresión (5.41), se sustituiría por la (5.44).

⁵⁶ Cumplimiento del Plan de Carga y de la finalización del lote emitido representado en la Figura 5.7.

$$\begin{aligned}
& P(\text{Cumpla Plan de Carga modelo propuesto}) = \\
& = \left[P(C_{Qj11} \leq \overline{CD_{11}}) \times P(\overline{Tent_{Q1j1}} + \frac{\overline{C_{Qj11}}}{\overline{E_{11}} \times \overline{U_{11}}} \leq Tp) \right] \times \\
& \times \left[P(C_{Qj22} \leq \overline{CD_{22}}) \times P(\overline{Tint_{Q1j12}} + \frac{\overline{C_{Qj22}}}{\overline{E_{22}} \times \overline{U_{22}}} \leq Tp) \right] \times \\
& \times \left[P(C_{Qj13} \leq \overline{CD_{13}}) \times P(\overline{Tint_{Q2j23}} + \frac{\overline{C_{Qj13}}}{\overline{E_{13}} \times \overline{U_{13}}} + \overline{Tfi_{Qj}} \leq Tp) \right]
\end{aligned} \tag{5.43}$$

$$\begin{aligned}
& P(\text{Cumpla Plan de Carga modelo propuesto}) = \\
& = \left[P(C_{Qj11} \leq \overline{C_{Qj11}}) \times P(\overline{Tent_{Q1j1}} + \frac{\overline{C_{Qj11}}}{\overline{E_{11}} \times \overline{U_{11}}} \leq Tp) \right] \times \\
& \times \left[P(C_{Qj22} \leq \overline{C_{Qj22}}) \times P(\overline{Tint_{Q1j12}} + \frac{\overline{C_{Qj22}}}{\overline{E_{22}} \times \overline{U_{22}}} \leq Tp) \right] \times \\
& \times \left[P(C_{Qj13} \leq \overline{C_{Qj13}}) \times P(\overline{Tint_{Q2j23}} + \frac{\overline{C_{Qj13}}}{\overline{E_{13}} \times \overline{U_{13}}} + \overline{Tfi_{Qj}} \leq Tp) \right]
\end{aligned} \tag{5.44}$$

5.6.2. Las desviaciones del Plan de Capacidad

La capacidad disponible es estimada a partir de los factores de eficiencia y utilización [véase expresión (5.13)], los cuales, al ser variables aleatorias, pueden generar desviaciones en las estimaciones realizadas. Por este motivo resulta interesante calcular la probabilidad de cumplimiento de la capacidad disponible planificada por periodo y Centro de Trabajo ($\overline{CD_{kp}}$).

Dado que las diferencias entre la capacidad disponible estimada y la real, indican variaciones en los factores eficiencia y utilización, la probabilidad de que se cumpla la capacidad disponible y, con ello, el Plan de Capacidad, será, basándonos en la expresión (4.41), la siguiente:

$$\begin{aligned}
P(\text{Cumpla Plan Capacidad}) &= P(\text{Cumpla Capacidad Disponible}) = \\
&= \bigcap_{k=1}^M \bigcap_{p=1}^{HP} P(CD_{kp} = \overline{CD_{kp}} \pm V) = \bigcap_{k=1}^M \bigcap_{p=1}^{HP} P(E_{kp} \times U_{kp} = \overline{E_{kp}} \times \overline{U_{kp}} \pm V) = \\
&= \prod_{k=1}^M \prod_{p=1}^{HP} P(E_{kp} \times U_{kp} = \overline{E_{kp}} \times \overline{U_{kp}} \pm V)
\end{aligned} \tag{5.45}$$

Donde:

E_{kp} = factor eficiencia del Centro de Trabajo k en el periodo p .

U_{kp} = factor utilización del Centro de Trabajo k en el periodo p .

V = margen de variación permitido para la consideración de cumplimiento de la capacidad disponible. Este parámetro se ha incluido en la expresión para evitar el valor nulo de la probabilidad.

5.6.3. Probabilidad de cumplimiento de la planificación elaborada

Basándonos en la expresión (4.42) y adaptándola según la fórmula (5.45), la probabilidad de cumplimiento conjunta de los Planes de Carga y Capacidad elaborados con la técnica de Planificación de Capacidad a corto plazo, propuesta en este capítulo, se podría calcular como se indica en la expresión (5.46), donde p indica los periodos, j refleja los distintos ítems, l es indicador de los lotes emitidos a lo largo del horizonte de planificación y k representa las diferentes Centros de Trabajo que tiene la empresa.

Con esta expresión se está considerando, como requisito para el cumplimiento de la Planificación de Capacidad elaborada, que se cumplan por separado las estimaciones de carga de los distintos lotes que componen el Plan de Materiales. De esta manera se evita la coincidencia casual de la planificación, originada por el efecto de la suma de las cargas de los distintos lotes emitidos de los ítems.

Para comparar las probabilidades de cumplimiento del plan elaborado mediante CRP, con las del plan desarrollado con el modelo propuesto, utilizaremos uno de los ejemplos referidos en el Capítulo 4; en concreto, el indicado en la Figura 4.3., cuyos datos están en las Tablas 4.1., 4.2. y 4.3. (recopilados en la Figura 5.8.).

$$\begin{aligned}
& P(\text{Cumpla planificación modelo propuesto}) = \\
& = P(\text{Cumpla Plan Capacidad} \cap \text{Cumpla Plan Carga}) = \\
& = P(\text{Cumpla Plan Capacidad}) \times \\
& \times P(\text{Cumpla Plan Carga} / \text{Cumpla Plan Capacidad}) = \\
& = \prod_{k=1}^M \prod_{p=1}^{HP} P(E_{kp} \times U_{kp} = \overline{E_k} \times \overline{U_k} \pm V) \times \\
& \times \prod_{j=1}^J \prod_{l=1}^{HP} \left[P(\text{Cumpla } PC_{j1}) \times \right. \\
& \left. \times \prod_{p=2}^{P_{Qj}} P(\text{Cumpla } PC_{j1p} / \text{Cumpla } PC_{j1h} \forall h / h < p) \right] = \\
& = \prod_{k=1}^M \prod_{p=1}^{HP} P(E_{kp} \times U_{kp} = \overline{E_k} \times \overline{U_k} \pm V) \times \\
& \times \prod_{j=1}^J \prod_{l=1}^{HP} \left\{ \left[\prod_{k=1}^M P(\text{Cumpla } carga_{Qj,k1}) \right] \times \right. \\
& \left. \times P(\text{Cumpla periodo asignado}_1 / \text{Cumplida } carga_{Qj,k1} \forall k) \right\} \times \\
& \left\{ \left[\prod_{k=1}^M P(\text{Cumpla } carga_{Qj,kp}) \right] \times \right. \\
& \left. \times \prod_{p=2}^{P_{Qj}} \left\{ P(\text{Cumpla periodo asignado}_p / \text{Cumplidas } cargas_{Qj,kh} \right. \right. \\
& \left. \left. y periodo_h \forall k y \forall h / h < p) \right\} \right\} \quad (5.46)
\end{aligned}$$

Periodo	1	2	3	4
Lanzamiento Pedidos Planif. A	200		300	
Lanzamiento Pedidos Planif. B		100		

Tabla 4.1. Ejemplo de Plan de Materiales.

Periodo	1	2	3	4
Centro de Trabajo 1	Carga 200A	10	20	40
	Carga 300A			10
	Carga 100B			45
	Total Carga CT1	10	20	95
Centro de Trabajo 2	Carga 200A		35	
	Carga 300A			
	Carga 100B		20	25
	Total Carga CT2		55	25

Tabla 4.2. Ejemplo de Plan de Carga (valores en horas estándar).

Periodo	1	2	3	4
Centro de Trabajo 1	0,7	0,64	0,57	0,8
Centro de Trabajo 2	0,64	0,6	0,75	0,86

Tabla 4.3. Ejemplo de valores de E_k y U_k por periodos y Centros de Trabajo.

Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4
200 A	10 20	35	40
300 A			10
100 B		20 25	45

Figura 4.3. Ejemplo de planificación mediante *forward scheduling*.

Figura 5.8. Datos del ejemplo para el desarrollo de la Planificación de Capacidad.

Si aplicamos CRP, basándonos en la expresión (4.44) y considerando la hipótesis de que no se adelantará el comienzo de las operaciones planificadas, la probabilidad de cumplimiento será:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Cumpla planificación CRP}) = & \\
 = & P(E_{11} \times U_{11} = 0,7 \pm V) \times P(E_{12} \times U_{12} = 0,64 \pm V) \times \\
 & \times P(E_{13} \times U_{13} = 0,57 \pm V) \times P(E_{14} \times U_{14} = 0,8 \pm V) \times \\
 & \times P(E_{21} \times U_{21} = 0,64 \pm V) \times P(E_{22} \times U_{22} = 0,6 \pm V) \times \\
 & \times P(E_{23} \times U_{23} = 0,75 \pm V) \times P(E_{24} \times U_{24} = 0,86 \pm V) \times \\
 & \times \left\{ \left[P(C_{200A_12} = 10 \pm V) \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times P(Tconf_A + Tdm_{200A_1} + Tcola_{1A1} \leq 104,375 \pm V) \right] \times \right. \\
 & \times \left\{ \left[P(C_{200A_13} = 20 \pm V) \times P(C_{200A_123} = 35 \pm V) \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times P(Td_{200'1A_1} + Tcola_{2A2} \leq 38,245) \right] \times \right. \\
 & \left. \left. \times \left[P(C_{200A_14} = 40 \pm V) \times P(Td_{200'2A_124} + Tcola_{3A1} \leq 70) \right] \right] \right\} \times \\
 & \times \left\{ P(C_{300A_314} = 10 \pm V) \times \right. \\
 & \left. \times P(Tconf_A + Tdm_{300A_3} + Tcola_{1A1} \leq 107,5 \pm V) \right\} \times \\
 & \times \left\{ \left[P(C_{100B_223} = 20 \pm V) \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times P(Tconf_B + Tdm_{100B_2} + Tcola_{4B2} \leq 93,333 \pm V) \right] \times \right. \\
 & \left. \times \left\{ \left[P(C_{100B_224} = 25 \pm V) \times P(C_{100B_214} \leq 45 \pm V) \times \right] \right. \right. \\
 & \left. \left. \times P(Td_{100'4B_22} + Tcola_{5B1} \leq 34,681 \pm V) \right] \right\} \quad (5.47)
 \end{aligned}$$

Recordemos que C_{200A_12} indica la capacidad necesaria para el procesamiento del lote de 200 unidades del ítem A emitido en el periodo 1 y que genera carga en el Centro de Trabajo 1 y el periodo 2. Por otro lado, $Td_{100'4B_22}$ refleja el tiempo de desplazamiento, después de la operación 4, de un lote de 100 unidades del ítem B, emitido en el periodo 2, y que se produce en el segundo periodo.

Siguiendo con la comparación de las técnicas, la aplicación del modelo de Planificación de Capacidad propuesto, tendría como probabilidad de cumplimiento la indicada en la expresión (5.48).

$$\begin{aligned}
& P(\text{Cumpla planificación modelo propuesto}) = \\
& = P(E_{11} \times U_{11} = 0,7 \pm V) \times P(E_{12} \times U_{12} = 0,64 \pm V) \times \\
& \times P(E_{13} \times U_{13} = 0,57 \pm V) \times P(E_{14} \times U_{14} = 0,8 \pm V) \times \\
& \times P(E_{21} \times U_{21} = 0,64 \pm V) \times P(E_{22} \times U_{22} = 0,6 \pm V) \times \\
& \times P(E_{23} \times U_{23} = 0,75 \pm V) \times P(E_{24} \times U_{24} = 0,86 \pm V) \times \\
& \times \left\{ \left[P(C_{200A_1,12} = 10 \pm V) \times P(Tcom_{200A_1} \leq 104,375 \pm V) \right] \times \right. \\
& \times \left\{ \left[P(C_{200A_1,13} = 20 \pm V) \times P(C_{200A_1,23} = 35 \pm V) \times \right. \right. \\
& \times \left. \left. P(Tint_{200'1A_1} \leq 38,245) \right] \times \right. \\
& \times \left. \left[P(C_{200A_1,14} = 40 \pm V) \times P(Tint_{200'2A_1,24} \leq 70) \right] \right\} \times \\
& \times \left\{ P(C_{300A_3,14} = 10 \pm V) \times P(Tcom_{300A_3} \leq 107,5 \pm V) \right\} \times \\
& \times \left\{ \left[P(C_{100B_2,23} = 20 \pm V) \times P(Tcom_{100B_2} \leq 93,333 \pm V) \right] \times \right. \\
& \times \left\{ \left[P(C_{100B_2,24} = 25 \pm V) \times P(C_{100B_2,14} \leq 45 \pm V) \times \right. \right. \\
& \times \left. \left. P(Tint_{100'4B_2,2} \leq 34,681 \pm V) \right] \right\} \left. \right\} \quad (5.48)
\end{aligned}$$

Analizando las dos últimas expresiones, observamos que la aleatoriedad de la probabilidad de cumplimiento de la planificación realizada por el modelo propuesto, frente a la alcanzada por CRP, se reduce al disminuir, de 39 a 30, el número de variables aleatorias necesarias para su cálculo.

Si tenemos en cuenta la hipótesis que enunciamos al principio del Apartado 5.6., de que **es igual la probabilidad de cumplimiento del valor estimado de cada una de las variables empleadas por CRP y por el modelo alternativo propuesto**, dado que todas las probabilidades de las expresiones (5.46) actúan como multiplicandos, es obvio que se dará una mayor probabilidad de cumplimiento del Plan de Capacidad en aquella en la que se utilice un menor número de variables aleatorias. Ello implicaría que, bajo esta hipótesis, podemos afirmar que la planificación desarrollada mediante el modelo propuesto, deberá ser más eficiente (o lo que es igual, debe tener mayor probabilidad de cumplimiento), que la elaborada por CRP, al emplear nueve variables aleatorias menos. La eficiencia será mayor si, como ya hemos establecido en los apartados anteriores del presente capítulo, tenemos en cuenta que:

- CRP calcula un exceso de carga, al considerar que en todas las operaciones de la ruta se procesa un número de unidades igual al lote emitido; ver Apartados 5.2.1. y 5.5.6.3.

- El modelo propuesto, a través del software desarrollado, recalcula automática y continuamente, las diferentes variables aleatorias empleadas para el cálculo del Plan de Capacidad, a medida que se van introduciendo las fechas de entrada y salida en los centros de trabajo de los lotes que se van procesando, por lo que las estimaciones de dichas variables se mantienen continuamente actualizadas (ver Apartado 5.2.). Por el contrario, el software CRP no actualiza los valores de sus variables automática y constantemente, sino que sus valores han de ser calculados tras nuevos estudios, e introducidos por el planificador en el sistema, lo que puede generar unas variaciones más que proporcionales en la Planificación de Capacidad, reduciéndose la utilidad del Plan de Carga elaborado.
- Dichas variables son estimadas por el modelo propuesto a través de la población, lo que evita los errores inherentes al muestreo necesario para estimar algunas de las variables que emplea CRP (tiempos de ejecución, preparación, desplazamiento, etc.; ver Apartados 5.2. y 5.5.3.), así como los que se derivan de las hipótesis simplificadoras de la Teoría de Colas que también ha de emplear para la estimación de otras variables (tiempo de cola o de espera; ver Apartados 3.4., 5.5.2.6. y 5.5.2.7.).
- Se evitan muchos errores humanos propios de la toma de datos, tanto en los tiempos anotados como en los ritmos de trabajo considerados por los analistas (afectados por la subjetividad), al tomar las mediciones para las muestras a partir de las cuales se han de estimar las variables en CRP (ver Apartados 3.3. y 5.5.2.). Con el modelo propuesto no es necesario tomar tantas muestras. Los tiempos de entrada y salida de los Centros de Trabajo que son necesarios, son tomados en éstos por los mismos operarios, de manera que automatizando el proceso mediante lectores de códigos de barras, la introducción de datos erróneos se reduciría muchísimo; ver Apartado 5.2.).
- El software elaborado proporciona herramientas para poner de manifiesto la existencia de desviaciones concretas o tendencias inusuales, de los valores introducidos en la base de datos y de los calculados para las variables a estimar, lo que ayuda a detectar anomalías o el uso de valores erróneos de dichas variables en los cálculos (ver Apartado 5.4.2.2.).

Además, hay que señalar que la simplificación obtenida por el uso del modelo propuesto será mayor en aquellos procesos productivos en los que se

produzcan, además de los tiempos de desplazamiento y cola, tiempos de espera e inspección, ya que la probabilidad de cumplimiento con CRP quedará como se indica en la expresión (5.49).

$$\begin{aligned}
 &P(\text{Cumpla planificación CRP}) = \\
 &= P(E_{11} \times U_{11} = 0,7 \pm V) \times P(E_{12} \times U_{12} = 0,64 \pm V) \times \\
 &\times P(E_{13} \times U_{13} = 0,57 \pm V) \times P(E_{14} \times U_{14} = 0,8 \pm V) \times \\
 &\times P(E_{21} \times U_{21} = 0,64 \pm V) \times P(E_{22} \times U_{22} = 0,6 \pm V) \times \\
 &\times P(E_{23} \times U_{23} = 0,75 \pm V) \times P(E_{24} \times U_{24} = 0,86 \pm V) \times \\
 &\times \left\{ \left[P(C_{200A_12} = 10 \pm V) \times \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \times P(Tconf_A + Tdm_{200A_1} + Tcola_{1A1} \leq 104,375 \pm V) \right] \times \right. \\
 &\times \left\{ \left[P(C_{200A_13} = 20 \pm V) \times P(C_{200A_123} = 35 \pm V) \times \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \times P(Tesp_{1A1} + Tinsp_{200'1A1} + Td_{200'1A1} + Tcola_{2A2} \leq 38,245) \right] \times \right\} \times \\
 &\times \left\{ \left[P(C_{200A_14} = 40 \pm V) \times \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \times P(Tesp_{2A_124} + Tinsp_{200'2A_124} + Td_{200'2A_124} + Tcola_{3A1} \leq 70) \right] \right\} \\
 &\times \left\{ P(C_{300A_314} = 10 \pm V) \times \right. \\
 &\quad \left. \times P(Tconf_A + Tdm_{300A_3} + Tcola_{1A1} \leq 107,5 \pm V) \right\} \times \\
 &\times \left\{ \left[P(C_{100B_223} = 20 \pm V) \times \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \times P(Tconf_B + Tdm_{100B_2} + Tcola_{4B2} \leq 93,333 \pm V) \right] \times \right. \\
 &\times \left\{ \left[P(C_{100B_224} = 25 \pm V) \times P(C_{100B_214} \leq 45 \pm V) \times \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \times P(Tesp_{4B_22} + Tinsp_{100'4B_22} + Td_{100'4B_22} + Tcola_{5B1} \leq 34,681 \pm V) \right] \right\} \quad (5.49)
 \end{aligned}$$

Comparando esa última expresión con la (5.48), podemos observar que el número de variables que inciden sobre el cumplimiento de la Planificación de Capacidad obtenida con el modelo propuesto es sumamente inferior, pasando de 44 a 22 variables aleatorias, en un ejemplo en el que tan sólo se han considerado cuatro periodos de planificación y dos ítems. En la realidad, sin embargo, las empresas trabajan con horizontes de planificación y volumen de artículos fabricados bastante superiores. Todo ello nos haría reafirmarnos aún más, en que, bajo la hipótesis realizada, la planificación desarrollada mediante el modelo propuesto, deberá tener mayor probabilidad de cumplimiento, que la elaborada por CRP, al emplear, en este caso, veintidós variables aleatorias menos.

Dada la importancia determinante que tiene el número de variables aleatorias empleadas en la calidad del plan obtenido, se vuelve crucial estudiar

cómo aumenta o disminuye el número de variables que influyen en la probabilidad de cumplimiento del Plan de Capacidad desarrollado. Analizando las expresiones anteriores, podemos deducir que, dicho número de variables aumentará con:

- Los Centros de Trabajo de que disponga la empresa, que incidirán sobre el número de factores de eficiencia y utilización a emplear.
- Los ítems que elabora la empresa, ya sean componentes o productos finales.
- El número de lotes que se emiten de cada ítem en el horizonte de planificación.
- El número de operaciones necesarias para elaborar cada uno de los ítems que fabrica la empresa.
- Los diferentes tiempos que componen el tiempo de suministro, dependientes de la configuración productiva (que afecta a la existencia de esperas en el proceso) y de las políticas de la empresa con respecto a las inspecciones de calidad.
- El tamaño del horizonte de planificación, es decir, el número de periodos para el que se desea realizar el Plan de Carga, lo que incidirá sobre los factores eficiencia y utilización y el número de lotes a considerar.

Para ilustrar el efecto de la reducción de variables conseguido con el modelo propuesto, en comparación con CRP, y con ello abundar en la afirmación realizada de que, bajo la hipótesis de partida descrita, la planificación desarrollada mediante el modelo propuesto deberá tener mayor probabilidad de cumplimiento que la elaborada por CRP, consideraremos distintos casos en función del proceso productivo de la empresa. Analizaremos cuatro posibles situaciones, dentro de las configuraciones por lotes, cuyas características son las siguientes:

- A) Los lotes pasan automáticamente desde un Centro de Trabajo al posterior en su ruta, dedicándose cada uno de los Centros a la ejecución de una única operación, y no realizándose ninguna inspección de los ítems elaborados.
- B) Los Centros de Trabajo realizan varias operaciones y se originan colas de espera en la entrada de éstos. Se inspeccionan los ítems una vez finalizados.

- C) Se originan esperas tanto a la entrada como a la salida de los Centros, donde se realizan varias operaciones diferentes. No se inspeccionan los artículos.
- D) Los lotes deben esperar para entrar en el Centro de Trabajo y para su traslado. Los Centros realizan distintas operaciones y, tras la ejecución de éstas, se inspeccionan los lotes.

En la Tabla 5.53. se reflejan las variables de tiempo necesarias para usar CRP en cada tipo de empresa utilizada como ejemplo (casos A, B, C, y D). Así, se puede observar que el caso más complejo se produce en las compañías tipo D, donde se precisa conocer los valores de 8 variables (tiempo de confección, desplazamiento de materiales, cola, preparación, ejecución, espera, inspección y desplazamiento de lotes), 6 de ellas relacionadas con el número de operaciones y 2 con el total de los lotes emitidos.

VARIABLES DE TIEMPO	A	B	C	D
Tiempo de confección	x	x	x	x
Tiempo de desplazamiento de materiales	x	x	x	x
Tiempo de cola		x	x	x
Tiempo de preparación		x	x	x
Tiempo de ejecución	x	x	x	x
Tiempo de espera			x	x
Tiempo de inspección		x		x
Tiempo de desplazamiento	x	x	x	x
Variables de tiempo por operación	2	4	5	6
Variables de tiempo por lote	2	3	2	2

Tabla 5.53. Variables de tiempo necesarias para cada tipo de empresa utilizada como ejemplo, en el caso de aplicar CRP.

Fuente: elaboración propia.

Para determinar el total de variables aleatorias que se precisan para elaborar la Planificación de Capacidad, será necesario sumar a las variables de tiempo incluidas en la Tabla 5.53., los factores de eficiencia y utilización por periodo y Centro de Trabajo. A partir de aquí, se puede calcular el número de variables aleatorias necesarias para la Planificación de Capacidad con CRP en cada configuración productiva según la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 \text{Total Variables Aleatorias} = & \text{Lotes} / \text{ítem} \times \text{Ítems} \times \\
 & \times \left[(\text{Operaciones} / \text{lote e ítem} \times \text{Variables} / \text{operación}) + \text{Variables} / \text{lote} \right] + \quad (5.50) \\
 & + (\text{Centros de Trabajo} \times \text{Periodos} \times 2 \text{ factores aleatorios})
 \end{aligned}$$

Aplicando esta función se puede observar la mejora conseguida, en relación al número de variables, por la aplicación del modelo propuesto. Para ilustrar la diferencia entre el número de datos necesarios para la elaboración de la Planificación de Capacidad entre las distintas empresas tipo, utilizaremos un pequeño ejemplo.

Se trata de una compañía que realiza la Planificación de Capacidad a corto plazo para 8 periodos, elabora 100 ítems (entre componentes y productos finales) a través de 5 operaciones cada uno, que se ejecutan en 10 Centros de Trabajo. Considerando que emite 4 lotes de cada ítem durante el horizonte de planificación, las variables aleatorias necesarias para utilizar CRP serán 4.960, 9.360, 10.960 ó 12.960, según se trate del caso A, B, C o D⁵⁷, respectivamente, aplicando la expresión (5.50) y de acuerdo a la información indicada en la Tabla 5.53.

Por otro lado, las variables necesarias para la aplicación del modelo propuesto no varían en función de las características del proceso productivo; es decir, coincidirán para los casos A, B, C y D. Las variables que precisa el modelo propuesto son, en cualquier caso, el tiempo de entrada de cada operación, el tiempo de carga (ambos en función del número de operaciones) y el de finalización (único por lote). Siguiendo el mismo ejemplo considerado para CRP, de 8 periodos, 100 ítems elaborados, 4 lotes de cada ítem y 5 operaciones por ítem en 10 Centros de Trabajo, tan sólo serían necesarias 4.560 variables⁵⁸. Esto supone que la reducción de datos requeridos al utilizar el modelo propuesto en sustitución a CRP puede llegar al 65 %, obteniéndose las mayores diferencias cuanto más flexibles y menos automatizados sean los procesos productivos (características propias de las configuraciones por taller). Incluso en configuraciones productivas en línea, representadas por el caso A, también se obtendrían reducciones de las variables,

⁵⁷ Para cada caso utilizado como ejemplo el cálculo realizado ha sido el siguiente:

- A) $4 \text{ lotes/ítem} \times 100 \text{ ítems elaborados} \times [(5 \text{ operaciones/ítem} \times 2 \text{ variables/operación}) + 2 \text{ variables/ítem}] + [10 \text{ Centros de Trabajo} \times 8 \text{ periodos} \times 2 \text{ factores aleatorios (E y U)}] = 4.960 \text{ variables.}$
- B) $4 \text{ lotes/ítem} \times 100 \text{ ítems elaborados} \times [(5 \text{ operaciones/ítem} \times 4 \text{ variables/operación}) + 3 \text{ variables/ítem}] + [10 \text{ Centros de Trabajo} \times 8 \text{ periodos} \times 2 \text{ factores aleatorios (E y U)}] = 9.360 \text{ variables.}$
- C) $4 \text{ lotes/ítem} \times 100 \text{ ítems elaborados} \times [(5 \text{ operaciones/ítem} \times 5 \text{ variables/operación}) + 2 \text{ variables/ítem}] + [10 \text{ Centros de Trabajo} \times 8 \text{ periodos} \times 2 \text{ factores aleatorios (E y U)}] = 10.960 \text{ variables.}$
- D) $4 \text{ lotes/ítem} \times 100 \text{ ítems elaborados} \times [(5 \text{ operaciones/ítem} \times 6 \text{ variables/operación}) + 2 \text{ variables/ítem}] + [10 \text{ Centros de Trabajo} \times 8 \text{ periodos} \times 2 \text{ factores aleatorios (E y U)}] = 12.960 \text{ variables.}$

⁵⁸ $4 \text{ lotes/ítem} \times 100 \text{ ítems elaborados} \times [(5 \text{ operaciones/ítem} \times 2 \text{ variables/operación}) + 1 \text{ variables/ítem}] + [10 \text{ Centros de Trabajo} \times 8 \text{ periodos} \times 2 \text{ factores aleatorios (E y U)}] = 4.560 \text{ variables.}$

pasando de 4.960 para el caso más simple (en el que no se realiza ningún control de calidad) a 4.560 datos (8 % menos).

La máxima reducción en el número de variables aleatorias se produce al aplicar el modelo propuesto en una configuración productiva del tipo D, es decir, la más compleja. En tal caso el número de variables por operación pasaría de 6 a 2 y el total de variables por lote, que con CRP son dos se reduce a la mitad⁵⁹. Aplicando estos datos a la expresión (5.50) podemos calcular la función que refleja la diferencia en el número de variables aleatorias que se consigue al pasar de CRP al modelo propuesto en las configuraciones tipo D:

$$\begin{aligned} \text{Diferencia Variables } D &= \text{Lotes} / \text{ítem} \times \text{Ítems} \times \\ &\times \left[(\text{Operaciones} / \text{lote e ítem} \times 4 \text{ Variables} / \text{operación}) + 1 \text{ Variables} / \text{lote} \right] \end{aligned} \quad (5.51)$$

Por otro lado, la mínima reducción en el total de variables aleatorias se produce cuando se sustituye CRP en una configuración productiva simple, como la tipo A. En esta circunstancia sólo se reducen las variables relacionadas con el número de lotes (de 2 a 1). En tal caso, la diferencia en el total de variables necesarias se puede calcular restando a la aplicación de la expresión (5.50) para el caso A, el resultado de incluir, en la misma fórmula las características para el modelo propuesto. El resultado es el siguiente:

$$\text{Diferencia Variables } A = \text{Lotes} / \text{ítem} \times \text{Ítems} \quad (5.52)$$

Para analizar los valores máximos y mínimos de la disminución del número de variables aleatorias, obtenidos con la utilización del modelo propuesto alternativo a CRP, en relación con el número de Centros de Trabajo, ítems, lotes y operaciones, además del estudio de las expresiones (5.50), (5.51) y (5.52), hemos desarrollado una simulación cuyo resultado se ha incluido en el Anexo 5⁶⁰. Del estudio realizado podemos concluir lo siguiente:

⁵⁹ Con CRP se necesitan los tiempos de confección, desplazamiento de materiales (relacionados con el número de lotes), cola, preparación, ejecución, espera, inspección y desplazamiento (en función de las operaciones), mientras que con el modelo propuesto tan sólo se precisa de los tiempos de entrada, carga (por cada operación) y de finalización del lote (dependiente del total de lotes emitidos).

⁶⁰ En este anexo se ha realizado una simulación para los valores de máxima y mínima reducción en el número de variables aleatorias bajo la consideración de un horizonte de planificación de 20 periodos, en función del número de Centros de Trabajo, ítems, lotes y operaciones (tomado un máximo de 50 Centros, 20 lotes emitidos por cada ítem dentro del horizonte de planificación, 10.000 ítems y 20 operaciones por ítem).

- Los beneficios del cambio de técnica se reducen con el aumento del número de *Centros de Trabajo*, si bien este efecto se ve suavizado, porcentualmente hablando, cuando se procesan un mayor número de lotes de ítems (más tipos de ítems o superior número de lotes de cada uno de ellos). La relación inversa entre el número de Centros y la reducción en el porcentaje de datos es debida a que el número de variables aleatorias relacionada con aquéllos (eficiencia y utilización) es fijo e independiente de la técnica empleada para la planificación, por lo que cuanto mayor sea el número de Centros, menor será el porcentaje de diferencia de variables.
- La reducción en el número de variables es proporcional al total de *lotes* de cada ítem que se procesen durante el horizonte de planificación.
- El efecto del número de *operaciones por ítem* en la reducción de variables aleatorias es distinto, según analicemos entornos productivos más o menos complejos. Así, en el primero de los casos, las ventajas aumentan con el mayor número de operaciones por ítem; sin embargo, para configuraciones más simples, el efecto es el contrario, obteniéndose menores beneficios cuando se incrementa el número de operaciones por artículo⁶¹.
- El total de *ítems* distintos que elabore la empresa afecta positivamente al cambio de técnica, potenciándose la disminución de variables aleatorias en aquellas empresas que produzcan un mayor número de artículos (componentes semiterminados y productos finales).
- Existe una relación directa entre la amplitud del *horizonte de planificación* y el total de variables aleatorias, si bien en términos porcentuales de reducción de variables por el cambio de técnica, la relación es inversa. Esto se debe a que el número de datos relacionados con los periodos, son los mismos independientemente de la técnica aplicada (factores eficiencia y utilización), por lo que el efecto sobre el total de variables aleatorias se reduce al aumentar el volumen total de éstas.
- Los porcentajes de reducción en el número de variables aleatorias se mueven dentro del *intervalo de variación* del 0,4 % y el 66%,

⁶¹ Esto se debe al hecho de que la diferencia en el número de variables aleatorias, al sustituir CRP por el modelo propuesto, en configuraciones más simples, no depende de las operaciones por ítem, como se ve en la expresión (5.52). Por ello, al aumentar los valores del total de variables aleatorias necesarias, la diferencia en porcentaje disminuye.

produciéndose, el primer caso, en configuraciones simples y tomando unos valores muy pequeños de ítems y lotes emitidos y valores muy grandes de operaciones por ítems y Centros de Trabajo⁶². Por otra parte, la máxima reducción, se alcanza con altos números de ítems, operaciones por ítem y lotes de cada uno de ellos por horizonte de planificación.

Los resultados de la simulación se han simplificado y resumido en las Tablas 5.54. y 5.55. (para un horizonte de planificación de 8 periodos), en las que sólo se han indicado los mayores y menores porcentajes de reducción obtenidos al utilizar el modelo propuesto. Se puede observar que, para aquellas empresas más complejas (caso D utilizado como ejemplo en la Tabla 5.53.), existe una relación directa entre el número de ítems, lotes y operaciones y el porcentaje de reducción, e indirecta con respecto al total de Centros de Trabajo. No obstante, excepto para empresas muy especializadas, con poca variedad de ítems y operaciones, los niveles máximos de reducción de las variables están en torno al 66 %.

Centros de Trabajo	5								
Operaciones	5								
Ítems	5			100			10.000		
Lotes por ítem	2	5	8	2	5	8	2	5	8
Máxima reducción (caso D)	52,5	59,7	61,8	64,8	65,3	65,4	65,6	65,6	65,6
Mínima reducción (caso A)	5,0	6,6	7,1	8,1	8,2	8,3	8,3	8,3	8,3
Operaciones	20								
Ítems	5			100			10.000		
Lotes por ítem	2	5	8	2	5	8	2	5	8
Máxima reducción (caso D)	62,3	64,7	65,3	66,2	66,3	66,3	66,4	66,4	66,4
Mínima reducción (caso A)	2,0	2,2	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4

Tabla 5.54. Porcentajes de máxima y mínima reducción en el número de variables necesarias para la realización de la Planificación de Capacidad, comparando CRP con el modelo propuesto, considerando un horizonte de planificación de 8 periodos y 5 Centros de Trabajo.

En el otro extremo, aún en el caso de que la empresa se caracterice por una configuración productiva en línea, donde las esperas se eliminan y los Centros se dedican a realizar una única operación (caso A del ejemplo indicado en la Tabla

⁶² El número de variables aleatorias relacionadas con las operaciones de cada ruta y los Centros de Trabajo, aplicando CRP en configuraciones simples, son las mismas que si utilizamos el modelo alternativo propuesto; por este motivo aun cuando al aumentar las operaciones y Centros disminuye el número de variables necesarias, en comparación con CRP, el porcentaje que supone la diferencia entre el total de variables considerada por ambas técnicas también se reduce.

5.53.) la aplicación del modelo propuesto también consigue una reducción del número de variables, si bien la disminución supone un bajo porcentaje (entre un 0,4 % y 8,3%), directamente relacionado con el número de ítems y lotes.

Centros de Trabajo	20								
Operaciones	5								
Ítems	5			100			10.000		
Lotes por ítems	2	5	8	2	5	8	2	5	8
Máxima reducción (caso D)	32,8	46,9	52,5	62,5	64,3	64,8	65,6	65,6	65,6
Mínima reducción (caso A)	2,3	4,0	5,0	7,4	7,9	8,1	8,3	8,3	8,3
Operaciones	20								
Ítems	5			100			10.000		
Lotes por ítems	2	5	8	2	5	8	2	5	8
Máxima reducción (caso D)	52,6	60,1	62,3	65,5	66,0	66,2	66,4	66,4	66,4
Mínima reducción (caso A)	1,4	1,8	2,0	2,3	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4

Tabla 5.55. Porcentaje de máxima y mínima reducción en el número de variables necesarias para la realización de la Planificación de Capacidad, comparando CRP con el modelo propuesto, considerando un horizonte de planificación de 8 periodos y 20 Centros de Trabajo.

De la simulación desarrollada podemos deducir que, para la hipótesis de partida planteada, la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga elaborado por el modelo propuesto deberá ser mayor que la del desarrollado mediante CRP, aumentando la diferencia entre ambas probabilidades a medida que aumentan el número de operaciones que sean necesarias para elaborar cada ítem, la variedad de éstos, la frecuencia de emisión de los lotes de cada ítem y la complejidad del proceso productivo.

5.7. CUMPLIMIENTO DE LA FECHA DE ENTREGA

La capacidad de poder prever de manera adecuada el tiempo de suministro o el periodo de finalización de los ítems resulta imprescindible, tanto para determinar la fecha de entrega de un producto final⁶³, como para planificar el procesamiento de los ítems que actúan como componentes de otros más complejos.

⁶³ Cumpliendo así con uno de los objetivos básicos del Subsistema de Operaciones: el cumplimiento de entrega. Véase, por ejemplo, Adam y Ebert (1991, p. 22), Domínguez y otros (1995a, p. 74), o Miranda y otros (2005, pp. 63-64).

El tiempo de suministro para un lote compuesto por Q_j unidades (TS_{Q_j}) se definió en el Apartado 3.2., como el tiempo que transcurre desde la emisión hasta la finalización de dicho lote, lo cual coincide con el momento de finalización del proceso productivo (Tf_{Q_j}). Por este motivo, el software que se incluye en el modelo propuesto, estimará el tiempo de suministro a partir del valor medio que tomó el tiempo de finalización de los lotes con el mismo tamaño, que se elaboraron en la empresa con anterioridad:

$$\overline{TS_{Q_j}} = \overline{Tf_{Q_j}} \quad (5.53)$$

En el caso de que la empresa no haya procesado lotes del tamaño incluido en el Plan de Materiales, el valor del tiempo de suministro se calculará por interpolación entre tiempo medio originado para el tamaño de lote inmediatamente inferior y superior del que se disponga datos. Si el número de unidades que compone el lote es mayor que cualquiera de los que se ha realizado con anterioridad, se determinará el tiempo de suministro mediante una relación de proporcionalidad. No obstante, a medida que vaya pasando el tiempo y la base de datos vaya aumentando su número de registros, será difícil que no se haya recogido información para pedidos con tamaños de lote como los de cualquiera que se quiera emitir, por lo que, a medida que el sistema se vaya rodando, imperará la forma de cálculo del tiempo de suministro expuesta al principio de este párrafo.

Como ya comentamos en el Apartado 5.4.2.1., el programa informático que incluye el modelo propuesto, calcula el tiempo de suministro de los lotes emitidos en la pantalla “Tiempo de suministro” (Ilustración 5.26.), estimando, para cada uno de los lotes que se encuentran en el Plan de Materiales, los días que serían necesarios para finalizarlos.

Por otro lado, esta aplicación ofrece una herramienta de análisis de la planificación de los tiempos de suministro (analizada en el Apartado 5.4.2.2.2.), permitiendo el estudio de la evolución de las desviaciones entre las fechas previstas de entrega, fijadas por el planificador en el Plan de Materiales, y las fechas reales de finalización de los lotes (Ilustración 5.27.).

Este estudio se complementa con el análisis de valores extremos y tendencias de los tiempos de entrada en el almacén (comentado en el Apartado 5.4.2.2.4.), que identifican la finalización del proceso productivo y, como se indica en la expresión (5.53), reflejan el tiempo de suministro. De esta manera, el planificador puede eliminar aquellos tiempos que presenten un valor inusualmente alto o bajo, o bien una tendencia creciente o decreciente, para evitar que distorsionen la representatividad de la media utilizada como estimador del tiempo de suministro.



Ilustración 5.26. Pantalla con la planificación del tiempo de suministro de los lotes emitidos.

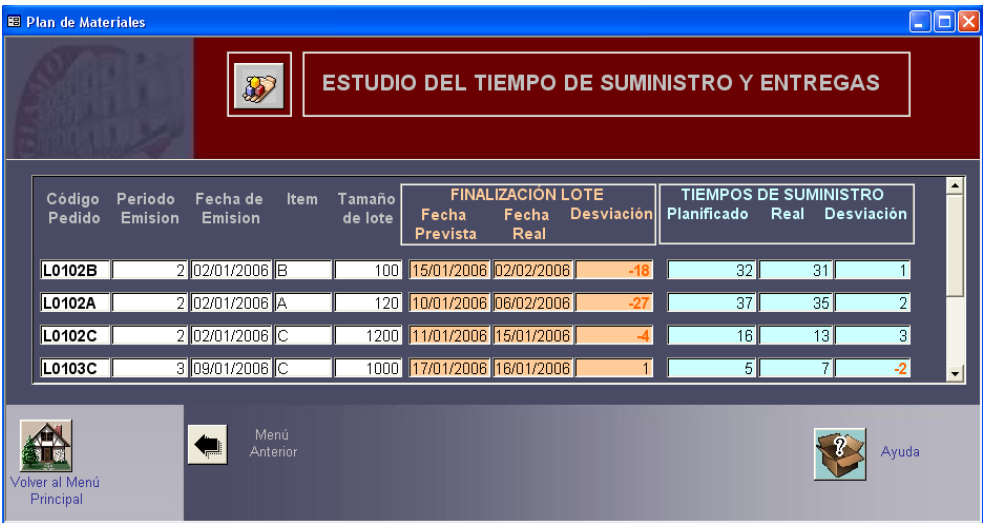


Ilustración 5.27. Pantalla dedicada al estudio del tiempo de suministro y entregas.

5.8. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL MODELO PROPUESTO

Tal y como hemos ido desgranando en los apartados anteriores, la utilización del modelo propuesto (constituido por la técnica de cálculo desarrollada y el software diseñado para su utilización), para la planificación de la capacidad a corto plazo puede proporcionar sobre el uso de CRP, una serie de ventajas derivadas de la menor cantidad de información necesaria, del mantenimiento automatizado de la actualización de la misma, de la simplificación de los cálculos y de posibles mejoras de las estimaciones de los datos y de los planes de carga. Ventajas que, por supuesto, pueden ser mayores o menores en función del caso concreto.

Por supuesto, el modelo presentado no está exento de limitaciones que es preciso identificar para su correcta implantación. Algunas de ellas se derivan de las hipótesis de partida o simplificaciones empleadas, mientras que otras se centran en la aplicación práctica de la técnica a través del prototipo de programa informático desarrollado.

Dado que unas y otras han ido describiéndose en todo lo anteriormente descrito en el presente capítulo y en los anteriores, pasaremos a continuación a exponerlas de manera resumida y ordenada en los dos próximos apartados.

5.8.1. Ventajas del modelo propuesto en comparación con CRP

Del estudio realizado en este capítulo y en los anteriores, se puede deducir que la aplicación del modelo propuesto alternativo a CRP, puede ofrecer sobre este último una serie de ventajas que podemos estructurar de la manera siguiente:

1. En relación con los **datos a emplear** en la planificación de la capacidad, el modelo propuesto:
 - 1.A. **Necesita un menor número de variables** que CRP para la realización de los cálculos que requiere la planificación de la capacidad a corto plazo. Como vimos en el Apartado 5.6.3., el número de variables aleatorias empleadas por CRP, aumentará con el número de Centros de Trabajo a utilizar (por el número de factores de eficiencia y utilización que se emplean), el número de ítems que se elaboren, el número de lotes que se emitan de cada ítem en el horizonte de planificación, el número de operaciones necesarias para elaborar cada uno de los ítems que se fabrique, el número de elementos que compongan el tiempo de suministro (dependientes de

la configuración productiva, que afecta a la existencia de esperas en el proceso, así como de las políticas de la empresa con respecto a las inspecciones de calidad), y el tamaño del horizonte de planificación. Por el contrario, el número de variables necesarias para desarrollar la planificación de la capacidad con el modelo propuesto, no variará en función de las características del proceso productivo, de ahí que, en el caso descrito en el Apartado 5.6.3., el porcentaje de reducción en el número de variables a emplear por el modelo propuesto con respecto al que es necesario para el uso de CRP, llegue hasta el 66%, e incluso más, a medida que la complejidad de la configuración productiva aumente.

1.B. **Requerirá de menos muestreos y estimaciones que CRP para determinar los valores medios de las variables** a emplear, las cuales son todas variables aleatorias, y ello porque:

- Utiliza un menor número de variables (ventaja 1.A.).
- No necesita de muestreos de cada una de ellas para determinar dichos valores medios como ocurre en el caso de CRP. Se calculan por el programa automáticamente (ver Apartados 5.4.1., 5.5.2. y 5.5.3.).
- No necesita de estudios y muestreos de cada una de ellas cada vez que se detecte un cambio en sus valores medios como ocurre en el caso de CRP. Son actualizados por el programa automáticamente (ver Apartados 5.5.2. y 5.5.3.).

1.C. Deberá lograr una **mejor estimación de los valores medios de los datos (variables aleatorias)** que se han de determinar, habida cuenta de que:

- Parte para ello de la población y no de muestras. Las estimaciones son calculadas por el programa automáticamente, a partir de los datos que se van introduciendo a la entrada y salida de cada pedido de los Centros de Trabajo (ver Apartados 5.4.1., 5.5.2. y 5.5.3.).
- Se evitan muchos errores humanos propios de la toma de datos, tanto en los tiempos anotados como en los ritmos de trabajo considerados por los analistas (afectados por la subjetividad), como al tomar las mediciones para las muestras a partir de las cuales se han de estimar las variables en CRP (ver Apartados

3.3. y 5.5.2.). Los tiempos de entrada y salida de los Centros de Trabajo que son necesarios, son tomados en éstos por los mismos operarios, de manera que automatizando el proceso mediante lectores de códigos de barras, la introducción de datos erróneos se reduciría en gran medida (ver Apartado 5.2.).

- Los trabajadores no se sienten intimidados ante los analistas de tiempos, dado que no es necesaria una estimación directa. Ello repercute en la moral de los operarios (incluso pueden considerarse vigilados por la empresa, lo que repercute sobre su índice de satisfacción)⁶⁴ y en la veracidad de los datos al no ser alterados por la presencia de un estimador.

1.D. Debe permitir un **mejor mantenimiento de la calidad de los datos empleados en la planificación de capacidad**, dado que:

- Continuamente va actualizando los valores estimados de las variables, a partir de los datos que se van recogiendo en los Centros de Trabajo, relativos a los momentos de entrada y salida de los lotes en los mismos (ver Apartado 5.5.3.). A diferencia de CRP, no requiere como éste que, en el caso de que el planificador detecte una desviación en el valor empleado de una variable, se proceda a tomar las muestras y hacer los estudios necesarios para la determinación de su nuevo valor y, posteriormente, introducirlo en la base de datos del sistema (ver Apartado 5.5.2.9.).
- Cuenta con herramientas que informan sobre la evolución y las tendencias de las variables más relevantes (ver Apartado 5.4.2.2.3.), así como de la capacidad (ver Apartado 5.4.2.2.1.) y del tiempo de suministro (ver Apartado 5.4.2.2.2.). Igualmente, avisa sobre la existencia de variables que presentan valores anómalos para su análisis y corrección (ver Apartado 5.4.2.2.4.).
- El inconveniente de CRP relativo a la gran cantidad de datos que es necesario estimar, unido a la necesidad de hacerlo mediante múltiples muestreos, implica un alto coste que puede llevar a la empresa (como ya desarrollamos en el Apartado 5.5.6.3.), a reducir la frecuencia con la que se actualiza el valor medio de una variable aleatoria, lo que repercute en su fiabilidad. Al

⁶⁴ Véase, por ejemplo, Adam y Ebert (1991, p. 350) o Niebel (1996, pp. 730-732).

reducirse al mínimo esta necesidad en el sistema propuesto, haciéndose además de manera automática para la gran mayoría de las variables (sin coste adicional), la frecuencia de dichas actualizaciones puede ser mucho mayor.

2. En relación con el **proceso de cálculo** empleado para la planificación de la capacidad, el modelo propuesto:
 - 2A. Realiza un **cálculo más realista de la carga generada por el Plan de Pedidos** que el realizado por CRP, habida cuenta de que este último considera que en todas las operaciones de la ruta se procesa un número de unidades igual al lote emitido (ver Apartado 5.2.1.). Por este motivo, caso de existir un porcentaje de defectuosas superior a cero en cualquier operación, la planificación CRP estará inflada, siendo más realista la obtenida por el procedimiento desarrollado mediante el modelo propuesto. Como ya vimos para el ejemplo analizado en el Apartado 5.5.6.3., esto puede provocar distorsiones importantes al calcular las desviaciones de capacidad.
 - 2B. **Requiere de menos cálculos y más simples** (ver Apartado 5.5.5.) que los utilizados por CRP (ver Apartado 5.5.4.), tanto para la determinación de las cargas como para su distribución en el tiempo, lo que, unido a que utiliza un menor número de variables (ventaja 1.A.) conlleva la necesidad de un menor tiempo de computación.
3. En relación con la **calidad de los planes desarrollados**, con el modelo propuesto:
 - 3A. Teniendo en cuenta el menor número de variables aleatorias que emplea (ventaja 1.A.; ver Apartado 5.6.3.), **para las hipótesis de partida** planteadas en los Apartados 5.6.⁶⁵ y 5.6.1.2.⁶⁶, **la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga elaborado deberá ser mayor que la del desarrollado mediante CRP**, aumentando la diferencia entre ambas probabilidades a medida que aumentan el número de operaciones que sean necesarias para

⁶⁵ Dado que la calidad de la información elaborada depende del caso concreto y no del modelo de planificación que se emplee, asumimos que, a efectos de comparar la calidad de la planificación realizada por CRP y el modelo propuesto, *“es igual la probabilidad de cumplimiento del valor estimado de cada una de las variables empleadas por CRP y por el modelo alternativo propuesto”*.

⁶⁶ Habida cuenta de que la empresa puede retrasar el comienzo de las operaciones, asumiendo tiempos ociosos, establecimos como hipótesis que *“la carga sólo se adelantará en la realidad, en relación al momento planificado, si con ello no traslada su periodo de comienzo”*.

elaborar cada ítem, la variedad de éstos, la frecuencia de emisión de los lotes de cada ítem y la complejidad del proceso productivo. Esto implicará en muchas ocasiones, paliar en buena medida el inconveniente 2 de CRP, que detallamos en el Apartado 2.4.7.

3.B. **Debería aumentar la mejora de la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga a que hace referencia la ventaja 3.A.,** con respecto al desarrollado mediante CRP, debido a que (ver Apartado 5.6.3.):

- Realiza un cálculo más realista de la carga generada por el Plan de Pedidos que el realizado por CRP (ventaja 2.A.).
- Requiere menos muestreos y estimaciones que CRP para determinar los valores medios de las variables a emplear (ventaja 1.B.).
- Deberá lograr una mejor estimación de los valores medios de las datos (variables aleatorias) que se han de determinar (ventaja 1.C.).
- Debe permitir un mejor mantenimiento de la calidad de los datos empleados (ventaja 1.D.).

4. **Ventajas relativas a la puesta en marcha y utilización.** El modelo propuesto:

- 4.A. Requiere **menos tiempo para su implementación**, dado que han de estimarse menos variables que en CRP (ventaja 1.A.) y, además, no son necesarios tantos estudios y muestreos (ventaja 1.B.).
- 4.B. Debe ser **más fácil de implementar que CRP**, habida cuenta de que, tras estimar los factores de eficiencia y utilización, basta ir recogiendo los datos de las fechas de entrada y salida de los Centros de Trabajo que se van procesando. Esto se haría por los operarios de los propios Centros, recogándose las fechas exactas que asignaría directamente el software en la base de datos. Bastaría esperar a tener un número de pedidos procesados suficientemente representativo, para que el sistema pudiera realizar su actividad.

5. **Ventajas relativas al consumo de recursos.** El modelo propuesto:

-
- 5.A. Requiere de un **menor tiempo de computación**, dado que, en comparación con CRP precisa de menos cálculos y más simples (ventaja 2.A.) para la determinación de las cargas y para su distribución en el tiempo, y utiliza un menor número de variables (ventaja 1.A.).
- 5.B. **Reduce mucho la necesidad de personal especializado** para estimar las variables aleatorias, ya que la determinación de los valores estimados mediante muestras (Estudios de Tiempos y aplicaciones de la Teoría de Colas), se circunscriben a los factores de eficiencia y utilización (ventaja 1.B.). El resto de variables son determinadas por el programa a partir de los datos recogidos por los operarios de los Centros de Trabajo, incluso mediante el uso de lectores de códigos de barra (ver Apartado 5.2.).
- 5.C. También, por los mismos motivos que en la ventaja anterior, **reduce el tiempo necesario para la toma de datos**, tanto para la determinación de los valores medios de las variables para la implementación del sistema, como para mantener actualizados dichos valores, una vez aquél entre en funcionamiento.
- 5.D. En general, **reduce el coste de la gestión de la capacidad**. El inconveniente de CRP relativo a la gran cantidad de datos que es necesario estimar mediante muestreos, como vimos en el Apartado 5.5.6.3.), hace necesarias una gran cantidad de horas⁶⁷ para realizar dichos estudios cada vez que se deseen actualizar los datos. El modelo propuesto, sin embargo, calcula automáticamente los valores de las variables necesarias, reduciéndose ese último tiempo al mínimo, ya que tan solo es preciso que se vayan recogiendo los datos de las operaciones que se van realizando a los diferentes lotes que se van procesando
6. **Ventajas relativas a la gestión de la capacidad**. El modelo propuesto:
- 6.A. Permitiría una **planificación y replanificación más rápida**, al requerir menos variables (ventaja 1.A.), menos muestreos y

⁶⁷ Como ya desarrollamos en el Apartado 5.5.6.3., para una empresa que maneje 200 ítems, siendo la mitad de ellos elaborados internamente con cinco operaciones, se necesitarían 2.800 datos para un sólo lote emitido de cada ítem para desarrollar la planificación CRP. Supuesto que fuera preciso una media de 5 horas por cada tiempo estimado mediante Medición del Trabajo o a través de la Teoría de Colas, se precisarían 14.000 horas para realizar todos los estudios.

estimaciones (ventaja 1.B.), un proceso de cálculo más simple (ventaja 2.B.), menor tiempo de computación (ventaja 5.A.) y recalcular automáticamente los valores de las variables a estimar (ventaja 1.D.).

6.B. Debería **aumentar la eficiencia de la actividad del planificador**, no sólo porque tarda menos en obtener los planes, sino además porque (ver Apartado 5.4.2.2.):

- La actualización constante de las estimaciones que hace el modelo propuesto deriva en un mecanismo de retroalimentación, con el que el sistema aprende de los errores. A diferencia de nuestro modelo, CRP realiza una planificación ciega, sin tener en cuenta los cambios que se hayan podido producir en la realidad. Es preciso, por tanto, que el planificador se percate de la variación en el valor de las variables aleatorias para que, tras introducir los valores actualizados, elabore una nueva Planificación de Capacidad.
- El programa informático, además de elaborar la planificación detallada de capacidad, lo cual es su objetivo principal, estima los tiempos de suministro y desarrolla el Programa de Operaciones (Gestión de Talleres), ofreciendo al planificador información relevante en relación a la posible ocupación de los Centros de Trabajo, permitiéndole tomar las medidas oportunas incidiendo sobre los tamaños de lote o fechas de emisión.
- La información relativa a los cambios en las variables aleatorias necesarias para el modelo alternativo propuesto, conocida a través de los datos históricos, nos permite, no sólo la realización de una Planificación de Capacidad más actualizada, sino también poder descubrir valores extremos o tendencias que nos indiquen problemas en el proceso. En este sentido el programa informático dispone de herramientas muy útiles para el estudio de la evolución de los tiempos o del factor de aprovechamiento de las operaciones⁶⁸, ayudando, además, a mejorar la fiabilidad de las estimaciones de los tiempos de carga y momentos de entrada en los Centros de Trabajo.

⁶⁸ Así, por ejemplo, un aumento de los valores del tiempo de ejecución unitario puede indicar la necesidad de mantenimiento o renovación de la maquinaria destinada a una operación.

- El planificador puede analizar la fiabilidad de la planificación elaborada con el modelo propuesto a través del estudio de la evolución de las desviaciones de las cargas reales frente a las planificadas, lo cual ofrece una importante herramienta de autodiagnóstico.
- La aplicación informática desarrollada proporciona una importante herramienta de simulación de las cargas y fechas de entrega. Así, por ejemplo, la empresa puede estudiar qué tamaño de lote es preciso emitir para que pueda estar finalizado en una fecha determinada.
- El programa desarrollado informa sobre los efectos que pueden tener sobre el tiempo de suministro las decisiones tomadas por los distintos subsistemas de la empresa (cambios en las políticas de contratación de proveedores, renovación de maquinaria, formación y recompensas de empleados, mix de productos, etc.) siempre que éstas generen tendencias o valores inusuales en los tiempos utilizados para el desarrollo de la Planificación de Capacidad.

A modo de conclusión, vistas las ventajas expuestas, entendemos que el modelo de Planificación de Capacidad propuesto en este trabajo, puede aplicarse a cualquier empresa con configuración productiva por lotes, debiendo conseguir, al menos a nivel teórico, unos niveles de fiabilidad iguales o superiores a los alcanzados por CRP. De otro lado, su implantación resulta sencilla, ya que una vez que se han introducido las características del sistema productivo, tan sólo es necesario que se incorpore la información del Plan de Materiales. No es preciso, por tanto, que la empresa tenga implantado un sistema ERP, como en el caso de CRP. Por consiguiente es muy útil para las pequeñas y medianas empresas (que en España, en el año 2005, suponían más del 99% del total⁶⁹), que no pueden permitirse el coste de implementación de ERP, proporcionándole una herramienta muy sencilla de instalar y utilizar, desarrollada con una interfaz amigable y para un sistema operativo de uso común en este tipo de empresas (Windows XP[®], etc.), en un software que muchas de ellas ya tienen disponible (Microsoft[®] Access[®]), con bajos requerimientos de hardware y de personal técnico especialista y, por tanto, con un coste de implementación y uso muy inferior a CRP. Además, como ya se ha expuesto, estas ventajas se acentuarán más, cuanto más complejo sea el sistema

⁶⁹ Si consideramos PYMES las que tengan un número de empleados inferior a 200, el número de empresas que cumplen este requisito son 3.058.631 de un total de 3.064.129 (INE, 2005, p. 371).

productivo de la empresa (alta variedad de ítems diferentes, más operaciones, horizontes de planificación largos, etc.).

5.8.2. Limitaciones del modelo propuesto

Obviamente, el modelo desarrollado en el presente trabajo no está libre de limitaciones, algunas de las cuales son comunes a CRP y otras son propias de la mecánica de cálculo propuesta o del programa informático diseñado para su aplicación.

1. Limitaciones comunes a ambas técnicas:

- 1.A. Es preciso tener **claramente definidas las rutas de fabricación**, no permitiéndose rutas alternativas, ya que calculamos los tiempos de carga por Centro de Trabajo.
- 1.B. En el cálculo del tiempo de carga y la fecha de entrega, **no se toma en consideración el valor real que puede tomar el tiempo de preparación** o ajuste del Centro de Trabajo, tras realizar una operación distinta a la anterior. Este tiempo depende del número y prioridad de los lotes que se encuentren en la línea de espera y de la técnica de secuenciación utilizada. Tanto CRP como el modelo propuesto consideran un valor medio e independiente.
- 1.C. Las estimaciones del tiempo de cola y espera, en CRP, y del tiempo entre operaciones, en el modelo propuesto, **no consideran el número de lotes que se encuentran en espera, las características de éstos o el orden de prioridad**, calculando valores medios e independientes de tales cuestiones.
- 1.D. Los **diferentes ritmos de actividad** que pueden tener los trabajadores. El estudio de los datos históricos no distingue la rapidez de los trabajadores⁷⁰, por lo que para tener en cuenta los

⁷⁰ Tan sólo el *Estudio de Tiempos* y el *Muestreo de Trabajo*, de todas las técnicas de Medición del Trabajo, incluyen el análisis de los ritmos.

diferentes ritmos de actividad se utiliza el factor eficiencia⁷¹, siendo muy importante disponer de datos actualizados de esta variable.

2. Limitaciones específicas del modelo propuesto:

2.A. Para su desarrollo se han establecido una serie de **hipótesis de partida con objeto de realizar una adecuada comparación** con CRP. Nos referimos a los criterios relacionados con la distribución de las cargas y a la emisión de los lotes:

- Aplicación de la programación hacia delante, donde se asignan los tiempos a partir de la fecha de emisión. Ello conlleva unos mayores tiempos ociosos tras la terminación del lote, lo que implica menores riesgos de retrasos. En estudios realizados sobre empresas que utilizan CRP, se ha puesto de manifiesto que las compañías suelen utilizar con más frecuencia la programación hacia atrás⁷². Por este motivo tenemos previsto que en futuras actualizaciones del programa informático el planificador pueda elegir el tipo de programación que desea aplicar para cada ítem, pudiendo, de esta forma diferenciar los artículos donde se desea reducir el riesgo de incumplimiento de la entrega (utilizando la programación hacia delante) o los tiempos ociosos (aplicando programación hacia atrás).
- Emisión de los lotes al final del periodo, lo cual puede no corresponderse con la realidad de la empresa. La aplicación de un criterio distinto de éste no afecta a la dinámica utilizada por el modelo propuesto, simplemente habría que tenerlo en cuenta para la distribución de la carga. Dado que el proceso de implementación del modelo propuesto implica la adecuación a las características propias de la empresa, en ese instante se procedería a adaptar el programa informático. No obstante, esta cuestión debe ir perfectamente coordinada con la Planificación de Materiales y, a este respecto, hay que decir que el criterio

⁷¹ La aleatoriedad del factor eficiencia se reduce en gran medida en Centros de Trabajo con altos niveles de automatización y gran número de trabajadores, de manera que se compensen los ritmos de trabajo entre ellos.

⁷² Jonsson y Mattsson (2002, p. 94).

generalmente asumido en ésta es el mismo que se ha seguido en nuestra propuesta.

2.B. Por otro lado, si bien el uso de datos históricos para las estimaciones permite obtener rápidamente valores actualizados de las variables, la utilización de éstos puede conllevar algunos inconvenientes que pueden reducirse mediante un adecuado tratamiento de la información almacenada. Los principales **errores en las estimaciones** pueden originarse por:

- Un escaso volumen de datos disponibles, los cuales conforman la población para un tamaño de lote determinado. Las primeras planificaciones elaboradas pueden no alcanzar altos niveles de fiabilidad, si bien esto mejorará solo conforme se incorporen nuevos valores de las variables necesarias a las bases de datos del sistema.
- Un bajo nivel de representatividad de los datos históricos almacenados, inconveniente que, por otro lado, no es específico de nuestra propuesta, sino inherente a cualquier actividad de previsión basada en datos históricos que desarrolle la empresa, donde el problema no es dicha predicción en base a datos históricos, sino que ésta se haga correctamente. La empresa debe percatarse de cualquier cambio en el proceso productivo que provoque una falta de representatividad de la información almacenada, como sustituciones de máquinas que afecten al tiempo de ejecución o variación en la calidad de las materias primas, por ejemplo, los cuales pueden afectar al valor del tiempo de carga. En tal caso deberá eliminar todos aquellos registros que no reflejen la situación actual de la empresa. No obstante, como ya se detalló anteriormente (ver Apartado 5.4.2.2.), el programa informático diseñado para la aplicación del modelo propuesto, está provisto de herramientas de análisis que palian en parte este problema, ya que ofrece información sobre valores extremos y tendencias en los tiempos de carga, así como en los momentos de entrada en los Centros de Trabajo, permitiendo al planificador la eliminación de estos datos con objeto de mantener la representatividad de los valores que se utilizan para el cálculo de las estimaciones de los tiempos.

2.C. En último lugar conviene mencionar aquellas **limitaciones propias del prototipo de programa informático** utilizado para la

aplicación del modelo propuesto, las cuales pasamos a analizar a continuación:

- La carga de una operación se puede distribuir, como máximo, en cuatro periodos. Dado que en el nivel de Planificación de Capacidad a corto plazo la duración de un cubo de tiempo suele ser una semana⁷³, el margen permitido por el programa informático es de un mes para el procesamiento de una operación a un lote, el cual nos parece más que razonable. No obstante, si fuera necesario, se pueden ampliar o reducir los periodos en los que una operación podría generar carga, adaptándolos a las características del proceso productivo de la empresa que desee implantar el programa.
- Se considera que el lote no queda finalizado hasta que no han recibido la operación correspondiente todas las unidades que lo componen, momento en el que se trasladará, al completo, al Centro donde deba recibir la siguiente operación de su ruta o, en su caso, al lugar donde deba almacenarse. Este criterio es bastante común en las configuraciones productivas *Job-Shop*. No obstante, con objeto de ampliar el ámbito de aplicación del modelo presentado, se está trabajando en la adecuación de la técnica a casos de traslado automático o individual de los ítems terminados.
- En este prototipo del programa, cada Centro de Trabajo alberga un único turno, aunque ya se tiene previsto que en posteriores versiones se incluya la posibilidad de especificar más turnos de trabajo, pudiendo caracterizarse por diferentes factores de eficiencia y utilización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, E.E. y EBERT, R.J. (1991), *Administración de la Producción y las Operaciones. Conceptos, modelos y funcionamiento*, Prentice-Hall, Naupalcan de Juárez, Mexico.

⁷³ Según el estudio realizado por Jonsson y Mattsson (2002, p. 92) sobre empresas suecas el tamaño del cubo de tiempo fue de una semana, para CRP, en el 55 % de los casos, un mes en el 27 %, un trimestre en el 11 % y el resto otros tamaños.

- ALFALLA LUQUE, R. y otros (2008), *Introducción a la Dirección de Operaciones Táctico-Operativa: Un enfoque práctico*, Delta Publicaciones, Madrid.
- BESTERFIELD, D. H.: *Control de Calidad*, Prentice Hall, 1995.
- BLACKSTONE, J. H., JR (1989), *Capacity Management*, South-Western Publishing, Cincinnati.
- CHEN, T. C. E. (1986), "Capacity requirements planning by stochastic linear programming", *Mathematical Modelling*, Vol. 7, No. 2-3, pp. 443-448.
- COMPANYS PASCUAL, R. y COROMINAS SUBIAS, A. (1995), *Organización de la Producción II*, Edicions UPC, Barcelona.
- CONNOR, S. (1986), "The Value-Added Equation", *Manufacturing Systems*, Vol. 4, No. 12, pp. 19-22.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A. y otros (1995a), *Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A. y otros (1995b), *Dirección de Operaciones. Aspectos estratégicos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- FOGARTY, D. W., BLACKSTONE, J. H. JR y HOFFMANN, T. R. (1991), *Production & Inventory Management*. APICS. Cincinnati.
- FRAXANET DE SIMÓN, M (1990), *Organización y Gestión de la Producción*, CDN Ciencias de la Dirección, Madrid.
- GARCÍA GONZÁLEZ, S., RABADÁN MARTÍN, I. y GESSA PERERA, A. (2003), "El efecto de la regla de secuenciación en las configuraciones productivas por lotes", *Papers Proceedings 2003, AEDEM XIII Congreso Hispano-Francés, Bordeaux, Francia*, pp. 85-95.
- GELDERS, L. F. y VAN WASSENHOVE, L. N. (1982): "Hierarchical Integration in Production Planning: Theory and Practice", *Journal of Operations Management*, vol.3, No. 1, pp. 27-35.
- HASEN, B. L. (1980), *Control de Calidad*, Hispano Europea.
- HEIZER, J. y RENDER, B. (2001), *Dirección de la Producción. Decisiones Tácticas*, Prentice-Hall, Madrid.
- HOPEMAN, R. J. (1973), *Producción. Conceptos, análisis y control*, Compañía Editorial Continental, Calz. De Tlalpan, Mexico.
- HOPP, W.J., SPEARMAN, M.L. y WOODRUFF, D.L. (1990), "Practical Strategies for lead time reduction", *Manufacturing Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 78-84.
- INE (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA) (2005), *Anuario estadístico de España 2006*, Instituto Nacional de Estadística, Madrid.
- JONSSON, P. y MATTSSON, S. (2003), "The implications of fit between planning environments and manufacturing planning and control methods", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 23, No. 8, pp. 872-900.

- MARKLAND, R., VICKERY, S. y DAVIS, R. (1995), *Operations Management. Concepts in Manufacturing and Services*, West Publishing, St. Paul, Massachusets.
- MARTÍNEZ, R. (1984), *Cómo rentabilizar la producción*, Ediciones Deusto, Bilbao.
- MEREDITH, J. R., (1992), *The management of operations: a conceptual emphasis*, John Wiley and Sons.
- MIRANDA GONZÁLEZ, F. J., RUBIO LACOBIA, S. CHAMORRO MERA, A. y BAÑEGIL PALACIOS, T. (2005), *Manual de Dirección de Operaciones*, Thomson, Madrid.
- MOLINDER, A. y OLHAGER, J. (1998), "The effect of MRP lot sizing on actual cumulative lead times in multi-level systems", *Production Planning & Control*, Vol. 9, No 3, pp. 293-302.
- NIEBEL, B.W. (1996), *Ingeniería Industrial. Métodos, Tiempos y Movimientos*, Alfaomega, México.
- ODEN, H. W., LANGENWALTER, G. A. y LUCIER, R. A. (1993), *Handbook of Material & Capacity Requirements Planning*, McGraw-Hill, New York.
- OZEKI, K. (1992), *Manual de herramientas de calidad*, Tecnologías de Gerencia y Producción S.A.
- PARZEN, E. (1972), *Procesos estocásticos*, Paraninfo, Madrid.
- PRAWDA WITENBERG, J. (1988), *Métodos y modelos de investigación de operaciones*, Noriega Editores, México.
- RABADÁN MARTÍN, I., GARCÍA GONZÁLEZ, S., GESSA PERERA, A y SANCHÁ DIONISIO, M. P. (2004), "Análisis de la incidencia de las reglas de prioridad FCFS y MTP en la carga y el Plan de Capacidad de un centro de trabajo", *Proceeding 2004, XIV Jornadas Hispano-lusas de Gestión Científica, Azores, Portugal*.
- SANTOS PEÑAS, J., MUÑOZ ALAMILLOS, A., JUEZ MARTEL, P. y GUZMÁN JUSTICIA, L. (1999), *Diseño y Tratamiento Estadístico de Encuestas para Estudios de Mercado*, Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid.
- SCOTT, B. (1994), *Manufacturing Planing System*, McGraw-Hill, Berkshire, England.
- SLACK, N. (1997), *The Blackwell Encyclopedic Dictionary of Operations Management*, Blackwell, Oxford.
- STEVENSON, W. J., (1990), *Production/Operations Management*, Irwin.
- THOMAS, M. (2006), *The gold standard*, *Industrial Engineer*, Vol. 38, No. 4, pp. 35-39.
- WALTERS, C. D. J. (1991), *An introduction to Operations Management*, Addison Wesley.
- WEMMERLÖV, U. (1984), *Capacity Management Techniques. For Manufacturing Companies with MRP Systems*, American Production and inventory Control Society, Cincinnati, Ohio.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- CANAVOS, G. (1988), *Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y Métodos*, McGraw-Hill.
- WEMMERLÖV, U. (1979), "Designed factors in MRP systems: A limited survey", *Production and Inventory Management*, Vol. 20, No. 4, pp. 15-34.

PARTE V

CONCLUSIONES

CAPÍTULO

6

CONCLUSIONES, LIMITACIONES DEL TRABAJO Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Hasta aquí nuestra propuesta de una técnica alternativa a CRP para la Planificación de la Capacidad a corto plazo, y la exposición de todos los aspectos que la justifican y le sirven de base. Llegados a este punto, creemos cumplidos los objetivos planteados al inicio del trabajo.

En este sentido, con respecto al **Objetivo 1** que nos marcamos, consideramos que en buena medida, hemos logrado **establecer las principales fuentes de la complejidad y baja eficiencia práctica de la técnica CRP** y, para ello, creemos haber cumplido, hasta donde nos ha sido posible, con:

- a) La formulación analítica de:
 - La determinación del tiempo de suministro planificado en condiciones de universo aleatorio y la identificación y análisis de todas y cada una de las variables que intervienen en el proceso de cálculo de CRP.
 - El proceso de cálculo del Plan de Carga que desarrolla CRP.

- La probabilidad del cumplimiento del Plan de Carga obtenido por CRP.
- b) El establecimiento, desde el punto de vista teórico, de:
- Los orígenes de la aleatoriedad de los Planes de Capacidad (capacidad disponible) y Carga (capacidad necesaria) generados por CRP.
 - La fiabilidad de la planificación elaborada por CRP, considerando el cumplimiento simultáneo de los Planes de Carga y Capacidad.
 - Las circunstancias que condicionan la eficiencia de CRP.

En cuanto al **Objetivo 2** que nos fijamos desde el principio, hemos llegado a **proponer un modelo para la Planificación de la Capacidad a corto plazo asistido por ordenador para configuraciones por lotes, basado en la filosofía de CRP, que desde el punto de vista teórico, es capaz de lograr unos niveles de cumplimiento, que son al menos** (en función de las características del caso), **similares a los logrados por éste, pero empleando menos recursos**. Para ello, hemos:

- a) Planteado una mecánica de cálculo del Plan de Carga, más simple, que usa una menor cantidad de variables aleatorias y más fáciles de estimar, que las que emplea CRP.
- b) Desarrollado el software necesario para aplicar la mecánica de cálculo propuesta, que además tiene pocos requisitos de personal técnico y emplea herramientas informáticas asequibles a pequeñas y medianas empresas.
- c) Formulado analíticamente, la probabilidad del cumplimiento del Plan de Carga obtenido mediante el modelo alternativo propuesto.
- d) Establecido, al menos desde el punto de vista teórico, la fiabilidad de la planificación elaborada por el modelo alternativo propuesto, considerando el cumplimiento simultáneo de los Planes de Carga y Capacidad, lo que nos ha permitido determinar las ventajas e inconvenientes del modelo propuesto en relación con CRP, estableciendo en qué casos y bajo qué condiciones, puede ser más o menos eficiente que éste.

Por lo demás, aunque son muchas las **conclusiones** derivadas de este trabajo que han sido puestas de relieve a lo largo de los pasados capítulos, vamos a proceder a destacar algunas de ellas que, para no ser reiterativos, pasamos a exponer de forma resumida a continuación:

1. En relación al **tiempo de suministro**, la importancia de su adecuada estimación para la Planificación de Capacidad, proviene de la relevancia de aquél para la asignación en los distintos periodos de tiempo de la carga originada por los lotes emitidos, de cara a elaborar el Plan de Carga a corto plazo; de aquí la necesidad de determinar las **fuentes de su aleatoriedad y los elementos que condicionan su comportamiento**. Tras su formulación en el Apartado 3.6., hemos podido constatar que (ver Apartado 3.7.):
 - a) Las variables y parámetros que afectan al cálculo del tiempo de suministro planificado medio de un ítem son:
 - El tiempo medio de confección del pedido.
 - Las distancias desde los Centros de Trabajo, y de estos con la zona de almacenamiento de materiales y productos finales.
 - Los tiempos de desplazamiento medios para la obtención de materiales y para los traslados de los ítems.
 - El número de manutenciones necesarias por cada desplazamiento de materiales.
 - El tiempo medio de ajuste del elemento de transporte, en el caso de que sea necesaria una preparación de éste en función del material o ítem a desplazar.
 - Las tasas medias de llegada de todas las operaciones que se realizan en los Centros de Trabajo.
 - El tiempo de ejecución medio de todas las operaciones que se realizan.
 - El promedio del tiempo de preparación para la ejecución de todas las operaciones que se ejecutan.
 - El tamaño medio de lote de todos los ítems que se procesan en cada uno de los Centros de Trabajo.
 - El valor de los factores de eficiencia y utilización medios, aplicables a cada Centro de Trabajo.

- Los factores medios de aprovechamiento de cada una de las operaciones.
 - El tiempo de inspección unitario medio del ítem en cada una de las fases del proceso productivo.
 - El tamaño de muestra que se utilice para la inspección.
- b) Una gran parte de los elementos que afectan al tiempo de suministro de un ítem son variables aleatorias, por lo que para la determinación de su valor medio o planificado, es necesario previamente la estimación del valor medio de cada una de ellas; estimaciones que pueden provocar desviaciones del valor calculado del tiempo de suministro medio con respecto a su valor real. Sin embargo, el desarrollo de la formulación realizada nos permite observar, como no todas las desviaciones de las variables aleatorias que influyen en el cálculo del tiempo de suministro le afectan en la misma medida, lo que constituye una información fundamental, no sólo para el estudio de CRP, sino de cara a la toma de decisiones relacionadas con la Gestión de la Capacidad a corto plazo y, fundamentalmente, para ajustar la capacidad y carga planificadas y reales. De forma muy resumida (ver Apartado 3.7.), podemos afirmar que:
- Existen variables que tienen un efecto directo sobre el tiempo de suministro, tales como el tiempo de confección del pedido, los componentes del tiempo de desplazamiento de materiales o el tiempo de inspección unitario.
 - Existen variables con un efecto multiplicador sobre el tiempo de suministro. Efecto que varía de unas a otras, por lo que podemos agruparlas en función de la incidencia que tienen sus cambios sobre los tiempos básicos que componen el tiempo de suministro, obteniendo los siguientes grupos:
 - o Variables que afectan de forma directa al tiempo de carga y tiempo de cola y, de forma inversa al tiempo de espera, lo que hace que provoquen un doble efecto contrario sobre el tiempo de suministro. Entre ellas estarían el tiempo de ejecución unitario, el tiempo de preparación de cualquiera de los ítems que comparten Centro de Trabajo y los factores eficiencia y utilización de tales Centros.

- o Variables que afectan de forma directa al tiempo de espera y de desplazamiento del lote. Entre ellas, el tiempo de desplazamiento unitario, el número de mantenimientos necesarios para el traslado entre Centros de Trabajo y el tiempo de preparación de los envíos.
- o Variables que afectan de forma directa al tiempo de cola y de forma inversa al tiempo de carga. Tal es el caso de las tasas de llegada de los pedidos a los Centros de Trabajo
- o Variables que afectan de forma directa al tiempo de carga, de cola, de espera, de desplazamiento e inspección. Entre ellas estarían el factor de defectuosas y el tamaño de lote medio de cualquiera de los ítems que comparten un Centro de Trabajo.

Ni que decir tiene, que la importancia de las variables con efecto multiplicador para la toma de decisiones de Gestión de la Capacidad, es bastante mayor que las de aquéllas que no tienen dicho efecto, dado que las decisiones que les afectan pueden provocar mayores ajustes en el tiempo de suministro, tanto para reducirlo, como para controlarlo cuando existan indicios de crecimiento de éste. Así es el caso del tiempo de ejecución de las operaciones, tiempo de preparación, tamaño de lote medio, factores de aprovechamiento de las operaciones, tasas de llegada de los lotes, factores eficiencia y utilización, tiempo de desplazamiento unitario, mantenimientos necesarios para el traslado y tiempo de preparación de los envíos. Por supuesto, para poder estudiar su influencia exacta, habría que realizar un análisis de sensibilidad en función del caso concreto.

- c) La adecuada estimación del tiempo de suministro de un ítem, no sólo depende de la gran cantidad de información relativa al mismo, sino también de la de los otros ítems fabricados por la empresa que tienen, al menos, un Centro de Trabajo en común con él, de ahí el alto riesgo de incumplimiento de la estimación del tiempo de suministro planificado. En concreto, esta vinculación se observa ante la necesidad de conocer las tasas de llegada, los tiempos de carga (tamaño lote, tiempos de ejecución, tiempo de preparación y factor de defectuosas) y desplazamiento (tiempo desplazamiento unitario, distancias, mantenimientos y tiempo de preparación para el desplazamiento) medios de todos los ítems con los que tiene algún Centro de Trabajo en común. No sería acertado, por tanto, calcular los tiempos de suministro de los distintos artículos por separado o de forma independiente.

- d) Existen variables exógenas al Sistema de Gestión de la Capacidad que pueden tener efectos sobre los parámetros y variables que condicionan el tiempo de suministro, tal y como ocurre con la demanda o con algunas políticas de otros subsistemas de la empresa; efectos que, como se pudo establecer en el Apartado 3.7. (ver Tabla 3.5.), pueden llegar a ser más que proporcionales sobre el valor del tiempo de suministro.
 - e) Existen parámetros sobre los que la empresa puede actuar, cuya alteración originaría variaciones en el tiempo de suministro. Tal es el caso de los cambios en las distancias entre Centros de Trabajo y la ubicación de la zona de materiales (que la empresa puede alterar a través de una adecuada distribución en planta, e inciden directamente sobre los tiempos de desplazamiento y espera) y las variaciones en la frecuencia de inspección y el tamaño de muestra que se utilizará para este análisis (que están relacionadas con la política de calidad que mantenga la compañía y que afectan al tiempo de inspección).
2. En cuanto a las **fuentes de la aleatoriedad, complejidad y eficiencia de la planificación desarrollada con CRP**, hemos de partir del hecho de que para el desarrollo de la Planificación de Capacidad a corto plazo es preciso determinar el valor de la carga y el momento de asignación de ésta. La primera información se obtiene del tiempo de carga del lote y para obtener la segunda es preciso conocer el resto de los componentes del tiempo de suministro, ya que el tiempo de carga también forma parte de éste y, además, es la evolución de los diferentes elementos de dicho tiempo de suministro, lo que emplea CRP para asignar la carga calculada para ejecutar en cada Centro de Trabajo el Plan de Pedidos a los diferentes momentos del tiempo. Ello implica que, en el sustrato de la probabilidad de que la planificación elaborada por CRP se cumpla en la realidad, siempre estarán los aspectos comentados en el grupo de conclusiones 1 sobre las fuentes de la aleatoriedad del tiempo de suministro y los elementos que condicionan su comportamiento. Además, hemos podido constatar a partir de la formulación realizada de la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga (ver Apartado 4.2.3.) y de Capacidad (ver Apartado 4.3.) desarrollados por CRP, así como de la formulación de la probabilidad que ambos se cumplan simultáneamente (ver Apartado 4.4.), que:
- a) La probabilidad de cumplimiento de la planificación de capacidad elaborada por CRP, está condicionada por los valores reales y medios de los distintas variables aleatorias que componen el tiempo de suministro:

- Tiempos de preparación y ejecución de las operaciones que se realicen en cada uno de los periodos que componen el horizonte de planificación.
 - Tiempo de desplazamiento unitario de las operaciones que se ejecuten en cada periodo abarcado por CRP y de las que les siguen en las rutas a cada una de ellas (cuya carga es asignada a algún periodo posterior).
 - Tasa de llegada a los Centros de Trabajo, para todas las operaciones que se realicen en los distintos periodos planificados.
 - Factores de eficiencia y utilización por periodo, de los Centro de Trabajo implicados.
 - Tamaño de lote medio considerado para cada ítem.
 - Factor de aprovechamiento de la operación que se realice en el periodo estudiado y de todas las operaciones posteriores, en su ruta de fabricación.
- b) Como consecuencia de lo anterior, el número de variables aleatorias a manejar en la planificación por CRP es tan grande¹ y se combinan de tal forma en el proceso de la planificación que desarrolla, que si tenemos en cuenta las características de las empresas que trabajan en configuraciones *job-shop* y entornos MRP II/ERP (en cuanto al número de operaciones que requiere cada ítem, el número de ítems a obtener, el número de lotes a fabricar, el número de Centros de Trabajo a emplear y a compartir, etc.; ver Apartado 4.4.), en las que nos centramos en el presente trabajo, la probabilidad de que en la práctica se cumplan los planes elaborados, no superaría con mucho la probabilidad nula, salvo en casos poco frecuentes en los que la probabilidad de que el valor medio estimado de muchas de esas variables aleatorias fuera muy cercano a la unidad; es decir, prácticamente en el caso de que estuviéramos actuando en un universo cierto.

¹ De decenas de miles en casos de empresas de cierta complejidad, incluso en el caso de que el horizonte de planificación no sea muy grande; ver Apartado 5.6.3.

- c) Tras el desarrollo de los distintos elementos que componen la probabilidad de cumplimiento de CRP, tomando como base las expresiones (4.42) y (4.44) desarrolladas en el Apartado 4.4., se pueden establecer las características de las empresas para las que se reducirá el riesgo de incumplimiento de la planificación que desarrolla. En concreto, se reducirán las desviaciones de la carga y capacidad planificada con respecto a las reales, a medida que las circunstancias del proceso productivo de se ajusten más a las siguientes:
- Uniformidad en el número y tamaño de los pedidos que se emiten de cada uno de los ítems que fabrica la empresa. Con ello se reduce la aleatoriedad de las tasas de llegada y del tiempo de carga de los lotes.
 - Composición constante del mix de productos de manera que se mantenga fijo el porcentaje de fabricación de cada uno de los ítems, sobre el total de producción, para así mantener la relación de las tasas de llegada sobre el sumatorio de éstas y originar menor riesgo de error con respecto al tiempo de carga (vía tiempo de preparación).
 - Bajo número de operaciones por periodo, independientemente del Centro donde se realicen, lo que puede ser debido a la existencia de procesos de fabricación con rutas cortas, a tamaños grandes de lotes (que generen altos tiempos de carga), a la existencia de cubos de tiempo pequeños, o al procesamiento de operaciones complejas que impliquen altos valores del tiempo de ejecución unitario.
 - Centros de Trabajo poco flexibles, donde se pueden ejecutar una reducida variedad de operaciones. Disminuye así la necesidad de dedicar tiempo al ajuste de aquél, incidiendo en la fiabilidad del resultado, a través de la probabilidad de que se precise tiempo de preparación.
 - Utilización de equipos muy automatizados, que consigan bajos niveles de dispersión del tiempo de ejecución y desplazamiento unitario (por ejemplo con el uso de cintas transportadoras), del tiempo de preparación, de los factores de eficiencia y utilización de los Centros de Trabajo y de los valores de los factores de aprovechamiento de las operaciones.

- Bajos niveles de dispersión de los valores del tiempo de preparación, para las distintas operaciones que se realicen en un mismo Centro de Trabajo.
 - Todas las actividades asignadas a un determinado periodo quedan concluidas dentro de él. El cumplimiento de esta consideración depende de las características propias del proceso productivo (principalmente de los tiempos de cola, desplazamiento, ejecución y preparación), así como del tamaño de lote (existiendo mayor riesgo de distribución de la carga entre varios periodos, cuando el tamaño de lote es grande).
 - Horizonte de planificación dividido en pocos cubos de tiempo (tamaños grandes de periodos o tiempo de planificación pequeño), reduciéndose, de esta manera, el número de variables incluidas en el sistema.
 - Amplio margen de variación permitido, tolerado por la disponibilidad de equipos productivos no sobreutilizados, polivalencia de trabajadores y posibilidad de aumentar o reducir la capacidad de forma rápida.
- d) En el caso de que se cumpla el producto de los factores de utilización y eficiencia, y por tanto, coincida la capacidad disponible planificada con la real, se incrementa la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga desarrollado por CRP, ya que el número de variables aleatorias que inciden en su cálculo se ve reducido (ver expresión 4.44.). Lógicamente, existe una correlación positiva entre la probabilidad de cumplimiento y el margen de variación que la empresa establezca, resultando menos fiable la planificación que permita menores diferencias con la realidad.
3. En relación con el **modelo alternativo propuesto para la Planificación de la Capacidad a corto plazo en configuraciones por lotes basado en la filosofía de CRP, así como con su eficiencia en relación con la de éste:**
- a) El número de variables empleadas por el modelo propuesto es sensiblemente inferior al empleado por CRP. La reducción que se consigue varía en función de la complejidad del caso (ver Apartado 5.6.3. y Anexo 5), de manera que:

- La máxima reducción se producirá en aquellos casos en que la actividad productiva de la empresa sea más compleja (es decir, cuanto mayor sea el número de operaciones que realiza cada Centro de Trabajo, el número de inspecciones a realizar a cada lote, el número y tamaño de las esperas a la entrada y salida de cada Centro, etc.), produciéndose la mínima en los casos más simples (cuando cada Centro de Trabajo realiza una sola operación, y no se producen colas de espera ni a la entrada ni a la salida de los mismos, y tampoco se realizan inspecciones de los lotes).
- Existe una relación entre la reducción del número de variables a emplear conseguida por el modelo propuesto y:
 - o El número de Centros de Trabajo empleado. La reducción de variables que se logra con el modelo propuesto es menor, cuando aumenta el número de Centros de Trabajo, si bien este efecto se ve suavizado, porcentualmente hablando, cuando se procesan un mayor número de lotes de ítems (más tipos de ítems o superior número de lotes de cada uno de ellos). Esta relación inversa entre el número de Centros y la reducción en el porcentaje de datos es debida a que el número de variables aleatorias relacionada con aquellos (eficiencia y utilización) es fijo e independiente de la técnica empleada para la planificación, por lo que cuanto mayor sea el número de Centros, menor será el porcentaje de diferencia de variables.
 - o El número de lotes a procesar. La reducción en el número de variables es proporcional al total de *lotes* de cada ítem que se procesen durante el horizonte de planificación.
 - o El número de operaciones por ítem. Su efecto en la reducción de variables aleatorias es distinto, según analicemos entornos productivos más o menos complejos. Así, en el primero de los casos, las ventajas aumentan con el mayor número de operaciones por ítem; sin embargo, para configuraciones más simples, el efecto es el contrario, obteniéndose menores beneficios cuando se incrementa el número de operaciones por artículo.
 - o El total de ítems distintos que elabore la empresa. Esto afecta positivamente al cambio de técnica, potenciándose

la disminución de variables aleatorias en aquellas empresas que produzcan un mayor número de artículos (componentes semiterminados y productos finales).

- o La amplitud del horizonte de planificación. Existe una relación directa entre éste y el total de variables aleatorias, si bien en términos porcentuales de reducción de variables por el cambio de técnica, la relación es inversa. Esto se debe a que el número de datos relacionados con los periodos, son los mismos independientemente de la técnica aplicada (factores eficiencia y utilización), por lo que el efecto sobre el total de variables aleatorias se reduce al aumentar el volumen total de éstas.
- b) Teóricamente al menos, la planificación desarrollada mediante el modelo propuesto, deberá ser más eficiente desde el punto de vista de su probabilidad de cumplimiento, que la elaborada por CRP. Y ello porque:
- Si partimos de la hipótesis de que *es igual la probabilidad de cumplimiento del valor estimado de cada una de las variables empleadas por CRP y por el modelo alternativo propuesto*, dado que en el cálculo de la probabilidad de cumplimiento de los planes elaborados por ambas técnicas [ver expresiones (5.43) y (5.44.)], todas las probabilidades de cumplimiento de dichas variables actúan como multiplicandos, siendo menor el número de los mismos en el caso del modelo propuesto.
 - CRP calcula un exceso de carga, al considerar que en todas las operaciones de la ruta se procesa un número de unidades igual al lote emitido; ver Apartados 5.2.1. y 5.5.6.3.
 - El modelo propuesto, a través del software desarrollado, recalcula automática y continuamente, las diferentes variables aleatorias empleadas para el cálculo del Plan de Capacidad, a medida que se van introduciendo las fechas de entrada y salida en los Centros de Trabajo de los lotes que se van procesando, por lo que las estimaciones de dichas variables se mantienen continuamente actualizadas (ver Apartado 5.2.). Por el contrario, el software CRP no actualiza los valores de sus variables automática y constantemente, sino que han de ser calculados tras nuevos estudios, e introducidos por el planificador en el sistema, lo que puede generar unas variaciones más que proporcionales

en la Planificación de Capacidad, reduciéndose la utilidad del Plan de Carga elaborado.

- Las variables son estimadas por el modelo propuesto a través de la población, lo que evita los errores inherentes al muestreo necesario para estimar algunas de las variables que emplea CRP (tiempos de ejecución, preparación, desplazamiento, etc.; ver Apartados 5.2. y 5.5.3.), así como los que se derivan de las hipótesis simplificadoras de la Teoría de Colas que también ha de emplear para la estimación de otras variables (tiempo de cola o de espera; ver Apartados 3.4., 5.5.2.6. y 5.5.2.7.).
 - Se evitan muchos errores humanos propios de la toma de datos, tanto en los tiempos anotados como en los ritmos de trabajo considerados por los analistas (afectados por la subjetividad), al tomar las mediciones para las muestras a partir de las cuales se han de estimar las variables en CRP (ver Apartados 3.3. y 5.5.2.). Con el modelo propuesto no es necesario tomar tantas muestras. Los tiempos de entrada y salida de los Centros de Trabajo que son necesarios, son tomados en éstos por los mismos operarios, de manera que automatizando el proceso mediante lectores de códigos de barras, la introducción de datos erróneos se reduciría muchísimo; ver Apartado 5.2.
 - El software elaborado proporciona herramientas para poner de manifiesto la existencia de desviaciones concretas o tendencias inusuales, de los valores introducidos en la base de datos y de los calculados para las variables a estimar, lo que ayuda a detectar anomalías o el uso de valores erróneos de dichas variables en los cálculos (ver Apartado 5.4.2.2.).
- c) Teóricamente al menos, el modelo propuesto debería ser más eficiente que CRP, desde el punto de vista de la facilidad de implementación y utilización, porque:
- La mecánica de cálculo es sensiblemente más simple que la de CRP. Como pudimos demostrar en el Apartado 5.5.5., la Figura 5.26. nos permitía poner de manifiesto la simplificación alcanzada en los cálculos necesarios para desarrollar la programación de la carga con el modelo propuesto en relación con CRP, no sólo por el volumen de datos que es necesario emplear, sino además por el menor número de cálculos

necesarios para la determinación del valor y asignación de la carga.

- El cálculo de los valores medios a emplear en el caso del modelo propuesto para la determinación del Plan de Carga, es mucho más fácil que en el caso de CRP. Para la aplicación de este último (ver Apartado 5.5.2.), la empresa necesita recurrir a la estimación de todas y cada una de las variables aleatorias que emplea, utilizando para ello, alguna de las técnicas de Medición del Trabajo o la aplicación de la Teoría de Colas. Además, para que los tiempos estimados sean realistas y no se queden desfasados, estos estudios deberían hacerse con asiduidad, lo que, además de suponer un alto coste para la empresa, implica la necesidad de disponer de personal especializado para estimar las variables aleatorias, emplear mucho tiempo en elaborar los datos, tomar las observaciones de las muestras, etc. Por el contrario (ver Apartado 5.5.3.), con la mecánica de cálculo del modelo propuesto, se logra una mayor facilidad de obtención de la información necesaria para el desarrollo de la Planificación de Capacidad, ya que requiere tan sólo el tiempo de entrada de los lotes en cada Centro de Trabajo y el de carga y, a partir de ellos, el software elaborado calcula automáticamente sus valores medios y los mantiene actualizados.

d) Teóricamente al menos, el modelo propuesto debería ser más eficiente que CRP, desde el punto de vista del coste, porque:

- Requiere menor tiempo de computación, dado que, en comparación con CRP precisa de menos cálculos y más simples para la determinación de las cargas y para su distribución en el tiempo, y utiliza un menor número de variables.
- Reduce mucho la necesidad de personal especializado para estimar los valores medios de las variables aleatorias, ya que la determinación de los valores estimados mediante muestras se circunscriben a los factores de eficiencia y utilización. El resto de variables son determinadas por el programa a partir de los datos recogidos por los operarios de los Centros de Trabajo, incluso mediante el uso de lectores de códigos de barra.
- También, por los mismos motivos que en la ventaja anterior, reduce el tiempo necesario para la toma de datos, tanto para la determinación de los valores medios de las variables para la

implementación del sistema, como para mantener actualizados dichos valores, una vez aquél entre en funcionamiento.

- En general, reduce el coste de la gestión de la capacidad. El inconveniente de CRP relativo a la gran cantidad de datos que es necesario estimar mediante muestreos, como vimos en el Apartado 5.5.6.3., hace necesarias una gran cantidad de horas para realizar dichos estudios cada vez que se deseen actualizar los datos. El modelo propuesto, sin embargo, calcula automáticamente los valores de las variables necesarias.
- e) Teóricamente al menos, el modelo propuesto debería ser más eficiente que CRP, desde el punto de vista de la **eficiencia de la actividad del planificador**, no sólo porque tarda menos en obtener los planes, sino además, porque (ver punto 6.B. del Apartado 5.8.1.):
- La actualización constante de las estimaciones que hace el modelo propuesto deriva en un mecanismo de retroalimentación, con el que el sistema aprende de los errores, mientras CRP realiza una planificación ciega, sin tener en cuenta los cambios que se hayan podido producir en la realidad.
 - El programa informático, además de elaborar la planificación detallada de capacidad, estima los tiempos de suministro y desarrolla el Programa de Operaciones, ofreciendo al planificador información relevante en relación a la posible ocupación de los Centros de Trabajo, permitiéndole tomar la medidas oportunas incidiendo sobre los tamaños de lote o fechas de emisión.
 - La información relativa a los cambios en las variables aleatorias necesarias para el modelo alternativo propuesto, conocida a través de los datos históricos, nos permite, no sólo la realización de una Planificación de Capacidad más actualizada, sino también poder descubrir valores extremos o tendencias que nos indiquen problemas en el proceso.
 - El planificador puede analizar la fiabilidad de la planificación elaborada con el modelo propuesto a través del estudio de la evolución de las desviaciones de las cargas reales frente a las planificadas, lo cual ofrece una importante herramienta de autodiagnóstico.

- La aplicación informática desarrollada proporciona una importante herramienta de simulación de las cargas y fechas de entrega.
 - El software propuesto informa sobre los efectos que pueden tener sobre el tiempo de suministro las decisiones tomadas por los distintos subsistemas de la empresa, siempre que éstas generen tendencias o valores inusuales en los tiempos utilizados para el desarrollo de la Planificación.
4. En relación con el **modelo alternativo propuesto y su adecuación a las pequeñas y medianas empresas**, teóricamente al menos, dicha adecuación debería ser mayor que la de los sistemas CRP, porque tan sólo es necesario que se incorpore la información del Plan de Materiales y no es preciso, que la empresa tenga implantado un sistema ERP, como en el caso de CRP, lo que hace que muchas pequeñas y medianas empresas no puedan permitirse el coste que esto implicaría. El modelo propuesto podría proporcionarles una herramienta muy sencilla de instalar y utilizar, desarrollada con una interfaz amigable y para un sistema operativo de uso común en este tipo de empresas (Windows XP, etc.), en un software que muchas de ellas ya tienen disponible (Microsoft Access), con bajos requerimientos de hardware y de personal técnico especialista y, por tanto, con un coste de implementación y uso muy inferior a CRP. Todo ello además de que, como hemos expuesto en los puntos anteriores, tiene una mecánica de cálculo más simple, requiere menos información, calcula automáticamente los valores medios de la mayoría de las variables, conlleva un menor empleo de tiempo y recursos financieros y humanos, etc.

6.2. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación reflejada en este trabajo se encuentra sujeta a una serie de limitaciones, propias de la necesidad de establecer hipótesis y restricciones que limiten la amplia variedad de situaciones que se pueden dar en las empresas con configuraciones productivas por lotes. Aunque tales limitaciones se han estado refiriendo a lo largo de los distintos capítulos que componen este trabajo de investigación, a modo de resumen pasaremos a continuación a agruparlas.

1. En primer lugar debemos señalar una limitación importante **en relación con la contrastación empírica del modelo propuesto**. Realmente nos ha sido imposible poder hacer una aplicación práctica de nuestro modelo, habida cuenta de que ello exigía la colaboración de una empresa que empleara CRP, y que estuviera dispuesta a sustituirlo por nuestro modelo durante un prolongado periodo, o que utilizara durante el mismo en paralelo los dos sistemas. Ello, obviamente, supondría un esfuerzo durante año y medio o dos años como mínimo, por parte de la empresa afectada, tanto de recursos como de gestión, por lo que es comprensible que ninguna se prestara fácilmente a tal implantación. Como consecuencia, no hemos podido ofrecer resultados prácticos de la utilización del modelo, no pudiéndonos mover más allá del desarrollo realizado en el campo teórico; de ahí que, en la mayoría de las conclusiones aportadas, hayamos comenzado siempre con la frase “teóricamente al menos”, habida cuenta de que no hemos podido contrastarlas en la práctica.
2. En relación con el **estudio de la probabilidad de cumplimiento de la Planificación de Capacidad de ambas técnicas**, se han adoptado una serie de simplificaciones, las cuales podemos resumir de la forma siguiente:
 - a) Para considerar que se ha realizado una planificación fiable se exige el cumplimiento de cada una de las cargas por separado. No se considera la posibilidad de compensación de valores entre las cargas asignadas a un mismo periodo. Este criterio, que puede considerarse demasiado restrictivo, se fundamenta en el hecho de que la Planificación de Capacidad no debe cumplirse por casualidad.
 - b) Utilización, tan sólo, de los lotes emitidos, no de los lotes en proceso. Lo que aumentaría en número de multiplicadores en la fórmula de la probabilidad y, con ello, se reduciría el valor de ésta.
 - c) La probabilidad de cumplimiento se ha calculado para el caso de utilización de la programación hacia delante. Ello conlleva unos mayores tiempos ociosos tras la terminación del lote, lo que implica menores riesgos de retrasos.
 - d) Se tomó como hipótesis que las cargas asignadas a un periodo no se adelantarán, asumiendo la empresa los costes por ociosidad.
 - e) Se consideró que existe independencia de los cumplimientos del Plan de Carga de un ítem con otros con los que comparta algún Centro de

Trabajo, y de la planificación elaborada para los distintos lotes de un mismo artículo.

Exceptuando la simplificación expuesta en el punto a), todas las demás que se han empleado para el desarrollo analítico de la probabilidad de cumplimiento, deben provocar un resultado de la fiabilidad superior al real. No obstante y dado que los criterios anteriores se tomaron para el análisis de la fiabilidad de CRP y del modelo propuesto, no afectarían a la comparación de ambas probabilidades de cumplimiento.

3. En relación con las **limitaciones de la mecánica de cálculo del modelo propuesto**, señalaremos a continuación, aquellas limitaciones que son propias de la técnica diseñada², y que no debería tener CRP. En concreto:

- a) En el desarrollo de la mecánica de cálculo del modelo propuesto en este trabajo, para la distribución de las cargas se ha tomado como criterio la programación hacia delante, donde se asignan los tiempos a partir de la fecha de emisión. Ello conlleva unos mayores tiempos ociosos tras la terminación del lote, lo que implica menores riesgos de retrasos. Sin embargo, el modelo también podría aplicarse si la empresa tiene instaurado un sistema de programación hacia atrás³.
- b) Consideramos que la principal fuente de controversia que podría tener el modelo propuesto, se centra en la utilización de datos históricos para las estimaciones de las variables que influyen en la planificación, lo cual puede conllevar algunos inconvenientes que se verían reducidos con un adecuado tratamiento de la información almacenada. Los principales errores en las estimaciones pueden originarse por:
 - La representatividad de los datos históricos. En el procedimiento seguido para los cálculos de los valores medios de las variables aleatorias se toman todos los datos que existan sobre ellas en las bases de datos. Esto puede originar un doble problema: el

² Entre las limitaciones comunes a ambas técnicas podemos incluir:

- La necesidad de tener claramente definidas rutas de fabricación únicas por ítem, no permitiéndose rutas alternativas, ya que calculamos los tiempos de carga por Centro de Trabajo.
- No toman en consideración el valor real que puede tomar el tiempo de preparación para el cálculo del tiempo de carga y la fecha de entrega.

³ En estudios realizados sobre empresas que utilizan CRP se ha puesto de manifiesto que las compañías suelen utilizar con más frecuencia la programación hacia atrás (Jonsson y Mattsson, 2002, p. 94).

número de datos podría ser insuficiente (como podría ocurrir en las primeras planificaciones) y, además, podrían desvirtualizarse a causa de los cambios en el proceso productivo (sustituciones de máquinas que afecten al tiempo de ejecución o variación en la calidad de las materias primas, por ejemplo). En este último caso se deberán eliminar todos aquellos registros que no reflejen la situación actual de la empresa. Este inconveniente es común a cualquier técnica de Medición del Trabajo o Teoría de Colas, que son empleadas para la estimación de los valores medios de las variables por CRP y otras técnicas de Planificación de la Capacidad.

- Los diferentes ritmos de actividad que pueden tener los trabajadores⁴. El estudio de los datos históricos no distingue la rapidez de los trabajadores, por lo que para tener en cuenta los diferentes ritmos de actividad se utiliza el factor eficiencia. La aleatoriedad de tales ritmos se reduce en gran medida en Centros de Trabajo con altos niveles de automatización y gran número de trabajadores, de manera que se compensen los ritmos de trabajo entre ellos.
4. En relación el **software elaborado en el modelo propuesto**, asumimos que presenta una serie de limitaciones que, de otro lado, consideramos que son propias de un prototipo, tales como que el tiempo máximo de procesamiento de una operación a un lote es de cuatro periodos, que trabaja con un único turno por Centro de Trabajo, que se asume el traslado de lotes completos y no de parte de ellos, o que se considera únicamente la programación hacia delante. Por supuesto, todas ellas son fácilmente subsanables para adaptarlo a las características de cualquier empresa, aunque es nuestro propósito el desarrollo futuro de una versión más flexible que pueda asumir todas las características de los sistemas productivos más habituales.

6.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Existen dos claras líneas de desarrollo futuro de nuestra investigación, que se derivan palmariamente de las limitaciones anteriormente expuestas:

⁴ Tan sólo el *Estudio de Tiempos* y el *Muestreo de Trabajo*, de todas las técnicas de Medición del Trabajo, incluyen al análisis de los ritmos.

- a) La primera estaría centrada obviamente, en el estudio de la aplicación práctica del modelo propuesto. Una vez podamos validar nuestra propuesta como resultado de las publicaciones que esperamos lograr a partir de nuestro trabajo, intentaremos lograr un pequeño grupo de empresas dispuestas a colaborar en un proyecto de investigación dirigido a implementar y usar durante un cierto periodo de tiempo, el modelo propuesto en vez de CRP o en paralelo a este. Como alternativa, si lo anterior no fuera posible, intentaríamos lograr este proyecto con alguna de las empresas fabricantes de programas ERP, para que añadiera nuestro sistema de planificación de la capacidad como un módulo alternativo a CRP en su software, y que lo ofreciera inicialmente de forma gratuita a sus clientes, a cambio de proporcionar información sobre los resultados. Aunque somos conscientes de la dificultad de este objetivo, entendemos que debemos intentarlo.
- b) La segunda se refiere a la mejora y ampliación del programa informático que automatiza la técnica de Planificación de Capacidad propuesta en este trabajo, de manera que sea capaz de asumir todas las características de los modelos productivos más habituales, empleados por las empresas que trabajan en configuraciones por lotes, mejorar la fiabilidad de las estimaciones, y desarrollar herramientas que ofrezcan un mayor valor añadido al sistema informático. En concreto, se trataría de:
- Elaborar tablas de frecuencia para los distintos valores de dichas variables aleatorias, tomando como base la disponibilidad de los datos históricos de las variables que inciden en el desarrollo de la Planificación de Capacidad. Con ello se desarrollará una herramienta que permita calcular el Plan de Carga y los tiempos de suministro, para una determinada probabilidad de cumplimiento seleccionada por la empresa. Además, lograríamos que, una vez realizada la Planificación de Capacidad, el propio sistema ofrezca la fiabilidad de ésta, proporcionando la probabilidad de que la carga sea menor a la capacidad disponible. Igualmente el planificador podría disponer, en todo momento, de información sobre la probabilidad de entrega a tiempo (fecha de finalización igual o inferior a la fijada con el cliente).
 - Mejorar las estimaciones, incluyendo la incidencia del orden de los lotes que se encuentren en proceso en el cálculo de los tiempos entre

operaciones (debido a la influencia del criterio de entrada en el Centro de Trabajo), incluso en el tiempo de carga (a través del efecto sobre el tiempo de preparación). Para ello será preciso considerar todos los ítems que utilizan dicho Centro para la ejecución de alguna de las operaciones de su ruta, de manera que, para cada combinación de tamaños de lote emitidos durante el tiempo de suministro, de todos los ítems analizados, será necesario disponer de una tabla de frecuencia con los tiempos producidos. El total de combinaciones o variantes posibles de lotes en proceso está relacionado con la flexibilidad del Centro de Trabajo (lo cual afecta al número de operaciones distintas que se pueden ejecutar en él), la amplitud de los tiempos medios de suministro de los ítems que utilizan el Centro, y la variabilidad de tamaño de los lotes, reduciéndose ampliamente en el caso de utilización de la técnica EOQ, o lote económico⁵, como técnica de dimensionado.

- Permitir que el planificador elija el tipo de programación que desea aplicar para cada ítem, pudiendo, de esta forma, diferenciar los artículos donde se quiere reducir el riesgo de incumplimiento de la entrega (utilizando la programación hacia delante) o los tiempos ociosos (aplicando programación hacia atrás).
- Intentar que el programa se pueda adaptar lo más posible a las características de la empresa, permitiendo la importación de datos del sistema de Gestión y Control de la Producción, automatizando la entrada del Plan de Materiales, la actualización de la planificación temporal y las características de operaciones y Centros de Trabajo, la elección del momento de emisión del lote (dentro del periodo), la fijación del número máximo de periodos por operación⁶, la ampliación del número de turnos o grupos de trabajo dentro de cada Centro, a los que se les identifique con distintos valores de eficiencia y utilización, y la posibilidad de elección entre traslados de ítems, una vez procesados, o de lotes completos.

⁵ Con esta técnica se reduce la variabilidad del tiempo de suministro, al mantener constante el tamaño de lote. Véase Hopp, Spearman y Woodruff (1990, pp. 81-83).

⁶ Interesa optimizar este valor ya que un menor número de periodos acelerará el procesamiento de los datos y, con ello, la obtención de la Planificación de Capacidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GELDERS, L. F. y VAN WASSENHOVE, L. N. (1982), "Hierarchical Integration in Production Planning: Theory and Practice", *Journal of Operations Management*, Vol.3, No. 1, pp. 27-35.
- HOPP, W.J., SPEARMAN, M.L. y WOODRUFF, D.L. (1990), "Practical Strategies for lead time reduction", *Manufacturing Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 78-84.
- JONSSON, P. y MATTSSON, S. (2002), "Use and applicability of capacity planning methods", *Production and Inventory Management*, Vol. 43, No. 3/4, pp. 89-95.
- MOLINDER, A. y OLHAGER, J. (1998), "The effect of MRP lot sizing on actual cumulative lead times in multi-level systems", *Production Planning & Control*, Vol. 9, No. 3, pp. 293-302.

ANEXOS

ANEXO

1

GUÍA BREVE DE INSTALACIÓN Y MANUAL DE USUARIO

A1.1. INSTALACIÓN DEL PROGRAMA

A1.1.1. Requisitos del sistema

Para instalar el programa se necesita un ordenador con sistema operativo Microsoft® Windows® XP o superior y la base de datos Microsoft® Access®, incluida en el paquete Microsoft® Office® XP o superior y un lector de CD-ROM.

A1.1.2. Instalación desde el CD-ROM

Introduzca el CD-ROM, que se acompaña al final de este manual, en la unidad lectora de CD-ROM y copie el archivo del programa en el directorio que desee dentro de su ordenador. El programa que se adjunta con este trabajo de

investigación incluye un ejemplo que permite observar el funcionamiento del mismo.

A1.2. EJECUCIÓN DEL PROGRAMA

Para ejecutar el programa tan sólo debe hacer doble clic en el archivo que ha grabado en su ordenador. En este momento puede aparecer una alerta en la pantalla con un mensaje similar a este: “Puede que este archivo contenga código diseñado para dañar su equipo y no sea seguro. ¿Desea abrir el archivo o cancelar la operación?” Pulse el botón abrir y le aparecerá la pantalla de presentación del programa, en la que se muestra diversa información sobre la aplicación (Ilustración A1.1.).



Ilustración A1.1. Pantalla de presentación del programa.

Haciendo clic sobre el icono de “Entrar en la aplicación” aparece la pantalla de inicio de sesión (Ilustración A1.2.) en la que se le solicita que introduzca el nombre del usuario autorizado y su contraseña para poder acceder a la aplicación. En este programa prototipo el usuario es “tesis” y la contraseña “tesis”.

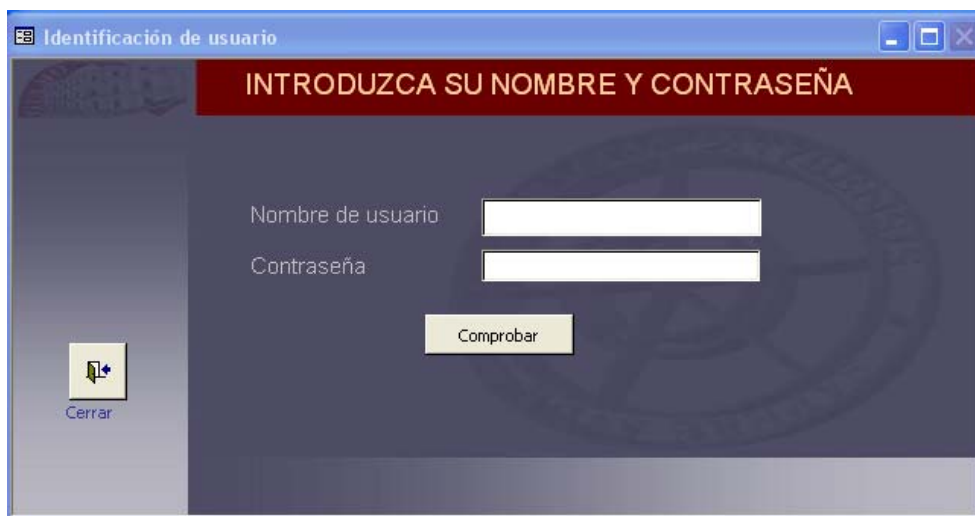


Ilustración A1.2. Pantalla de identificación del usuario

Tras identificarse correctamente, deberá seleccionar una opción de las tres que le presentan en pantalla el menú principal (Ilustración A1.3.):

- Introducir o cambiar datos del proceso productivo: permite identificar las características propias del proceso productivo de la empresa.
- Introducir información de las operaciones de los lotes en proceso: interfaz con el operario de planta para la introducción de los datos de las operaciones.
- Planificación de capacidad y tiempo de suministro: donde, tras introducir el Plan de Materiales, permite obtener el Plan de Carga y la planificación de los tiempos de suministro, así como analizar la exactitud de dichas planificaciones.

A1.2.1. Introducir o cambiar datos del proceso productivo

Tras hacer clic en esta opción se mostrará el menú para la gestión de datos del proceso productivo (Ilustración A1.4.) donde se permite introducir o modificar los datos relativos a los Centros de Trabajo, operaciones o a la planificación temporal.

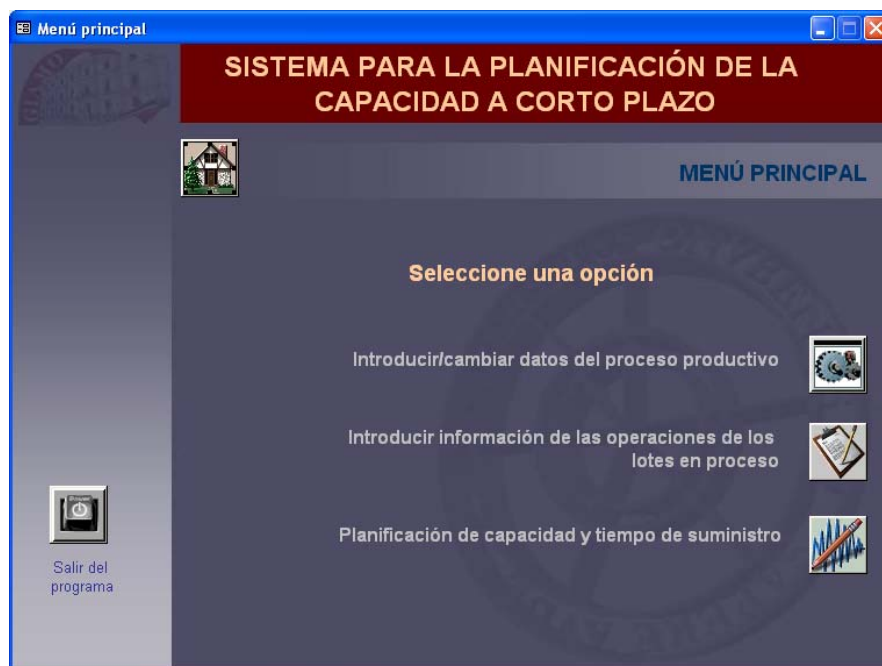


Ilustración A1.3. Menú principal.



Ilustración A1.4. Menú para la gestión de datos del proceso productivo.

A1.2.1.1. Los Centros de Trabajo

Se considera Centro de Trabajo a cualquier unidad productiva identificable; en función del caso, podrá incluir una máquina, un conjunto de ellas, un taller, un conjunto de talleres o, incluso, una instalación completa. Para cada uno de ellos es preciso conocer los siguientes datos (Ilustración A1.5.):

- Centro: donde se incluirá el código identificativo del Centro de Trabajo.
- Número de turno: en este prototipo del programa cada Centro de Trabajo alberga un único turno, dejando, para posteriores versiones, la posibilidad de especificar más turnos de trabajo
- Hora de comienzo y finalización del turno: fijando la hora, minuto y segundo en la que comienza o termina. Se ha tomado el formato de 24 horas, por lo que los valores oscilarán entre las 0:00:00 y las 23:59:59.
- Trabajadores con máquinas: operarios destinados a la manipulación de maquinaria.
- Máquinas: total de máquinas disponibles en el Centro, aun cuando no puedan ser utilizadas simultáneamente.
- Trabajadores por máquina: operarios necesarios para el funcionamiento de una máquina.
- Trabajadores independientes: número de operarios que pueden ejercer su trabajo de manera independiente de las máquinas del Centro y que realizan la misma labor que éstas.
- Factor eficiencia: utilizado para incluir el efecto de la variabilidad de la destreza de los trabajadores que realicen una misma tarea y la incidencia, de los distintos niveles de habilidad de un trabajador, en la realización de varias operaciones. Los valores de este parámetro oscilarán entre 0 y 100.
- Factor utilización: se usa para eliminar el tiempo improductivo. El intervalo de variación fijado es 0-100.

Para incluir los datos de un nuevo Centro de Trabajo debe hacer clic sobre el icono “Agregar nuevo turno o Centro de Trabajo”.

Centro	Número de turno	Hora de comienzo	Hora de fin	Trabajadores con máquinas	Máquinas	Trabajadores por máquina	Trabajadores independientes	Eficiencia	Utilización
CT1	1	8:00:00	16:00:00	20	9	2	0	90	87
CT2	1	8:00:00	16:00:00	10	11	1	0	94	95
CT3	1	8:00:00	16:00:00	3	1	3	0	98	91
Finalizac	1	8:00:00	16:00:00						

Ilustración A1.5. Pantalla de introducción de datos sobre los Centros de Trabajo.

Estos datos deben mantenerse actualizados para obtener mejores resultados de la planificación. En este sentido, en lo que se refiere a los Centros de Trabajo, las variaciones más frecuentes se producen en los valores de eficiencia y utilización, los cuales deben ser estimados por la empresa con alguna técnica de medición del trabajo.

A1.2.1.2. Las operaciones

Es necesario introducir los datos de cada una de las operaciones que componen las rutas de fabricación¹ de todos los ítems que elabora la empresa (Ilustración A1.6.).

Los datos referentes al procesamiento de estas operaciones serán utilizados para el cálculo de la carga, su asignación en el tiempo y la determinación del tiempo de suministro. Para averiguar este último precisamos conocer el momento de emisión de cada lote y el de finalización. Con objeto de identificar del instante en que termina un lote será preciso crear una operación ficticia que represente este momento, asignándole un código que, en este programa, debe comenzar por “OF”.

¹ Una ruta está formada por la secuencia de pasos o el camino que debe seguir un ítem (componente o producto final), de un Centro de Trabajo a otro, para ser completado.

The screenshot shows a software window titled 'Operaciones'. It has a dark blue header bar with a small icon on the left and standard window controls on the right. Below the header, there's a red banner with the text 'DATOS DE LAS OPERACIONES' and a small icon. The main area is divided into two sections. The left section, titled 'Código de Operación', contains a large box with the text 'O1'. The right section, titled 'Datos de la operación', contains four input fields: 'Centro de Trabajo' with 'CT1', 'Item' with 'P1', 'Operación Anterior' which is empty, and 'Operación Siguiente' with 'O2'. Below these sections are three buttons: 'Anterior operación' (left arrow), 'Siguiente operación' (right arrow), and 'Agregar nueva operación' (red cross). At the bottom of the window, there's a light blue bar with four icons and labels: 'Volver al Menú Principal' (house icon), 'Menú Anterior' (left arrow icon), 'Ayuda' (question mark icon), and a small box icon.

Ilustración A1.6. Pantalla de introducción de datos de las operaciones.

Para cada operación, ya sea real o ficticia, se debe introducir:

- Código de la operación: identificativo de la operación. Como ya se ha indicado anteriormente, la finalización de una ruta de fabricación debe asignársele un código que comience por “OF” (operación final). Por ejemplo, la terminación de un lote del ítem P1 (entendida como la entrada en almacén o colocación en el lugar donde será utilizado como componente) se podría codificar como OF1.
- Centro de Trabajo: donde se procesa la operación. En el caso de que se estén incorporando los datos de la finalización del lote (operaciones “OF”) el Centro de Trabajo que se debe indicar es “Finalización”.
- Ítem: al que se le ejecuta la operación. Se entiende que cada operación sólo puede realizarse a un ítem, de manera que cuando una misma operación (por ejemplo “cortado de madera”) se realice a dos ítems distintos tendrá diferente codificación.

- Operación anterior en su ruta de fabricación: cuando la operación sea la primera de la ruta no es necesario introducir ningún dato.
- Operación posterior en su ruta de fabricación: cuando la operación sea la última de la ruta la operación siguiente será la que indica la finalización, por tanto deberá comenzar por “OF”. En el caso de que se estén introduciendo los datos relativos a la finalización del ítem (operación “OF”) no incluiremos operación posterior.

Una vez introducidos los datos de las operaciones no será necesario volver a entrar en esta pantalla excepto que, debido a una reconfiguración del proceso productivo, cambien los ítems que fabrica la empresa, las materias primas o los componentes que compra del exterior. Por este motivo es necesario que se mantengan actualizados los datos de las operaciones.

A1.2.1.3. La planificación temporal

En esta pantalla (Ilustración A1.7.) se deben introducir los datos relacionados con la planificación temporal. Se ha diferenciado entre los datos relativos a la duración del horizonte de planificación y los días no laborables.

En el primer bloque de datos, la duración del horizonte de planificación, es necesario incluir:

- Las horas por periodo: horas reales por periodo del horizonte de planificación².
- Días por periodo: número de días que conforman cada periodo del horizonte de planificación.

Con respecto a la información relativa a los días no laborables se debe indicar:

- La fecha no laborable: el formato debe ser DD/MM/AAAA (D: día, M: mes y A: año).

² Intervalo de tiempo para el que se desea realizar la planificación de capacidad.

- La descripción: motivo por el que el día es no laborable: esta descripción es facultativa.

Es necesario que los datos de la planificación temporal se mantengan actualizados ya que afectan directamente a la planificación de capacidad. En este sentido los días no laborables pueden introducirse para periodos amplios, lo que evitaría la continua actualización. En este apartado también se incluye la duración del periodo que se utilizará como cubo de tiempo en la planificación de capacidad a corto plazo, pudiendo la empresa reducirlo o aumentarlo en la medida que desee.

Planificación temporal

PLANIFICACIÓN TEMPORAL

Duración del horizonte de planificación

Horas por periodo: 40
Días por periodo: 5

HORAS POR PERIODO: horas reales por periodo del horizonte de planificación.
DÍAS POR PERIODO: nº de días que conforma cada periodo del horizonte de planificación.

Días no laborables

Fecha	Descripción
12/10/2005	F
15/10/2005	S
16/10/2005	D
22/10/2005	S
23/10/2005	D

Fecha: día, mes y año en el formato DD/MM/AA.
Descripción: S (sábado), D (Domingo), F (Festivo), P (Paradas).

Botones: Cambiar datos, Guardar cambios, Agregar nueva fecha, Volver al Menú Principal, Menú Anterior, Ayuda.

Ilustración A1.7. Pantalla de introducción de los datos de la planificación temporal.

A1.2.2. Introducir información de las operaciones de los lotes en proceso

Con objeto de elaborar la planificación de capacidad basada en los datos históricos actualizados es preciso que los operarios introduzcan los datos de las operaciones que realizan a los lotes en proceso. En este sentido, se diferencian tres posibles estados del lote en un Centro de Trabajo: entrada, comienzo de la

ejecución de una operación y finalización de ésta a todas las unidades que componen dicho lote (Ilustración A1.8).

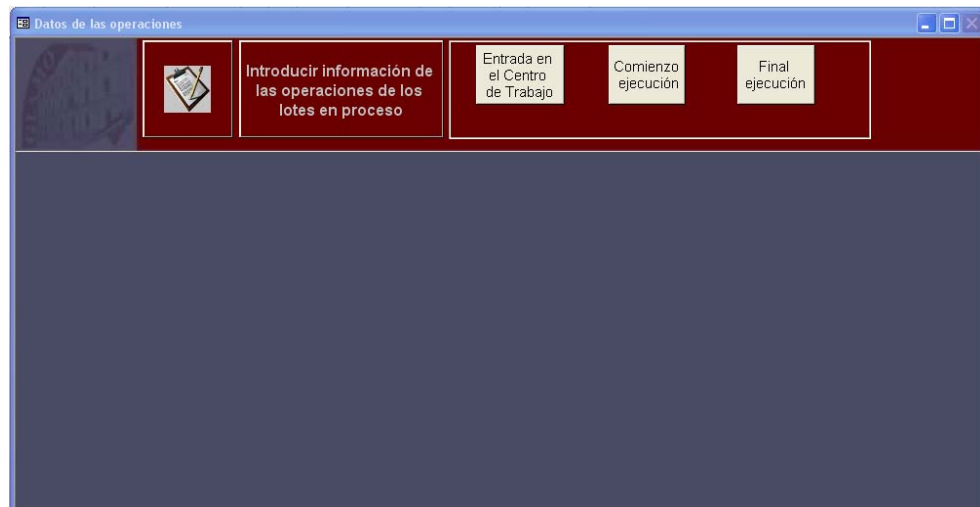


Ilustración A1.8. Pantalla de introducción de datos de las operaciones de los lotes en proceso.

A1.2.2.1. La entrada de un lote

La entrada de un lote se produce cuando ya ha superado la cola de espera y los trabajadores se disponen a ajustar las máquinas (en caso necesario) para la realización de la operación para la que esperaba. Para introducir los datos relativos a la entrada de un lote debe hacer clic sobre el icono “Entrada en el Centro de Trabajo” (véase Ilustración A1.8.). A continuación se deberá hacer constar, según se observa en la Ilustración A1.9., la siguiente información:

- Código de pedido: sirve como identificación del lote. Para evitar errores en la introducción de datos se reflejan, en un menú desplegable, los lotes del Plan de Materiales que no se encuentran en otro Centro de Trabajo (ya que se ha considerado que un lote no avanza en su ruta hasta que han recibido la operación todas las unidades que lo componen). Una vez introducidos estos datos aparecen automáticamente los datos del pedido: ítem, tamaño de lote, periodo de emisión del lote y fecha de emisión.

- Operación que se le va a realizar: a elegir entre las operaciones que se le pueden ejecutar al ítem indicado en el código de identificación y que aún no han sido procesadas.
- Fecha de entrada: se rellena automáticamente por el sistema en función de los datos del ordenador. No obstante puede ser cambiada en caso necesario.
- Hora de entrada: rellena de manera automática por el sistema pero que puede ser cambiada si no coincide con la hora real.
- Unidades a la entrada: refiriéndonos, en este caso, a las que componen el lote justo antes de la preparación del Centro de Trabajo. Éstas pueden ser distintas al tamaño de lote emitido debido al efecto de las unidades defectuosas y a los propios cambios que se producen en el lote a causa del proceso productivo.

Una vez introducidos los datos se debe hacer clic en “Guardar” para que se almacenen en la base de datos del sistema. En el caso de cometer un error al introducir los datos puede hacer clic en el icono “Salir sin guardar”, lo que eliminará todo el registro.

The screenshot shows a software window titled "Datos de las operaciones". At the top, there is a red banner with the text "Introducir información de las operaciones de los lotes en proceso". Below this, the window is divided into several sections. On the left, there are dropdown menus for "Código de pedido" (showing "L018P2") and "Operación" (showing "Q4"). Below these is a box labeled "Datos del pedido" containing fields for "Item" (P2), "Tamaño de lote" (20000), "Periodo de emisión" (18), and "Fecha de emisión" (05/05/2006). In the center, there is a section titled "Entrada en Centro de Trabajo" with a table containing the following data:

Fecha	Entrada	Hora de entrada	Unidades a la entrada
10/10/2006		12:23:59	19860

To the right of this table is a "Guardar" button. At the bottom right, there is an icon of a trash can and the text "Salir sin guardar (este registro será eliminado)".

Ilustración A1.9. Pantalla de introducción de los datos de la entrada de un lote en un Centro de Trabajo.

A1.2.2.2. La ejecución de una operación a un lote

La ejecución de una operación a un lote comienza tras preparar el Centro de Trabajo. Para hacer constar los datos relativos al inicio de este proceso se debe hacer clic sobre el icono “Comienzo ejecución” (Ilustración A1.8.) y, a continuación, elegir el código del ítem que se va a procesar del menú desplegable, donde aparecerán sólo aquellos lotes que han entrado en algún Centro de Trabajo y que no han empezado a procesarse. Automáticamente aparecerán los campos, ya rellenos, del código de pedido, operación ítem, tamaño de lote, periodo de emisión, fecha de emisión, fecha de comienzo y hora de comienzo (Ilustración A1.10.). El operario tan sólo debe comprobar si los dos últimos datos son correctos:

- Fecha de comienzo: por defecto aparecerá la fecha del sistema, pudiendo cambiarse en caso necesario.
- Hora de comienzo de la operación: como en el caso anterior, se rellenará automáticamente con los valores del sistema.

Para que los datos introducidos queden guardados debe hacer clic en el icono “Guardar”.

The screenshot shows a software window titled "Datos de las operaciones". It contains several input fields and buttons. At the top, there is a red header bar with a button labeled "Introducir información de las operaciones de los lotes en proceso". Below this, there are two dropdown menus: "Código de pedido" (set to L017P3) and "Operación" (set to O6). To the left, there is a section titled "Datos del pedido" with fields for "Item" (P3), "Tamaño de lote" (10000), "Periodo de emisión" (17), and "Fecha de emisión" (28/04/2006). In the center, there is a section titled "Ejecución de la operación" with fields for "Fecha de comienzo" (27/02/2007) and "Hora de comienzo" (9:56:21). To the right of these fields is a "Guardar" button. At the bottom right, there is a trash can icon and the text "Salir sin guardar (este registro será eliminado)".

Ilustración A1.10. Pantalla de introducción de los datos del comienzo de ejecución de una operación a un lote.

A1.2.2.3. La finalización de una operación a un lote

Se considerará que una operación ha finalizado cuando se le haya ejecutado a todas las unidades que componen el lote. Para introducir los datos relativos a la finalización, el trabajador deberá hacer clic sobre el icono “Final ejecución” (Ilustración A1.8.) y elegir el lote que se terminará en un listado que incluye todos aquellos que se encuentran en proceso y de los que se tienen datos de comienzo de ejecución. Automáticamente, en la zona izquierda de la pantalla, se reflejará la información relativa al código de pedido, operación que se finalizará y otros datos del pedido (ítem, tamaño, periodo y fecha de emisión). Los nuevos datos de esta pantalla, que se deben incluir, son los siguientes (Ilustración A1.11.):

- Fecha de finalización: aparece automáticamente la fecha del sistema, permitiendo el cambio por parte del trabajador.
- Hora de finalización: toma por defecto los valores del sistema aunque puede ser cambiada si no corresponde con la real.
- Unidades a la salida: tamaño del lote tras la ejecución, tomando sólo las unidades sin defectos.

Esta información debe ser guardada para que queden registrados en la base de datos, por lo que es preciso que haga clic sobre en el botón “Guardar”.

The screenshot shows a software window titled "Datos de las operaciones". At the top, there is a red header bar with a document icon and the text "Introducir información de las operaciones de los lotes en proceso". Below this, the main area has a dark blue background. On the left, there are two dropdown menus: "Código de pedido" with the value "L017P3" and "Operación" with the value "O6". Below these is a box titled "Datos del pedido" containing four fields: "Ítem" (P3), "Tamaño de lote" (10000), "Periodo de emisión" (17), and "Fecha de emisión" (28/04/2008). To the right of these fields is a "Guardar" button. Below the "Guardar" button is a warning message: "Recuerde que debe pinchar en 'Guardar' para que los datos de la operación queden registrados". At the bottom, there is a section titled "Salida del Centro de Trabajo" with three fields: "Fecha de finalización" (27/02/2007), "Hora de finalización" (9:58:00), and "Unidades a la salida" (an empty field). To the right of this section is a trash can icon and the text "Salir sin guardar (este registro será eliminado)".

Ilustración A1.11. Pantalla de introducción de los datos de la finalización de la ejecución de una operación a todas las unidades que componen un lote.

A1.2.3. Planificación de capacidad y tiempo de suministro

El objetivo básico de este programa es la realización de una planificación de capacidad a corto plazo, por lo que, ante todo, debe proporcionarnos un Plan de Carga. Además, también nos permite obtener los tiempos de suministro estimados y una comparativa de los valores reales con los planificados (Ilustración A1.12.).



Ilustración A1.12. Menú para la gestión de la planificación de capacidad y del tiempo de suministro.

El menú para la gestión de la planificación de capacidad y tiempo de suministro se compone de cuatro opciones, una entrada de datos y tres salidas de información:

- Plan de Materiales: donde se debe incluir los lotes emitidos de todos los ítems.
- Elaborar Plan de Carga: realiza la planificación de capacidad.

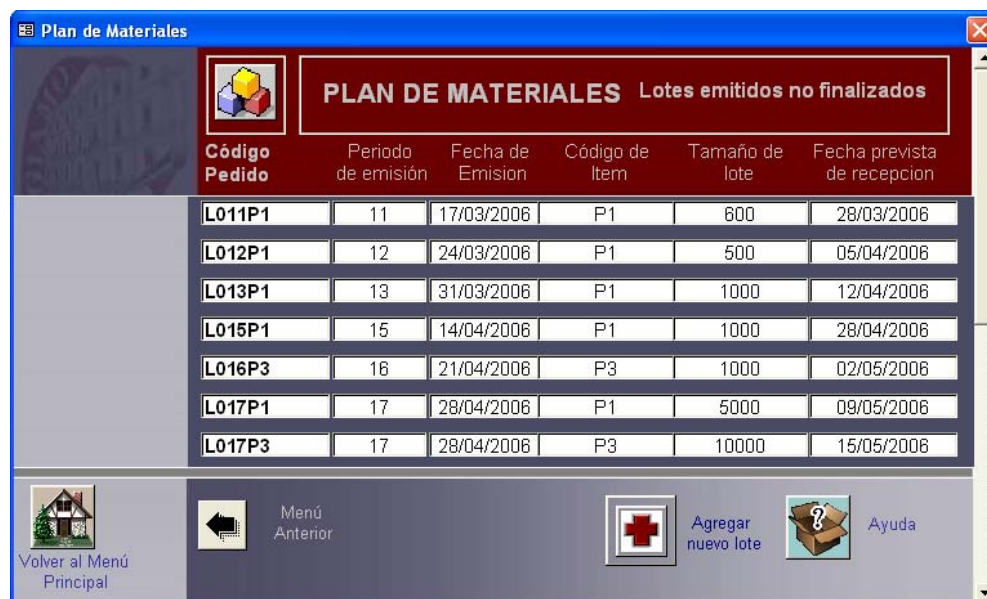
- Tiempos de suministro planificados: con el que se obtienen las previsiones del intervalo de tiempo que transcurrirá desde que se emite el lote hasta que está completamente finalizado.
- Exactitud de las planificaciones: permite realizar análisis y comparativas de los valores históricos de la carga, tiempo de suministro, tiempo de ejecución, tiempo de preparación y factor aprovechamiento.

A1.2.3.1. Plan de Materiales

El Plan de Materiales incluye los lotes emitidos de artículos que fabrica la empresa y que no han sido finalizados. Cada lote se identifica con (Ilustración A1.13.):

- Código de pedido: representativo del lote del ítem que se desea fabricar.
- Periodo de emisión: número identificativo del periodo en el que se realiza la orden de emisión del lote. Este valor es facultativo.
- Fecha de emisión: en formato DD/MM/AAAA (D: día, M: mes y A: año).
- Código de ítem: representativo del artículo que se va a elaborar y que debe coincidir con las denominaciones utilizadas en la pantalla “Operaciones” del “Menú para la gestión de los datos del proceso productivo”.
- Tamaño de lote: número de unidades a procesar en el pedido.
- Fecha prevista de recepción: indicativa de la fecha en la que se estima que finalizará el procesamiento del lote. En formato DD/MM/AAAA (D: día, M: mes y A: año).

La información introducida será guardada automáticamente por el programa. Conforme los lotes van finalizándose se van eliminando automáticamente de la pantalla, pudiéndose recopilar información sobre ellos en la pantalla del “Tiempo de suministro real frente a planificado” del estudio de la “Exactitud de las planificaciones”.



Código Pedido	Periodo de emisión	Fecha de Emisión	Código de Item	Tamaño de lote	Fecha prevista de recepción
L011P1	11	17/03/2006	P1	600	28/03/2006
L012P1	12	24/03/2006	P1	500	05/04/2006
L013P1	13	31/03/2006	P1	1000	12/04/2006
L015P1	15	14/04/2006	P1	1000	28/04/2006
L016P3	16	21/04/2006	P3	1000	02/05/2006
L017P1	17	28/04/2006	P1	5000	09/05/2006
L017P3	17	28/04/2006	P3	10000	15/05/2006

Ilustración A1.13. Pantalla de introducción de los lotes que conforman el Plan de Materiales.

A1.2.3.2. Elaborar Plan de Carga

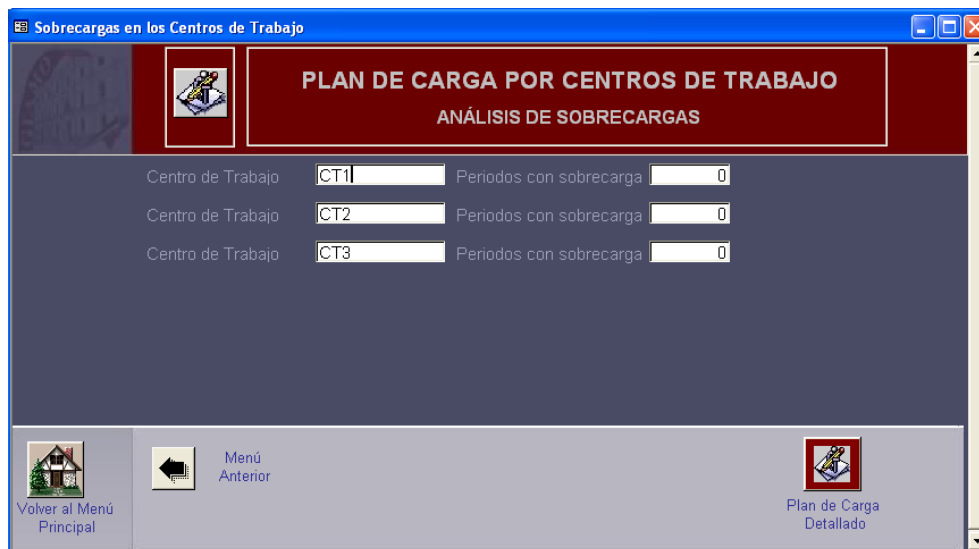
Al hacer clic sobre el icono de “Elaborar Plan de Carga” del menú “Planificación de capacidad y tiempo de suministro” emergerá una pantalla informándole que se requiere algún tiempo para realizar la planificación.

A continuación aparecerá el siguiente mensaje: “¿Desde qué periodo desea la Planificación de Carga?”, donde se le pide que introduzca el primer periodo, del intervalo del horizonte de planificación, sobre el que desea conocer el Plan de Carga.

Una vez fijado el periodo debe hacer clic sobre “Aceptar” y emergerá otro mensaje: “¿Último periodo que desea planificar?”, en el que se le requiere que introduzca el periodo final sobre el que desea conocer la Planificación de la Capacidad. Cuando haya escrito el valor deseado debe hacer clic sobre “Aceptar”.

En el caso de que desee conocer la Planificación para todo el horizonte no es necesario que introduzca ningún valor en los mensajes anteriores, ya que, por defecto, obtendrá la planificación de capacidad completa.

A continuación se presentará la pantalla “Plan de Carga por Centros de Trabajo: análisis de sobrecargas” (Ilustración A1.14.) donde se ofrece información del número de periodos con exceso de carga (con fondo de color naranja en esos casos).



PLAN DE CARGA POR CENTROS DE TRABAJO	
ANÁLISIS DE SOBRECARGAS	
Centro de Trabajo	CT1
Periodos con sobrecarga	0
Centro de Trabajo	CT2
Periodos con sobrecarga	0
Centro de Trabajo	CT3
Periodos con sobrecarga	0

Ilustración A1.14. Plan de carga por Centros de Trabajo: análisis de sobrecargas.

Si desea conocer más exhaustivamente el Plan de Carga debe hacer clic sobre el icono “Plan de Carga detallado” que se encuentra abajo a la derecha; obtendrá, de esta manera, la carga por periodo en los distintos Centros de Trabajo (Ilustración A1.15.). Por defecto la pantalla que aparecerá será la del primer Centro de Trabajo, por orden alfabético, pudiéndose trasladar por los distintos Centros mediante las flechas hacia la derecha (adelante) o hacia la izquierda (atrás); o bien elegir el Centro que desea analizar a través del menú desplegable.

Según se observa en la Ilustración A1.15., la información disponible en el Plan de Carga para cada Centro de Trabajo es la siguiente:

- Desglose: haciendo clic sobre el signo (+) obtendrá información sobre los lotes que originan la carga en el periodo. En concreto conocerá, además del periodo y Centro, el ítem que genera la carga, el tamaño del lote (número de unidades emitidas) y el valor de la carga de cada uno de los lotes que se procesen en el periodo.
- Periodo: número del cubo de tiempo de la planificación.
- Centro de Trabajo: en el que se generará la carga.

- Carga: capacidad necesaria, en horas estándar, para poder elaborar los ítems que indica el Plan de Materiales.
- Capacidad disponible: horas estándar que se pueden generar, en condiciones normales de la empresa, según la información introducida en la pantalla “Centro de Trabajo” del “Menú para la gestión de datos del proceso productivo”.
- Desviación: diferencia entre la carga y la capacidad necesaria. En caso de ser negativa el fondo de la casilla será de color naranja e indica que se precisan más horas de trabajo que las que hay disponibles.
- % Sob/Sub: porcentaje de sobrecarga (carga superior a capacidad disponible) o subcarga (carga inferior a capacidad disponible), indicadora, esta última, de las horas ociosas.



Ilustración A1.15. Plan de carga por Centros de Trabajo: análisis detallado.

En la parte inferior de la pantalla, además de los iconos de “Volver al Menú Principal”, “Menú anterior” y “Ayuda”, aparecen también unos botones que reflejan la posibilidad de acceder a un informe completo y a un Plan de Talleres. En este sentido, si se desea un estudio del Plan de Carga para todos los Centros de Trabajo, se puede hacer clic sobre alguno de los dos iconos que permiten elaborar

un informe completo, ya sea para verlo en pantalla (“Informe completo: ver”), o bien para imprimirlo (“Informe completo: imprimir”).

Por otro lado, si se quiere conocer la carga que genera cada lote dentro de cada Centro de Trabajo deberá hacer clic en el botón de “Plan de Talleres”, tras lo cual aparecerá una pantalla similar a la reflejada en la Ilustración A1.16. En ella se ofrece, para cada Centro, información relativa a los distintos lotes que pasan por él. En concreto se indican:

- Datos identificativos del lote: código de pedido, tamaño y fecha de emisión.
- Op: operación a realizar en el Centro a un lote concreto.
- Carga: capacidad necesaria para realizarle una operación a un lote (tiempo, en horas reales, necesario para procesar el lote). Incluye el tiempo transcurrido desde que entra hasta que sale del Centro de Trabajo.
- Primer periodo: en el que entra el lote en el Centro de Trabajo para que se le realice la operación.
- Día del primer periodo: en el que se inicia el procesamiento del lote con objeto de realizarle una operación concreta.
- Último periodo: cubo de tiempo en que finaliza la ejecución de la operación a todas las unidades que componen el lote.
- Día del último periodo: en el que finaliza completamente el procesamiento de la operación al lote.
- Retraso: número de días de retraso, teniendo en cuenta la fecha actual, en el comienzo de una operación, con respecto a la fecha planificada.
- En proceso: indica si una operación a un lote concreto se ha comenzado y no ha finalizado aún.

Además de la tabla con la planificación de las operaciones a los pedidos previstas en el Centro de Trabajo, también se ofrece en la pantalla una representación gráfica de la entrada y salida de los lotes tras ejecutarles la operación a todas las unidades que los componen (indicándose el código de pedido y la operación a procesar).

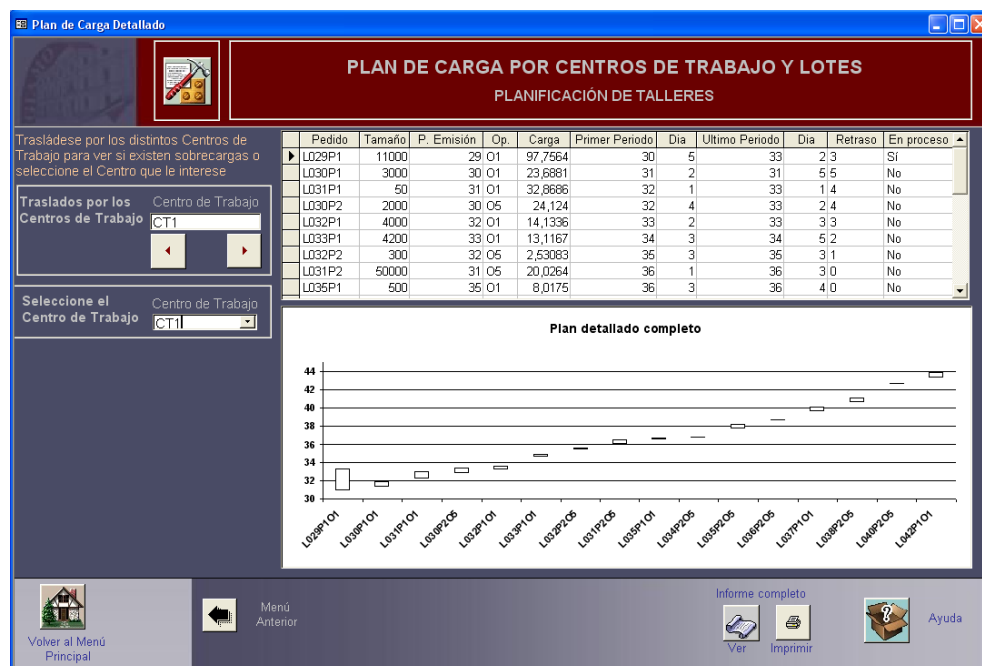


Ilustración A1.16. Plan de carga por Centros de Trabajo y lotes.

A1.2.3.3. Tiempos de suministro planificados

Si en el menú “Planificación de capacidad y tiempo de suministro” (Ilustración A1.12.) se hace clic sobre el icono de “Tiempos de suministro planificados”, emergerá una pantalla informativa con el mensaje: “Se van a calcular los tiempos medios de suministro para los lotes del Plan de Materiales”. Haga clic en “Aceptar” y, a continuación, surgirá la pantalla de “Tiempos de suministro planificados” (Ilustración A1.17.), donde se ofrece el tiempo de suministro para cada pedido del Plan de Materiales, es decir, para los lotes no finalizados. La información se refiere a:

- Código de pedido: identificativo del lote y que coincide con el fijado en el Plan de Materiales.
- Tiempo de suministro planificado: número de días que se estima que transcurrirá desde la fecha de emisión del pedido hasta su finalización,

es decir, hasta que esté en disposición de su uso todas las unidades que componen el lote.

El icono “Imprimir” de pantalla permite obtener un listado, vía impresora, de todos los tiempos de suministro planificados.



The screenshot shows a software window titled "Tiempo de suministro planificado". It contains a table with two columns: "Código de Pedido" and "Tiempo de suministro planificado (días)". The table lists six entries with their respective codes and planned supply times in days. At the bottom of the window, there are several navigation icons and labels: "Volver al Menú Principal" (with a house icon), "Menú Anterior" (with a left arrow icon), "Informe completo" (with a printer icon), and "Ayuda" (with a question mark icon).

Código de Pedido	Tiempo de suministro planificado (días)
L017P1	47,5
L017P3	65
L018P2	70
L018P3	325
L019P1	95
L020P1	1,5

Ilustración A1.17. Pantalla que refleja el tiempo de suministro planificado.

A1.2.3.4. Exactitud de las planificaciones

Al hacer clic sobre el icono “Exactitud de las planificaciones” del menú “Planificación de capacidad y tiempo de suministro” (Ilustración A1.12.) surgirá la pantalla “Menú para la exactitud de las planificaciones” (Ilustración A1.18.) donde puede seleccionar cuatro tipos de análisis: carga real frente a planificada, tiempos de suministro reales frente a planificados, análisis de tendencias y análisis de valores extremos y tendencias en entradas y tiempos de carga.

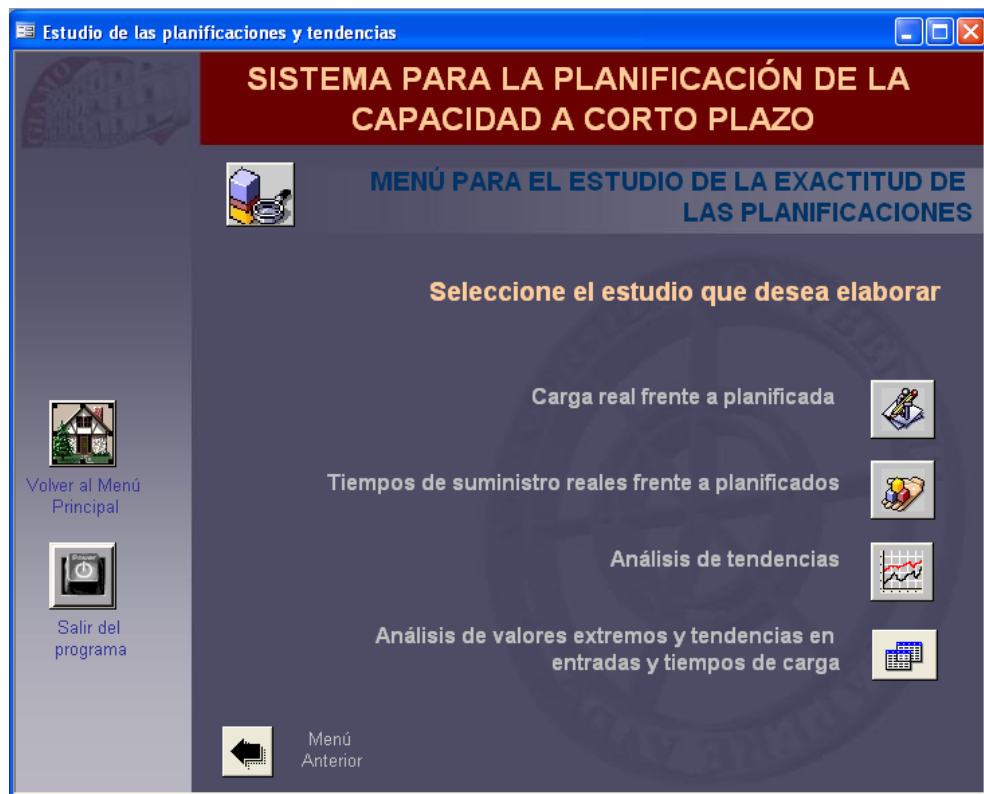


Ilustración A1.18. Menú para el estudio de la exactitud de las planificaciones.

A1.2.3.4.1. Carga real frente a planificada

En la pantalla que emerge tras hacer clic sobre el icono “Carga real frente a planificada” (Ilustración A1.19.) puede trasladarse por los distintos Centros de Trabajo o elegir el que desee para apreciar las diferencias entre la planificación de capacidad elaborada y la carga real que fue necesaria.

Como se observa en la Ilustración A1.19., la información ofrecida es la siguiente:

- Desglose: pulsando sobre el signo (+) que se encuentra a la izquierda de esta columna surge el desglose de la carga real indicándose los lotes que produjeron tales necesidades de capacidad, así como la carga que

generó cada uno de ellos en el periodo y Centro de Trabajo que se estudia.

- Periodo: número identificativo del cubo de tiempo planificado.
- Centro de Trabajo: código del Centro estudiado en la pantalla, según el fijado en la pantalla “Centro de Trabajo” del “Menú para la gestión de datos del proceso productivo”.
- Carga planificada: horas estándar que se estimaron necesarias para elaborar el Plan de Materiales.
- Carga real: horas estándar necesarias realmente para procesar los lotes que incluía el Plan de Materiales.
- Desviación: diferencia entre la carga planificada y la real. Si toma un valor negativo el fondo será de color azul e indica que se estimaron que eran necesarias menos horas de las que realmente se precisaron.
- Capacidad: horas estándar disponibles en el Centro de Trabajo para poder elaborar los lotes incluidos en el Plan de Materiales. Este valor es calculado por el sistema en función de los turnos, trabajadores, máquinas y factores eficiencia y utilización, requeridos en la pantalla “Centro de Trabajo” del “Menú para la gestión de datos del proceso productivo”.
- Sob/Sub real: sobrecarga o subcarga real se calcula por diferencia entre la capacidad y la carga real. Si el valor es negativo el fondo será de color naranja e indica las horas por encima de la capacidad disponible normal, que eran necesarias para cumplir con el Plan de Materiales (sobrecarga). Cuando el valor es positivo refleja las horas ociosas que se generaron en el periodo y Centro de Trabajo de la pantalla (subcarga).

Haciendo clic sobre el botón “Gráfico” de la parte inferior de la pantalla se ofrecen las desviaciones graficadas (Ilustración A1.20.), cuyo estudio puede ser muy interesante para el análisis de tendencias. En este sentido, se han determinado unos límites de control que representan el intervalo de variación de las

desviaciones que se consideraría *normal*³; los cuales se obtienen considerando que el valor deseado de desviación debería ser cero, puesto que en tal caso la carga planificada coincidiría con la real.

$$LCS = VD + 3 \times \sigma$$

$$LCI = VD - 3 \times \sigma$$

Donde:

VD: es el valor deseado, en este caso cero⁴.

σ : desviación típica de los valores históricos de diferencia entre la carga real y la planificada.

Carga real frente a carga planificada

Trasládese por los distintos Centros de Trabajo para ver si existen diferencias o seleccione el Centro que le interese

Traslados por los Centro de Trabajo: CT3

Seleccione el Centro de Trabajo: CT3

	Desglose	Periodo	Centro	Carga Planificada	Carga Real	Desviación	Capacidad	Sob/Sub Real
+	Desglose en (+)	11	CT3	2,53073	33,38155	-30,85082	36	2,61845
+	Desglose en (+)	13	CT3	15	10,72761	4,27239	36	25,27239
+	Desglose en (+)	14	CT3	16,67712	14,31983	2,35729	36	21,68017
+	Desglose en (+)	15	CT3	36,81537	43,96944	-7,15407	36	-7,96944
-	Desglose en (+)	16	CT3	25,43684	82,866	-57,42916	36	-46,866
		Periodo	Codigo pedido	Item	Carga			
		16	L014P3	P3	7,46065			
		16	L014P3	P3	7,4651			
		16	L013P1	P1	9,81822			
		16	L015P1	P1	2,87803			
+	Desglose en (+)	17	CT3	12,06835	13,61553	-1,54718	36	22,38447

Volver al Menú Principal

Menú Anterior

Gráfico

Ayuda

Ilustración A1.19. Comparación de la carga real frente a la planificada.

³ Considerando que función de distribución de las desviaciones se asemeja a una normal.

⁴ También se podrían utilizar unos límites de control menos estrictos que los anteriores, calculando éstos con el valor medio de las desviaciones en vez de utilizar el valor deseado.



Ilustración A1.20. Pantalla con los gráficos representativos de la evolución de las desviaciones del Centro de Trabajo 2.

A1.2.3.4.2. Tiempo de suministro real frente a planificado

Esta pantalla (Ilustración A1.21.) surge al hacer clic sobre el icono “Tiempo de suministro real frente a planificado” y ofrece información sobre la exactitud de las fechas previstas de entrega y los tiempos de suministro planificados, comparando ambos datos con los valores que se produjeron realmente en todos los lotes elaborados y finalizados por la empresa.

Para cada lote emitido por la empresa se dispone de la siguiente información (Ilustración A1.21.):

- Código de pedido: identificativo del lote emitido y fijado al incluirlo en el Plan de Materiales.
- Periodo de emisión: número del cubo de tiempo en el que se emite el lote. Indicado en el Plan de Materiales.

- Fecha de emisión: día, mes y año, en formato DD/MM/AAAA (D: día, M: mes y A: año), en el que se emitió el lote. Determinado al fijar el Plan de Materiales.
- Ítem: código del artículo (componente o producto final) que se obtiene al finalizar la ruta de fabricación.
- Tamaño de lote: número de unidades que hay que procesar para considerar terminado el lote.
- Fecha prevista de finalización del lote: día, mes y año, en formato DD/MM/AAAA (D: día, M: mes y A: año), en el que se estimó que debería haber finalizado el lote. Dato tomado del Plan de Materiales en función de la previsión del planificador.
- Fecha real de finalización del lote: valores reales del día, mes y año, en formato DD/MM/AAAA (D: día, M: mes y A: año), en el que finalizó el procesamiento de un lote. Considerando que queda terminado en el momento que está en disposición de su uso, ya sea para venderse o para utilizarse en la fabricación de otro ítem más complejo.
- Desviación con respecto a la fecha de finalización real del lote y prevista: el valor negativo, en color rojo, indica que se terminó el lote después de la fecha estimada de finalización.
- Tiempo de suministro planificado: estimación del número de días que se consideró que tardaría en elaborarse un lote, desde que se emite hasta que finalizan las operaciones a todas las unidades que lo componen.
- Tiempo de suministro real: número de días que realmente fueron necesarios para elaborar un lote, considerando que este proceso se inicia con la emisión y finaliza cuando están terminadas todas las unidades que componen el lote.
- Desviación con respecto a los tiempos de suministro real y planificado: diferencia, en días, entre la estimación y la realidad. Un valor negativo, en color rojo, indica que se planificaron menos días de los que realmente fueron necesarios.



Código Pedido	Periodo Emision	Fecha de Emision	Item	Tamaño de lote	FINALIZACIÓN LOTE			TIEMPOS DE SUMINISTRO		
					Fecha Prevista	Fecha Real	Desviación	Planificado	Real	Desviación
L009P2	9	03/03/2006	P2	1500	10/03/2006	15/03/2006	-5	11.21052	12	-0.78948
L009P1	9	03/03/2006	P1	100	13/03/2006	24/03/2006	-11	11.33333	21	-9.66667
L009P3	9	03/03/2006	P3	1500	15/03/2006	25/03/2006	-10	8.75	22	-13.25
L010P1	10	10/03/2006	P1	100	24/03/2006	22/03/2006	2	14	12	2

Ilustración A1.21. Comparación del tiempo de suministro planificado frente a real y de las fechas previstas de entrega.

A1.2.3.4.3. Análisis de tendencias

Cuando hace clic sobre el icono “Análisis de tendencia” del menú “Exactitud de las planificaciones” (Ilustración A1.18.) surge una pantalla en la que se ofrece información sobre la evolución de los valores del factor de defectuosas y los tiempos de ejecución, preparación y carga unitario de todas las operaciones que se procesan dentro de la empresa (Ilustración A1.22.).

Trasladándose por las distintas operaciones o eligiendo una determinada se puede observar la tendencia de los valores de las siguientes variables:

- Tiempo de ejecución unitario (te_i): tiempo necesario para realizar la operación a una unidad del lote.
- Tiempo de preparación (tp_{ik}): necesario para ajustar el Centro de Trabajo, con objeto de ejecutar una operación distinta a la realizada con anterioridad. Cuando dos lotes seguidos precisen la misma operación el tiempo de preparación puede llegar a ser cero.
- Tiempo de carga unitario (tc_{ijk}): tiempo necesario para procesar una unidad de un lote. Incluye el tiempo de ejecución y el de preparación.

Si consideramos Q_{ij} como el tamaño de lote, se calcula de la siguiente manera:

$$tc_{ijk} = te_i + \frac{tp_{ik}}{Q_{ij}}$$

- Factor de defectuosas: mide la proporción de unidades defectuosas que se originan tras el procesamiento de la operación. Tomando Q_{ij} como el tamaño de lote a la entrada y Q_{fij} el final, se ha calculado como:

$$d_i = \frac{Q_{ij} - Q_{fij}}{Q_{ij}}$$

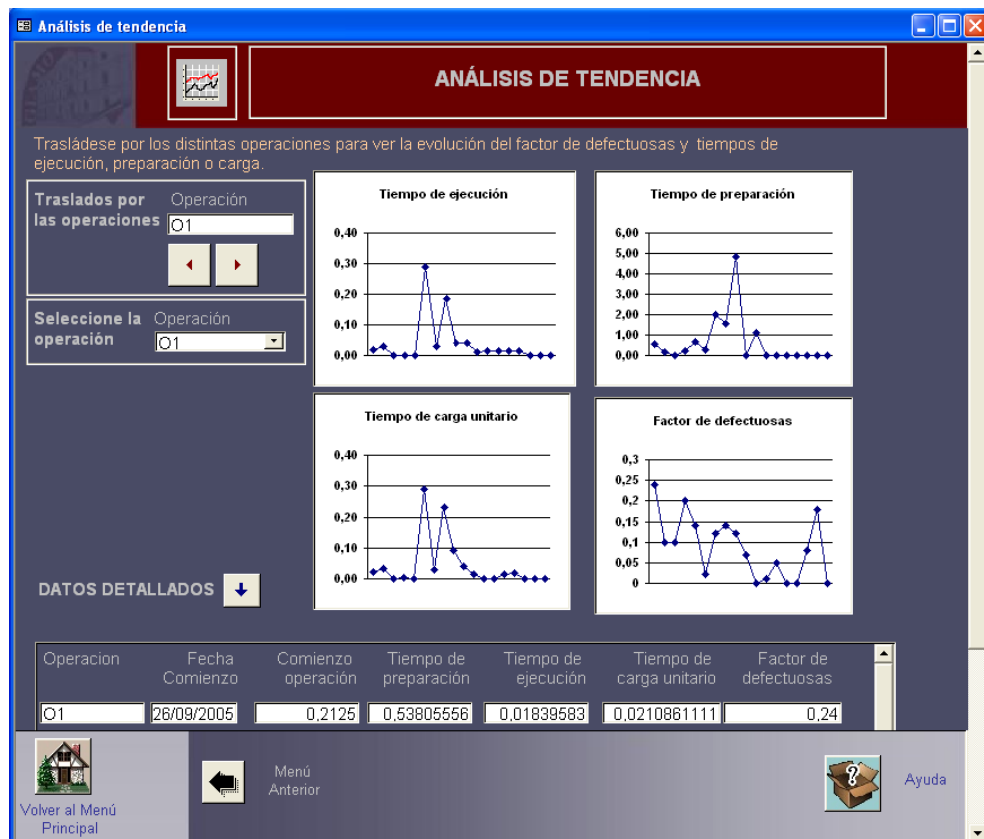


Ilustración A1.22. Pantalla de análisis de tendencias del tiempo de ejecución, preparación, carga unitario y factor de defectuosas.

Los valores exactos que toman cada una de las variables anteriores, representados gráficamente, se disponen en una lista a la que se puede acceder bajando en la pantalla mediante la barra de desplazamiento vertical.

En el caso de que no se vean los gráficos en la pantalla de su ordenador puede solucionar este problema haciendo doble clic sobre ellos.

A1.2.3.4. Análisis de valores extremos y tendencias en las entradas y tiempos de carga

Después de pulsar sobre el icono de “Análisis de valores extremos y tendencias en las entradas y tiempos de carga” de la pantalla mostrada en la Ilustración A1.18., se abre una nueva pantalla en la que se le solicita que fije los criterios para definir los valores extremos y la tendencia (Ilustración A1.23.).

CRITERIOS PARA ANALIZAR TENDENCIAS Y VALORES EXTREMOS

Defina los criterios que desea utilizar para analizar las posibles tendencias y valores extremos que se pueden originar en el desarrollo de las operaciones

Momento de entrada en cada Centro de Trabajo o en almacén	Tiempo de carga total de un lote
Porcentaje de variación máximo: 10	Porcentaje de variación máximo: 10
Número de periodos para considerar que existe tendencia: 7	Número de periodos para considerar que existe tendencia: 7

Ayuda

Realizar análisis de valores extremos y tendencias

Ilustración A1.23. Pantalla para fijar los criterios que se utilizarán en el análisis de valores extremos y tendencias de los tiempos de carga y entrada.

En este sentido, la primera vez que abra esta pantalla los campos estarán vacíos, almacenándose, los valores que introduzca en las distintas casillas, para posteriores estudios. De esta manera, cada vez que desee analizar los valores

extremos y tendencias de los tiempos de carga y momentos de entrada podrá cambiar los valores fijados como criterios o aceptar los que tiene guardados el sistema.

Hay que entender que el estudio que se realiza con esta herramienta de análisis se refiere a los tiempos de carga de lote, para un determinado tamaño de éste y al momento de entrada, de un lote de un tamaño fijado, en un Centro de Trabajo o en el almacén, si ya se ha finalizado la ruta de fabricación. Se ha considerado como entrada en el Centro el momento en que el lote es identificado para comenzar su procesamiento, ajustando los equipos si fuera necesario. De forma general, cuando el programa se refiera a los tiempos o momentos de entrada, hay que interpretar como tal la llegada a un Centro donde se le realiza una operación, o la incorporación del lote al almacén.

La información que se le solicita en la Ilustración A1.23., en relación a los valores reales que toman el tiempo de carga y los momentos de entrada de los lotes, es la siguiente:

- Porcentaje máximo de variación: valor, en tanto por ciento, de incremento o decremento del tiempo de carga o entrada almacenado en la base de datos, en comparación con el último producido para el mismo tamaño de lote.
- Número de periodos para considerar que existe tendencia: número de datos de tiempo de carga o de entrada, para un determinado tamaño de lote, en los que el valor ha estado aumentando o disminuyendo de manera continuada.

Una vez definidos estos datos y tras hacer clic sobre el botón “Realizar análisis de valores extremos y tendencias” recibirá un aviso como el indicado en la Ilustración A1.24., en el que se le insta a pulsar sobre la flecha para obtener el resultado en una pantalla similar a la reflejada en la Ilustración A1.25.

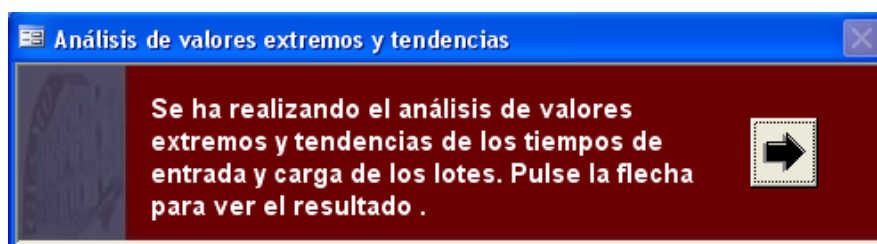


Ilustración A1.24. Aviso de fin de procesamiento del análisis de valores extremos y tendencias de los tiempos de carga y entrada.

Ilustración A1.25. Análisis de valores extremos y tendencias de los tiempos de carga y entrada.

El resultado del estudio de los valores extremos y tendencias en los tiempos de carga de los lotes y los momentos de entrada (Ilustración A1.25.) ofrece, por columnas, la siguiente información para los valores encontrados:

- **Código:** identificador del lote que presenta un valor extremo o es el último dato de una tendencia.
- **Periodo:** cubo de tiempo en el que se emitió el lote identificado con el código anterior.
- **Ítem:** artículo elaborado por la empresa, que presenta un valor de tiempo de carga o entrada excesivamente alto o bajo, o es el último dato de una tendencia en tales tiempos.
- **Tamaño:** número de unidades que componen el lote emitido del ítem que presenta algún valor extremo o tendencia.
- **Operación:** refleja el momento del tiempo de suministro en el que se produce el valor extremo o tendencia. Puede indicar la operación cuyo tiempo de carga de lote presenta una alteración o bien el momento de entrada en la operación cuyo valor supera los criterios fijados para los valores extremos o tendencias. Si la operación está identificada como “OF” refleja que el problema se origina en el tiempo de entrada en el almacén o finalización de la ruta de fabricación.
- **Valor actual:** indica el último registro de tiempo de carga o del momento de entrada, para un determinado tamaño de lote emitido, que

ha alertado del origen de una tendencia o que supone un valor extremo, si se compara con el último dato almacenado para el mismo tamaño de lote.

- Último valor: dato almacenado justo antes que el último valor producido de tiempo de carga o entrada, para un determinado tamaño de lote, que se compara con éste para determinar si se han producido valores extremos o tendencias. Cuando es la primera vez que se procesa un determinado tamaño de lote el valor de este dato es cero y no se tiene en cuenta para el cálculo de los porcentajes de variación.
- % Variación: porcentaje de variación del valor actual del tiempo de carga o entrada, para un tamaño de lote, en comparación con el último almacenado. Calculado como: $(\text{Valor actual} - \text{Último valor}) / \text{Último valor}$. Si la operación es realizada por primera vez para un determinado tamaño de lote, el porcentaje de variación tomará valor cero.
- Tendencia: número de registros seguidos en que el tiempo de carga o entrada, para un determinado tamaño de lote, presenta un incremento o decremento continuado en sus valores.

Para cada una de las filas que aparecen en la pantalla de “Análisis de tendencias y valores extremos de los tiempos de carga de los lotes y los momentos de entrada” se valora, a la izquierda y en letras rojas, la alteración que se ha producido, pudiéndose ofrecer los siguientes mensajes:

- Alta variación en la entrada: cuando el porcentaje de variación del valor actual del momento de entrada para el tamaño de lote, en relación al último almacenado para ese mismo tamaño, es superior al fijado en la pantalla reflejada en la Ilustración A1.23. Esto implica que se ha producido un valor inusualmente alto o bajo.
- Tendencia en la entrada: este aviso aparecerá si el número de registros de tiempos de entrada, para un tamaño de lote, con valores que crecen o decrecen de manera continuada es superior al criterio fijado en la pantalla indicada en la Ilustración A1.23.
- Alta variación en la carga: cuando el porcentaje de variación del valor actual del tiempo de carga de un lote, en comparación con el último almacenado, supera los límites establecidos en los criterios para el análisis (Ilustración A1.23.). Se genera, por tanto, un valor extremo que supera el porcentaje fijado, ya sea por encima o por debajo del último

registro guardado. Lógicamente, este mensaje no podrá aparecer cuando el problema se origine en una operación del tipo “OF”, ya que ésta se refiere a la llegada del lote a almacén, lo cual no genera carga.

- Tendencia en la carga: se produce si el número de datos de tiempo de carga de lote, para un determinado tamaño, que aumentan o disminuyen de valor de manera continuada, supera el fijado por el planificador en la pantalla de “Criterios para analizar tendencias y valores extremos” (Ilustración A1.23.). Este mensaje sólo puede aparecer en registros referidos a operaciones de la ruta de fabricación y no en las denotadas como OF”, que se refieren a la llegada de un lote a almacén.

Aunque un registro puede originar cualquiera de las alteraciones mencionadas, incluso las cuatro anteriores, el programa sólo avisará de la primera que se produzca según el orden utilizado para describirlas en la lista anterior. En este sentido, dado que se ofrece información referente a los porcentajes de variación y a la tendencia, se puede observar fácilmente si existen otras alteraciones.

En la parte inferior de la pantalla dispone usted del botón “Informe completo” con el que accederá a un listado con todos los registros encontrados con valores extremos y/o tendencias en los tiempos de carga o momentos de entrada, para sus correspondientes tamaños de lote.

Además, en el lado derecho de la pantalla de “Análisis de tendencias y valores extremos de los tiempos de carga de los lotes y los momentos de entrada” (Ilustración A1.25.), para cada una de las filas que reflejan los registros resultantes de este análisis, se encuentra el botón “Ver datos”, con el que, al pulsarlo, se obtiene una nueva pantalla con toda la información referente a este registro (Ilustración A1.26.).

Datos de tiempos históricos almacenados	
Código	L002P1
Item	P1
Periodo de Emisión	2
Tamaño de lote	100
Fecha de Emisión	02/01/2008
Centro de Trabajo	CT1
Operación	01
Fecha de entrada	09/01/2008
Hora de entrada	11:08:11
Fecha de comienzo	09/01/2008
Comienzo operación	11:25:00
Fecha finalización	13/01/2008
Hora finalización	14:00:05
Unidades entrada	120
Horas desde emisión	27.1363889
Tiempo de carga del lote	34.865
Tiempo de ejecución	0.28820602
Tiempo de preparación	0.28027778
Defectuosas	0

Eliminar registro

Ilustración A1.26. Datos de los tiempos almacenados que originan un valor extremo o una tendencia en el tiempo de carga o entrada, para un determinado tamaño de lote.

En esta pantalla se ofrece información muy completa sobre el registro que ha hecho saltar el aviso de existencia de valores extremos o tendencias, ofreciendo, además de los datos identificativos del lote (código, ítem que se desea fabricar, periodo de emisión del lote, tamaño y fecha de emisión), los siguientes datos:

- Centro de Trabajo: lugar en el que se produce el tiempo de carga o el momento de entrada inusual, o bien origina tendencia creciente o decreciente. En el caso de que esta alteración de valores se produzca al finalizar la ruta de fabricación del lote, en esta casilla parecerá “Finalización”.
- Operación: refleja la operación cuyo tiempo de carga generado para un lote o el momento de entrada en el Centro de Trabajo donde se va a ejecutar esta operación, es sustancialmente superior o inferior al último valor almacenado, para el mismo tamaño de lote, o genera una tendencia creciente o decreciente. Si el desajuste se produce en el momento de entrada en almacén, identificado como Centro de Trabajo “Finalización”, el nombre de la operación comenzará por “OF”.
- Fecha de entrada: del lote en el Centro de Trabajo o en el almacén, entendida ésta, en el primer caso, como el momento en que empieza el procesamiento, es decir cuando se procede a ajustar el Centro en el caso de que la operación realizada con anterioridad sea diferente. El formato de esta fecha es del tipo DD/MM/AAAA (D: día, M: mes; A: año).
- Hora de entrada: en horas, minutos y segundos en que comenzó el procesamiento del lote, en el caso de referirnos a una operación de la ruta, entendido éste cuando se recibe en el Centro de Trabajo y se identifica la operación que hay que realizarle, analizando si es preciso preparar el Centro en el caso de que la operación ejecutada justo antes sea diferente de la que se le va a realizar ahora. En el caso de que la operación sea del tipo “OF”, la hora de entrada refleja el momento en que el lote llega a almacén.
- Fecha de comienzo: día, mes y año, en formato DD/MM/AAAA (D: día, M: mes; A: año), en el que comienza la ejecución de la operación. Lógicamente, si el registro se refiere a la llegada a almacén de un lote, en esta casilla no aparecerá ningún valor.
- Comienzo operación: hora, minutos y segundos que identifican el momento en el que comienza la ejecución de la operación al lote, cuando el registro se refiere a una operación que se encuentre dentro de la ruta de fabricación. Si no es así la casilla aparecerá vacía.

- Fecha finalización: identificación del día, mes y año (DD/MM/AAAA, donde D es el día, M el mes y A el año), en que finaliza la ejecución de la operación a todas las unidades que componen el lote. Tomará valor nulo cuando el registro identifique una operación del tipo “OF”.
- Hora finalización: momento identificado por las horas, minutos y segundos, en que finaliza la ejecución de la operación a todas las unidades que componen el lote. Cuando el registro se refiera al Centro de Trabajo “Finalización” este campo estará vacío.
- Unidades entrada (Q_{ij}): que componen el lote cuando éste llega al Centro de Trabajo para que se le ejecute la operación i o al almacén si nos referimos a una operación “OF”. Este valor puede ser diferente del tamaño de lote emitido.
- Horas desde emisión: tiempo transcurrido, en horas reales, desde la emisión del lote hasta el momento de entrada, entendido éste cuando el lote es atendido. Se calcula como diferencia entre las horas laborables transcurridas desde la fecha de emisión hasta la fecha y hora de entrada en el Centro de Trabajo o almacén.
- Tiempo de carga del lote (Tc_{ijk}): tiempo, en horas reales, que se ha precisado para procesar todo el lote, incluyendo el tiempo de preparación del Centro de Trabajo y el tiempo de ejecutar la operación a todas las unidades que componen dicho lote. Se ha calculado como diferencia entre las horas reales transcurridas desde la fecha y hora de entrada en el Centro de Trabajo k , para realizarle la operación i a un lote del ítem j , hasta la fecha y hora de finalización. Dado que la llegada a almacén no genera carga, esta casilla aparecerá vacía si el registro se refiere al Centro de Trabajo “Finalización”.
- Tiempo de ejecución (te_i): necesario para realizar una vez la operación sobre una unidad del lote, en horas reales. Calculado como el cociente entre las horas necesarias para la ejecución del lote (fecha y hora de finalización menos fecha y hora de comienzo) entre las unidades que componían éste a la entrada del Centro de Trabajo (Q_{ij}). Cuando el registro se refiera a una operación del tipo “OF” esta casilla aparecerá vacía.
- Tiempo de preparación (tp_{ik}): horas reales necesarias para el ajuste del Centro de Trabajo k , en el que se va a realizar la operación i , en el caso de que la operación realizada justo anteriormente sea diferente de la actual. Se calcula como diferencia, en horas laborables, entre la fecha y

hora de entrada y la fecha y hora de comienzo. Si el registro se refiere a la llegada de un lote a almacén la casilla del tiempo de preparación aparecerá vacía.

- Defectuosas: proporción de unidades defectuosas encontradas en el lote, en tanto por uno, una vez que se le ha ejecutado la operación a todas las unidades que lo componen. Calculado mediante el cociente entre la diferencia entre el tamaño de lote a la salida del Centro y el que tenía a la entrada (Q_{ij}), y el número de unidades que componían el lote cuando éste entró en el Centro de Trabajo. Cuando el registro se refiera al Centro de Trabajo “Finalización”, esta casilla quedará vacía.

El botón “Eliminar registro” borrará permanentemente los datos relativos a la información que se ofrece en la pantalla “Datos de tiempos históricos almacenados” (Ilustración A1.26.), de manera que este registro no se utilizará para calcular los valores medios de tiempos de carga y entrada.

Si no desea eliminar el registro debe pulsar sobre el botón con el icono de “Salida”, regresando así a la pantalla de “Análisis de tendencias y valores extremos de los tiempos de carga de los lotes y los momentos de entrada” (Ilustración A1.25.), pudiendo ser eliminado este registro en cualquier otro momento.

ANEXO

2

UN EJEMPLO SENCILLO DE LA MECÁNICA DE CRP



A2.1. INTRODUCCIÓN

Con este anexo se pretende reflejar, mediante un ejemplo sencillo, el funcionamiento práctico y la mecánica de cálculo de la técnica CRP, presentando los datos necesarios, el procedimiento de cálculo utilizado y la información que resulta de la aplicación de la planificación de capacidad con esta técnica. Para ello consideraremos el caso de una empresa que elabora tres ítems (A, B y C), para lo que precisa de tres Centros de Trabajo (CT1, CT2 y CT3) en los que realiza un total de siete operaciones (O1, O2, O3, O4, O5, O6 y O7), e inspecciona los lotes al final de la ruta. El proceso de obtención de los ítems, así como los Centros de Trabajo en el que se realizan las operaciones se puede apreciar en la Figura A2.1.

Para la elaboración de los Planes de Capacidad y Carga necesarios para comprobar la viabilidad del Plan de Materiales, la técnica CRP precisa disponer de la siguiente información:

- Pedidos u órdenes planificados y en proceso.
- Datos sobre los Centros de Trabajo.

- Información sobre las rutas y las operaciones que las componen.
- Otros datos necesarios para conocer el tiempo de suministro.

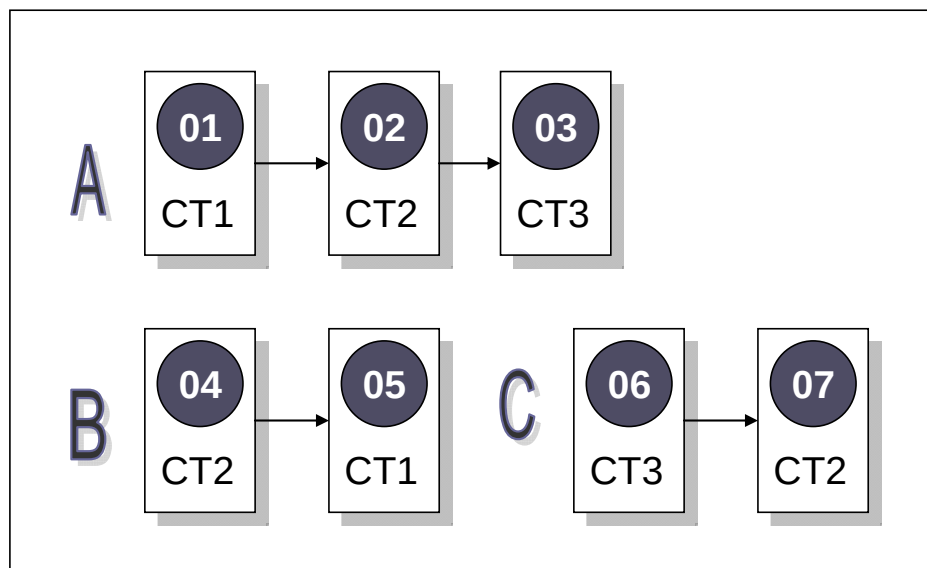


Figura A2.1. Rutas de fabricación de los ítems.

Con estos datos se calculará el valor y momento de asignación de las distintas cargas originadas por los lotes del Plan de Materiales, analizando, por separado, la capacidad necesaria para el procesamiento de los distintos lotes de ítems, diferenciándolos según el tamaño.

Una vez determinada la distribución de la carga originada por todos los tamaños de lote incluidos en el Plan de Materiales, deberemos asignarla a los distintos cubos de tiempo que componen el horizonte de planificación, teniendo en cuenta el momento de la emisión de cada lote e identificando la carga por periodo y Centro de Trabajo. A esta capacidad necesaria se le debe sumar la carga originada por la finalización de los lotes en proceso para, posteriormente, comparar la capacidad necesaria total con la capacidad disponible, analizando las posibles desviaciones.

A2.2. DATOS NECESARIOS PARA LOS CÁLCULOS

A continuación se ofrece la información necesaria para la aplicación de la técnica CRP, agrupada en los bloques que se analizan en el Apartado 2.4.2.

A2.2.1. Pedidos u órdenes planificados y en proceso

Los pedidos planificados se encuentran dentro del Plan de Materiales (Tabla A2.1.), el cual recoge los lotes que se emitirán a lo largo del horizonte de planificación, especificándose el número de unidades y el periodo de emisión de cada pedido.

Ítem/Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
A	100		100		100	100		
B		2.000	2.000	2.000			2.000	
C	500	500		500		400		500

Tabla A2.1. Plan de Materiales.

Para la planificación de capacidad también es necesario conocer la carga que generarán los lotes que se encuentran en curso de fabricación, además de los nuevos lotes emitidos. Así, en nuestro ejemplo, la capacidad necesaria para el procesamiento de los lotes en proceso es la reflejada en la Tabla A2.2.

Ítem	Centro de Trabajo	Periodos		
		1	2	3
A	CT1	10,868	5,753	
	CT2		14,056	
	CT3		0,569	
B	CT1		20,125	12,833
	CT2	20,113		
C	CT2	3,812	6,165	
	CT3	5,867		

Tabla A2.2. Carga de los pedidos en curso.

A2.2.2. Datos sobre los Centros de Trabajo

En relación a los Centros de Trabajo, es necesario conocer una serie de datos básicos, cuyo valor está determinado por las decisiones de la empresa, así como otros datos que son aleatorios y que es necesario estimar. Los datos fijados por la empresa de este ejemplo son los que aparecen en la Tabla A2.3.

Centro de Trabajo	CT1	CT2	CT3
Horas de trabajo/turno en h.r.	8	8	8
Número de turnos/día	1	1	1
Trabajadores con máquinas	3	5	2
Máquinas	2	3	1
Trabajadores por máquina	2	3	2
Trabajadores independientes	0	1	0

Tabla A2.3. Algunos datos necesarios de los Centros de Trabajo.

Además, es necesario estimar los valores medios de los factores eficiencia y utilización, tiempo de preparación del Centro de Trabajo para realizar una operación diferente a la que se ejecutó justo antes, tiempo de cola a la entrada del Centro de Trabajo y tiempo de espera, tras la realización de la operación, para el traslado al siguiente Centro de Trabajo de su ruta o al almacén.

A2.2.2.1. Factor de eficiencia

Con el factor eficiencia se consigue transformar las horas productivas en horas estándar, puesto que refleja la diferencia de destreza y rapidez de movimientos entre distintos trabajadores (ver Apartado 2.4.3.).

La estimación de este factor se podría hacer mediante diferentes métodos de muestreo. En nuestro caso se utilizará el procedimiento seguido por el Estudio de Tiempos¹, utilizando una muestra piloto que nos permita determinar la media y desviación típica muestrales, valores que unidos a la exactitud y nivel de confianza deseados nos permitirán determinar el tamaño de muestra más adecuado aplicando la siguiente expresión:.

$$n = \left(\frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \times \sigma'}{A \times \bar{x}} \right)^2 \quad (\text{A2.1})$$

Donde:

¹ Véase, por ejemplo, Alford, Bangs y Hagemann (1969), Domínguez y otros (1995) o Niebel (1996).

α = nivel de confianza.

$Z_{1-(1-\alpha/2)}$ = valor de la cola izquierda de una distribución normal $N(0,1)$, para una probabilidad de $1-(1-\alpha/2)$.

A = acuracidad o exactitud deseada.

$\bar{x}$ = media de los tiempos obtenidos en la muestra piloto.

σ' = cuasi-desviación típica de la muestra piloto.

Para el caso del Centro de Trabajo CT1, se ha tomado una muestra piloto compuesta por 20 observaciones de los ritmos de actividad cuyos valores, para un ritmo de actividad normal² de 100, son los que se reflejan en la Tabla A2.4.

Para el caso que nos sirve de ejemplo consideraremos que la empresa ha decidido utilizar, para todos los Estudios de Tiempos, un nivel de confianza del 95% y una exactitud del 5%, por lo que, aplicando la expresión (A2.1), obtenemos que el tamaño de muestra necesario para cumplir con los objetivos planteados es:

$$n = \left(\frac{Z_{1-\frac{1-\alpha}{2}} \times \sigma'}{A \times \bar{x}} \right)^2 = \left(\frac{1,9599 \times 10,91}{0,05 \times 81,75} \right)^2 = 27,394 = 28$$

Como el número de observaciones necesario es de 28 y ya se dispone de 20 en la Tabla A2.4., sólo será necesario tomar 8 más, cuyos valores se indican en la Tabla A2.5.

Dado que se ha considerado un ritmo de actividad normal de 100, el factor de eficiencia medio del Centro de Trabajo CT1, se calculará dividiendo el valor medio total de los ritmos de actividad de las 28 observaciones entre 100. El resultado será que el factor eficiencia medio en este Centro de Trabajo será 0,8.

² Refleja el ritmo de trabajo que se consideraría normal para una operación no incentivada. La escala utilizada es la 100-133, donde 133 sería el ritmo normal en el caso de que el trabajador esté incentivado.

Muestra	Ritmo de actividad
1	70
2	75
3	70
4	80
5	75
6	80
7	70
8	90
9	70
10	75
11	80
12	75
13	80
14	90
15	80
16	90
17	90
18	90
19	90
20	115
Media	81,75
Desviación	10,91

Tabla A2.4. Muestra piloto de los ritmos de actividad del CT1.

Muestra	Ritmo de actividad
21	85
22	70
23	85
24	70
25	70
26	75
27	70
28	80
Media Total	80

Tabla A2.5. Muestra extra de los ritmos de actividad del CT1.

Si bien en este estudio no se ha hecho diferenciación entre los ritmos de actividad alcanzados por los trabajadores según la operación realizada, también se podría calcular la eficiencia media de un Centro de Trabajo analizando por separado la eficiencia de cada operación, calculando a continuación un valor medio ponderado en función del número de veces que se realice cada una de ellas.

El mismo procedimiento seguido para el cálculo de la eficiencia media en el Centro de Trabajo CT1, debería utilizarse para los otros dos Centros. Para simplificar la explicación, en la Tabla A2.6. se indican los valores finales obtenidos en todos los Centros de Trabajo de los que dispone la empresa.

Centro de Trabajo	CT1	CT2	CT3
Factor eficiencia medio (E_k)	0,8	0,85	0,89

Tabla A2.6. Factor eficiencia medio en los distintos Centros de Trabajo.

A2.2.2.2. Factor de utilización

Este factor (ver Apartado 2.4.3.), nos permite transformar las horas reales en horas productivas. Para su cálculo es preciso conocer la disponibilidad de máquinas y trabajadores, así como las pausas debidas a las esperas de trabajo.

En este ejemplo consideraremos que la empresa ha decidido utilizar como método de estimación del factor utilización, la observación directa de los tiempos improductivos diarios para, a partir de ellos, calcular las horas productivas. Para ello utilizaremos el mismo criterio aplicado en el estudio de la eficiencia, es decir, se tomará una muestra de 20 días en los que se anotará el tiempo en el que el Centro de Trabajo está parado y, a partir de ahí, se calculará el tamaño muestral necesario para conseguir que la estimación del factor utilización tenga un nivel de confianza del 95% y una exactitud del 5%.

Así, por ejemplo, para el caso del Centro de Trabajo CT3, se han tomado los valores del tiempo improductivo en 20 días diferentes, desarrollándose cada día 8 h.r. de trabajo. En la Tabla A2.7. se reflejan estos datos, calculándose el tiempo productivo (como diferencia entre las horas reales diarias y el tiempo

improductivo) y el factor de utilización (calculado mediante el cociente de las horas productivas y las horas reales³).

Muestra	Tiempo improductivo (h.r.)	Tiempo productivo (h.r.)	Factor utilización
1	0,080	7,920	0,990
2	0,800	7,200	0,900
3	0,160	7,840	0,980
4	2,400	5,600	0,700
5	1,040	6,960	0,870
6	0,513	7,487	0,936
7	0,080	7,920	0,990
8	0,240	7,760	0,970
9	0,080	7,920	0,990
10	2,400	5,600	0,700
11	1,445	6,555	0,819
12	0,227	7,773	0,972
13	0,160	7,840	0,980
14	0,320	7,680	0,960
15	0,160	7,840	0,980
16	1,920	6,080	0,760
17	0,160	7,840	0,980
18	2,240	5,760	0,720
19	0,560	7,440	0,930
20	2,320	5,680	0,710

Tabla A2.7. Muestra piloto de los tiempos improductivos, tiempos productivos y factor utilización del CT3.

Con los datos expuestos en la Tabla A2.7., se determina que el valor medio de la utilización, según la muestra piloto, es de 0,9015 y la desviación de 0,0638. Sustituyendo estos datos en la expresión (A2.1) determinamos que el tamaño muestral necesario para un nivel de confianza del 95% y una exactitud del 5%, es 25 observaciones, por lo que en la Tabla A2.8. se indican los valores de los datos que restan hasta tal cantidad.

³ La expresión que refleja este cálculo es la siguiente: $NHP = NHR \times U$, donde NHP es el número de horas productivas, NHR indica el número de horas reales y U es el factor utilización.

Muestra	Tiempo improductivo (h.r.)	Tiempo productivo (h.r.)	Factor utilización
21	0,080	7,920	0,990
22	1,122	6,878	0,860
23	0,160	7,840	0,980
24	0,160	7,840	0,980
25	0,693	7,307	0,913

Tabla A2.8. Muestra extra los tiempos improductivos, tiempos productivos y factor utilización del CT3.

El valor medio del factor de utilización del Centro de Trabajo CT3 se calculará como la media de los valores tomados en las 25 muestras, el cual resulta 0,9. Este resultado, junto con el que se alcanzará de aplicar el método desarrollado para el Centro de Trabajo CT1, en los Centros CT2 y CT3, se ha reflejado en la Tabla A2.9.

Centro de Trabajo	CT1	CT2	CT3
Factor utilización medio (U_k)	0,95	0,92	0,9

Tabla A2.9. Factor utilización medio de los Centros de Trabajo.

A2.2.2.3. Otros datos sobre los Centros de Trabajo⁴

Con objeto de calcular el valor y momento de asignación de las cargas, además de los datos referidos en los apartados anteriores, para realizar una planificación con CRP necesitamos conocer los tiempos de preparación⁵ (tp_{ik}), cola⁶ ($Tcola_{ijk}$) y espera⁷ ($Tesp_{ijk}$). Para los propósitos de este ejemplo, nos basta conocer los tiempos calculados para el caso de la empresa ya citada, que se detallan en las Tablas A2.10., A2.11. y A2.12. El proceso detallado de dicho cálculo para el

⁴ Para una descripción detallada de la obtención de los datos del ejemplo necesarios para el cálculo del Plan CRP, ver Apartado 5.5.2.1.

⁵ Para un análisis detallado de los tiempos de preparación, ver el Apartado 3.5.4.2.

⁶ El análisis de los parámetros fundamentales de una cola de espera así como su procedimiento de cálculo, se analizan en el Apartado 3.4.

⁷ Para un análisis detallado del tiempo de espera, ver Apartado 3.5.5.

ejemplo en cuestión, de los tiempos de preparación, cola y espera, se puede analizar en los Apartados 5.5.2.1., 5.5.2.6. y 5.5.2.7. del Capítulo 5.

Operación	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
Horas estándar	0,664	0,156	0,401	0,391	0,153	0,4	0,156
Horas reales	0,87	0,2	0,5	0,5	0,2	0,5	0,2

Tabla A2.10. Tiempo medio de preparación, en horas estándar y reales, de las O1, O2, O3, O4, O5, O6 y O7.

Centro de Trabajo	CT1	CT2	CT3
Tiempo de cola (h.r.)	15	10	10

Tabla A2.11. Tiempo medio de cola de los Centros de Trabajo.

Centro de Trabajo	CT1	CT2	CT3
Tiempo de espera (h.r.)	0,25	0,25	0,2

Tabla A2.12. Tiempo medio de espera a la salida de los Centros de Trabajo.

A2.2.3. Información sobre las rutas y las operaciones que las componen: tiempos de ejecución

Para cada una de las siete operaciones que realiza la empresa del ejemplo es necesario conocer en qué Centro de Trabajo se ejecutan y cuál es el tiempo necesario para ejecutar dicha operación a una unidad del lote (te_i). La estimación de esta variable se puede realizar mediante varios métodos, habiéndose utilizado para este ejemplo el Estudio de Tiempos, como en las estimaciones de los tiempos de preparación⁸.

El resultado de los estudios necesarios para estimar los distintos tiempos de ejecución se han agrupado en la Tabla A2.13.

Operación	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
Horas estándar	0,1596	0,1748	0,0022	0,01	0,019	0,0118	0,0228
Horas reales	0,21	0,23	0,003	0,013	0,025	0,015	0,03

Tabla A2.13. Tiempo medio de ejecución de todas las operaciones en horas reales y estándar.

⁸ Para analizar el detalle de la aplicación del Estudio de Tiempos al caso del ejemplo, ver Apartado 5.5.2.2.

A2.2.4. Otros datos necesarios para conocer el tiempo de suministro

Para poder determinar el momento de asignación de la carga originada por los lotes incluidos en el Plan de Materiales, es necesario conocer todos los componentes del tiempo de suministro. En concreto, precisamos disponer, no sólo de los tiempos detallados en los apartados anteriores, sino además de los tiempos de confección de pedido⁹ ($Tconf_j$), desplazamiento de materiales¹⁰ (Tdm_j) y de lotes¹¹ (Td_{ijk}) e inspección¹² ($Tinsp_j$), ya que consideramos la inspección únicamente al final de la ruta).

El detalle del cálculo para nuestro ejemplo de los tiempos de confección del pedido, desplazamiento de materiales y de lotes e inspección, puede consultarse respectivamente, en los Apartados 5.5.2.3., 5.5.2.4., 5.5.2.5. y 5.5.2.8. En este momento, de cara a los propósitos de este ejemplo, nos basta con conocer el resultado de los correspondientes cálculos para estos elementos, que se detallan en las Tablas A2.14. a A2.17.

Ítem	A	B	C
Tiempo de confección medio (h.r.)	2	2	2

Tabla A2.14. Tiempo medio de confección para los ítems A, B y C.

Ítem	A	B	C
Tiempo de desplazamiento de materiales (h.r.)	1,7	0,25	0,25

Tabla A2.15. Tiempo medio de desplazamiento de materiales para los ítems A, B y C.

Operación	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7
Tiempo de desplazamiento (h.r.)	0,2	0,2	0,25	0,3	0,25	0,3	0,25

Tabla A2.16. Tiempo medio de desplazamiento de los lotes tras la ejecución de las operaciones.

Ítem	A	B	C
Tiempo de inspección (h.r.)	0,25	0,5	0,5

Tabla A2.17. Tiempo medio de inspección para los ítems A, B y C.

⁹ Ver Apartado 3.5.1.

¹⁰ Las principales características del tiempo de desplazamiento de materiales, son estudiadas en el Apartado 3.5.2.

¹¹ Para un estudio detallado de este elemento, ver Apartado 3.5.2.

¹² Para un análisis de este elemento, ver Apartado 3.5.6.

A2.3. ELABORACIÓN DEL PLAN DE CARGA

Con toda esta información se calculará el valor y momento de asignación de las distintas cargas originadas por los lotes del Plan de Materiales, a la que se le sumará la capacidad necesaria para la finalización de los lotes en proceso para determinar el Plan de Carga.

Para una mayor comodidad del lector, hemos resumido en las Tablas A2.18. y A2.19., la mayor parte de la información detallada en los apartados anteriores, que ahora es necesaria para el desarrollo del Plan de Carga.

Operación	te_i (h.r.)	tp_{ik} (h.r.)	Td_{ijk} (h.r.)	$Tcola_{ijk}$ (h.r.)	$Tesp_{ijk}$ (h.r.)
O1	0,21	0,87	0,2	15	0,25
O2	0,23	0,2	0,2	10	0,25
O3	0,003	0,5	0,25	10	0,2
O4	0,013	0,5	0,3	10	0,25
O5	0,025	0,2	0,25	15	0,25
O6	0,015	0,5	0,3	10	0,2
O7	0,03	0,2	0,25	10	0,25

Tabla A2.18. Tiempos de ejecución (te_i), preparación (tp_{ik}) desplazamiento (Td_{ijk}), cola ($Tcola_{ijk}$) y espera ($Tesp_{ijk}$).
Fuente: elaboración propia.

Ítem	$Tconf_j$ (h.r.)	Tdm_j (h.r.)	$Tinsp_j$ (h.r.)
A	2	1,7	0,25
B	2	0,25	0,5
C	2	0,25	0,5

Tabla A2.19. Tiempos de confección de pedido ($Tconf_j$), desplazamiento de materiales (Tdm_j) e inspección ($Tinsp_j$) de los ítems.
Fuente: elaboración propia.

A2.3.1. Cálculo del valor de la carga

En CRP necesitamos conocer, para el cálculo del tiempo de carga producido en cada operación, además del tamaño del lote emitido (Q_j), el tiempo de ejecución unitario (te_i) y el de preparación del lote (tp_{ik}).

Como ya se detalló en el Apartado 2.4.3.1.1., el tiempo de preparación del Centro de Trabajo es el destinado a su ajuste para el procesamiento de una operación diferente a la realizada con anterioridad, por ello es independiente del tamaño de lote a procesar. Por otro lado, el tiempo de ejecución total o tiempo necesario para realizar la operación a todas las unidades que componen el lote, depende del tamaño real de éste. Sin embargo, CRP utiliza para su cálculo, el número de unidades emitidas, no considerando la reducción del tamaño del lote ocasionada por la eliminación de las unidades defectuosas. Con objeto de poder comparar la carga con la capacidad disponible, debemos averiguar el tiempo de preparación y ejecución en horas estándar. Así, tomando los datos de la Tabla A2.13., podemos determinar el tiempo estándar para la ejecución completa de la operación O1, a realizar sobre el lote de 100 unidades del ítem A emitido en el periodo 1 (Q_{A1}):

$$Ejecución_i(h.e.) = te_i \times Q_j = te_1 \times Q_{A1} = 0,1596 \times 100 = 15,96 h.e.$$

La carga total originada por el procesamiento de O1 a Q_{A1} será la suma del tiempo de preparación, obtenido de la Tabla A2.10., y ejecución en horas estándar:

$$\begin{aligned} C_{Q_{ijk}}(h.e.) &= Ejecución_i(h.e.) + tp_{ik}(h.e.) \\ C_{(100)1A1}(h.e.) &= Ejecución_1(h.e.) + tp_{11}(h.e.) = 15,96 + 0,661 = 16,621 h.e. \end{aligned} \quad (A2.2)$$

A2.3.2. Asignación de la carga

Consideraremos que, en este ejemplo, la empresa desea realizar una programación hacia delante (ver Apartado 2.4.3.1.2.), es decir, comenzará las actividades relacionadas con el procesamiento de un lote en el momento de emisión del pedido. Este tipo de programación generará un Plan de Carga más fiable que el obtenido con la programación hacia atrás (la asignación se realiza desde la fecha prevista de entrega), ya que con esta última cualquier aumento en los tiempos que componen el tiempo de suministro provocará retrasos en la finalización prevista¹³.

¹³ No obstante, según la mayoría de los autores, en CRP el procedimiento más habitual es la programación hacia atrás. Véase, por ejemplo, Wemmerlöv (1984, p. 32), Connor (1986, p. 21), Chen (1986, p. 443), Scott (1994, p. 162), Companys y Corominas (1995, p. 276), Slack (1997, p. 22) o Jonsson y Mattsson (2002, p. 94).

$\overline{Tconf_A}$	$\overline{Tdm_A}$	$\overline{Tcola_1}$	$\overline{tp_1}$	$\overline{te_1 \times Q_{A_p}}$	$\overline{Tesp_1}$	$\overline{Td_1}$	$\overline{Tcola_2}$	$\overline{tp_2}$	$\overline{te_2 \times Q_{A_p}}$	$\overline{Tesp_2}$	$\overline{Td_2}$	$\overline{Tcola_3}$	$\overline{tp_3}$	$\overline{te_3 \times Q_{A_p}}$	$\overline{Tesp_3}$	$\overline{Tinsp_A}$	$\overline{Td_3}$
Tiempo de suministro del ítem A																	
$\overline{Tconf_B}$	$\overline{Tdm_B}$	$\overline{Tcola_4}$	$\overline{tp_4}$	$\overline{te_4 \times Q_{B_p}}$	$\overline{Tesp_4}$	$\overline{Td_4}$	$\overline{Tcola_5}$	$\overline{tp_5}$	$\overline{te_5 \times Q_{B_p}}$	$\overline{Tesp_5}$	$\overline{Tinsp_B}$	$\overline{Td_5}$					
Tiempo de suministro del ítem B																	
$\overline{Tconf_C}$	$\overline{Tdm_C}$	$\overline{Tcola_6}$	$\overline{tp_6}$	$\overline{te_6 \times Q_{C_p}}$	$\overline{Tesp_6}$	$\overline{Td_6}$	$\overline{Tcola_7}$	$\overline{tp_7}$	$\overline{te_7 \times Q_{C_p}}$	$\overline{Tesp_7}$	$\overline{Tinsp_C}$	$\overline{Td_7}$					
Tiempo de suministro del ítem C																	

Figura A2.2. Representación de los componentes del tiempo de suministro.

Para distribuir la carga entre los periodos que componen el horizonte de planificación, es preciso tomar en consideración el resto de los tiempos que componen el tiempo de suministro. Siguiendo el ejemplo de los lotes emitidos de 100 unidades del ítem A, el procedimiento para la asignación de las cargas consiste en determinar el momento de inicio y finalización de cada una de las tareas que se incluyen en el tiempo de suministro (confección del pedido, desplazamientos de materiales o del lote, cola, preparación del Centro de Trabajo, ejecución de la operación, espera para el traslado e inspección al final de su ruta) considerando el orden indicado por su ruta de fabricación (Figura A2.1.). Para ello se ha elaborado la Tabla A2.20., donde se reflejan esos valores, permitiendo calcular los periodos transcurridos desde la emisión del lote hasta el momento en el que se genera la carga, así como la cuantía que le corresponde a cada periodo.

En el proceso de cálculo se han de determinar las horas de comienzo y fin de cada componente del tiempo de suministro (columna “Hora final” de la Tabla A2.20.), así como los periodos (columna “Periodo” de la Tabla A2.20.) en que dichas horas se encuadran, con objeto de determinar qué parte de la carga corresponde a cada uno de dichos periodos. Siempre se considera que la terminación de una tarea coincide con el momento de comienzo de la siguiente. Así, por ejemplo, para el procesamiento del lote de 100 unidades del ítem A ($Q_{A1} = 100$), la hora final del tiempo de confección para la operación O1 (incluido en la Tabla A2.20.), sería la hora 2, ya que el tiempo de confección calculado (ver Tabla A2.19.), fue de 2 horas reales, y el pedido comienza a confeccionarse en el final del momento cero; a su vez, el momento de finalización del tiempo de confección (final de la hora 2), sería el de comienzo del desplazamiento de materiales al Centro de Trabajo CT1 para realizar la operación O1, el cual requeriría según calculamos (ver Tabla A2.19.), 1,7 horas reales, por lo que dicho tiempo de desplazamiento terminará en la hora 3,7, que marcará el momento de comienzo de la cola de espera en dicho Centro de Trabajo. Obviamente, el instante en el que finaliza cada una de las tareas, u hora final, se ha calculado con los valores

acumulados de los tiempos (en horas reales) de cada componente del tiempo de suministro.

Ítem	A					
Tamaño	100					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Inicio				0	1	
Confección _A		2		2	1	
Desplazamiento _A		1,7		3,7	1	
Cola ₁		15		18,7	1	
Preparación ₁	CT1	0,87	0,661	19,57	1	16,188
Ejecución ₁	O1	21	15,960	40,57	2	0,433
Espera ₁		0,25		40,82	2	
Desplazamiento ₁		0,2		41,02	2	
Cola ₂		10		51,02	2	
Preparación ₂	CT2	0,2	0,156	51,22	2	18,142
Ejecución ₂	O2	23	17,986	74,22	2	
Espera ₂		0,25		74,47	2	
Desplazamiento ₂		0,2		74,67	2	
Cola ₃		10		84,67	3	
Preparación ₃	CT3	0,5	0,401	85,17	3	0,641
Ejecución ₃	O3	0,3	0,240	85,47	3	
Espera ₃		0,2		85,67	3	
Inspección _A		0,25		85,92	3	
Desplazamiento ₃		0,25		86,17	3	

Tabla A2.20. Programación hacia delante y carga para un lote de 100 unidades del ítem A, utilizando CRP.

Para determinar el periodo se ha de tener en cuenta el tamaño de cada uno de ellos. En nuestro ejemplo tiene una duración de 40 h.r. (cada periodo está compuesto por 5 días laborables de 8 h.r. al día, según se indica en la Tabla A2.3.). Así, por ejemplo, para el procesamiento de este lote de 100 unidades del ítem A, si el tiempo de confección termina en la hora 2, eso implica que se dará en el periodo 1, dado que este abarcará desde el final de la hora cero al final de la hora 40. Por tanto, dado que el tiempo de desplazamiento se culmina en la hora 3,7, también estará dentro del periodo 1.

Continuando el proceso, para la elaboración de este lote de 100 unidades del ítem A, se determinará la hora final del tiempo de cola de 15 horas reales calculado para el Centro de Trabajo CT1 ($Cola_1$, incluido para la operación O1 en la Tabla A2.18.). Dado que el tiempo de desplazamiento culminó en la hora 3,7, el final de dicha hora marcará el comienzo de la cola de espera, que terminará en el momento 18,7 ($3,7 + 15$). El final de la cola de espera se calcula pues, como la suma de los tiempos de confección y desplazamiento que se generan con anterioridad en su ruta, más el tiempo de cola para dicha operación (valores tomados de las Tablas A2.18. y A2.19.):

$$Cola_1 = Tconf_A + Tdm_A + Tcola_{1A1} = 2 + 1,7 + 15 = 18,7$$

El final de la hora 18,7 marcaría la terminación de la cola de espera y el comienzo de la preparación del Centro de Trabajo CT1.

Seguidamente habrá de determinarse la finalización del tiempo de preparación en el Centro de Trabajo CT1 para la operación O1, teniendo en cuenta que el comienzo de dicha preparación, como ya comentamos, sería el final de la hora 18,7 en que terminaría la cola de espera. Siendo dicho tiempo de preparación anteriormente calculado para la operación O1 (ver Tabla A2.10.) de 0,87 horas reales (0,661 horas estándar), esta tarea terminará en la hora 19,57 ($18,7 + 0,87$), momento en que podrá comenzar la ejecución de la operación O1 al lote en proceso que, como ya se calculó anteriormente, tiene un tiempo de ejecución unitario de 0,21 horas reales (0,1596 horas estándar; ver Tabla A2.13.), por lo que abarcará un total de 21 horas reales ($0,21 \times Q_{A1} = 0,21 \times 100$), o lo que es igual, 15,96 horas estándar, dado que, como se explicó en el Apartado A2.3.1.:

$$Ejecución_i (h.e.) = te_i \times Q_j = te_i \times Q_{A1} = 0,1596 \times 100 = 15,96 h.e.$$

La ejecución pues, terminaría en la hora real 40,57 ($19,57 + 21$).

En total, entre preparación y ejecución, el procesamiento de este lote en el Centro de Trabajo 1 para realizar la operación O1, abarcaría 21,87 horas reales (0,87 de preparación y 21 de ejecución), o lo que es igual 16,621 horas estándar ($0,661 + 15,960$). Como explicamos en el Apartado A2.3.1.:

$$C_{Qijk} (h.e.) = Ejecución_i (h.e.) + tp_{ik} (h.e.)$$

$$C_{(100)1A1} (h.e.) = Ejecución_1 (h.e.) + tp_{11} (h.e.) = 15,96 + 0,661 = 16,621 h.e.$$

Llegaría ahora el momento de asignar dicha carga a los periodos o cubos de tiempo en que se va a producir. Habrá de determinarse pues, el momento del tiempo en que comienza y termina.

En cuanto al comienzo de la preparación, como vimos anteriormente, coincidirá con la finalización del tiempo de cola, que, según se ha calculado, sería

el final de la hora 18,7. Dado que el momento de finalización de la cola de espera es anterior a la hora real 40 (al final de la cual, termina el periodo 1), es obvio que la totalidad de la misma se produciría en el periodo 1. Analíticamente, se puede determinar que el periodo o cubo de tiempo en que finalizará el tiempo de cola y, por tanto, el primer cubo de tiempo en el que se podrá asignar la carga de la operación O1, será¹⁴:

$$\text{Periodo Cola}_i = E\left(\frac{\text{Cola}_i}{Tp}\right) + 1$$

$$\text{Periodo Cola}_1 = E\left(\frac{\text{Cola}_1}{Tp}\right) + 1 = E\left(\frac{18,7}{40}\right) + 1 = 1$$

El último periodo en el que se distribuirá la carga, se calculará analizando la hora en la que finaliza la ejecución de la operación O1, que como ya calculamos, será la hora 40,57, la cual ya no estaría dentro del periodo 1, que termina en la hora 40, sino dentro del periodo 2, que va desde el final de la hora 40 hasta la 80. Analíticamente, siguiendo el mismo procedimiento que antes, podemos determinar que la carga de la operación O1, a realizar sobre un lote de 100 unidades de A, terminará de asignarse en el segundo periodo desde la emisión de dicho lote:

$$\text{Periodo Ejecución}_i = E\left(\frac{\text{Ejecución}_i}{Tp}\right) + 1$$

$$\text{Periodo Ejecución}_1 = E\left(\frac{\text{Ejecución}_1}{Tp}\right) + 1 = E\left(\frac{40,57}{40}\right) + 1 = 2$$

Como el periodo de finalización del tiempo de cola, indicador del comienzo del procesamiento del lote en el Centro de Trabajo para la realización de una operación y la preparación previa del mismo, es diferente al periodo en que acaba la ejecución, se hace necesario calcular qué cantidad de carga se debe asignar a cada periodo o cubo de tiempo. En el caso de este lote de 100 unidades de A para la operación O1, como ya hemos determinado, la carga de 16,621 horas estándar que genera, se distribuirá en dos periodos (el 1 y el 2), por lo que sólo es preciso diferenciar entre el tiempo transcurrido desde que comienza a prepararse el Centro de Trabajo hasta el final del periodo (carga que se asignará al primero de los periodos), y el tiempo que se origina desde que empieza el periodo siguiente hasta que finaliza la ejecución (carga que se asignará al cubo de tiempo posterior). Tomando la finalización de la cola (hora 18,7 = Cola_1) como el momento de entrada en el Centro de Trabajo (o lo que es igual, de comienzo de la preparación), y viendo el tiempo restante hasta la finalización del periodo 1 (hora real 40), obtendremos, en horas reales, la carga que se asignará al primero de los dos

¹⁴ Aplicando la expresión desarrollada en el Apartado 5.2.2.

periodos en los que se distribuye; no nos quedará más que multiplicar por los factores de eficiencia y utilización del Centro de Trabajo CT1, donde se realiza, ($E_1 = 0,8$ y $U_1 = 0,95$, según las Tablas A2.6. y A2.9.), para determinar la carga en horas estándar necesaria en el periodo 1 para el procesamiento de la operación O1 a un lote de 100 unidades del ítem A¹⁵:

$$\begin{aligned} C_{Qijk(p_e + p_1)} &= [Tp \times [E(Cola_{ijk} / Tp) + 1] - Cola_{ijk}] \times E_k \times U_k \\ C_{100'1Al(p_e + 1)} &= [Tp \times [E(Cola_{1Al} / Tp) + 1] - Cola_{1Al}] \times E_1 \times U_1 = \\ &= [40 \times [E(18,7 / 40) + 1] - 18,7] \times 0,8 \times 0,95 = 16,188 \text{ h.e.} \end{aligned}$$

El resto de la carga hasta las 16,621 horas estándar, se producirá en el segundo y último periodo que abarcan la preparación y ejecución de la operación O1 al lote completo de A, por lo que se asignará al mismo:

$$C_{100'1Al(p_e + 2)} = C_{100'1Al} - C_{100'1Al(p_e + 1)} = 16,621 - 16,188 = 0,433 \text{ h.e.}$$

En consecuencia, de las 16,621 horas estándar de carga que genera la operación O1 del lote de 100 unidades de A en el Centro de Trabajo CT1, 16,188 horas estándar se producirán en el periodo 1 (entre el final de la hora real 18,7 y la hora real 40), y 0,433 en el periodo 2 (entre el final de la hora real 40 y la hora real 40,57).

Continuando con el proceso resumido en la Tabla A2.20. tras sufrir la operación O1, se produciría ahora la espera de las unidades del lote de A procesadas en el Centro de Trabajo CT1, para su desplazamiento al Centro de Trabajo CT2, donde ha de realizársele la operación O2. Como se puede observar en la Tabla A2.18., el tiempo medio de espera de salida del Centro de Trabajo CT1 calculado, fue de 0,25 horas reales. Dicho tiempo empezará a contar desde la finalización de la ejecución (hora real 40,57), por lo que la espera irá desde el final del momento 40,57 hasta la hora real 40,82, el final de la cual marcará el comienzo del desplazamiento del lote al Centro de Trabajo CT2.

El tiempo medio de desplazamiento de un lote tras sufrir la operación O1, que ya fue calculado (ver Tabla A2.18.), era de 0,2 horas reales. Por tanto, se producirá entre el final de la hora 40,82 y la hora 41,02 ($40,82 + 0,2$), al final de la cual comenzará a computarse el tiempo de cola de este lote, para sufrir la operación O2 en el Centro de Trabajo 2.

¹⁵ Según la expresión desarrollada en el Apartado 5.2.2.

De la misma manera se procedería a calcular los momentos para la finalización del tiempo de cola, preparación, ejecución, espera y desplazamiento para las operaciones O2 y O3, obteniéndose los resultados y cargas que se detallan en la Tabla A2.20. Si consideramos que el fin de un lote se produce cuando éste se desplaza hasta el almacén o el lugar donde vaya a ser utilizado como componente de otro ítem, el último valor de la columna “Hora final” de la Tabla A2.20. refleja el tiempo transcurrido desde la emisión del lote hasta su finalización. Así, por ejemplo, el lote de 100 unidades de A estará terminado transcurridas 86,17 horas reales desde que se emita.

Siguiendo el mismo procedimiento utilizado para la determinación del valor y distribución de la carga de los lotes de 100 unidades de A, se elaboran las Tablas A2.35., A2.36. y A2.37., donde se desarrollan los cálculos necesarios para averiguar la cuantía y asignación de las cargas originadas por el procesamiento de los lotes de 2.000 unidades de B, 500 unidades de C y 400 unidades del ítem C, respectivamente.

Ítem	B					
Tamaño	2.000					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Inicio	CT2			0	1	
Confección _B		2		2	1	
Desplazamiento _B		0,25		2,25	1	
Cola ₄		10		12,25	1	
Preparación ₄		0,5	0,391	12,75	1	20,723
Ejecución ₄	O4	25,22	20,332	38,75	1	
Espera ₄	CT1	0,25		39	1	
Desplazamiento ₄		0,3		39,3	1	
Cola ₅		15		54,3	2	
Preparación ₅		0,2	0,152	54,5	2	19,532
Ejecución ₅		43,165	38	104,5	3	18,62
Espera ₅		0,25		104,75	3	
Inspección _B		0,5		105,25	3	
Desplazamiento ₅		0,25		105,5	3	

Tabla A2.21. Programación hacia delante y carga para un lote de 2.000 unidades del ítem B.

Según se aprecia en la Tabla A2.21., los lotes de 2.000 unidades del ítem B generarán una carga de 20,723 h.e. en el Centro de Trabajo 2, un periodo después de su emisión, mientras que la carga que se produce en el Centro de Trabajo 1 se distribuirá entre los periodos segundo y tercero tras la emisión del lote (19,532 h.e. y 18,62 h.e., respectivamente).

Ítem	C					
Tamaño	500					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Inicio				0	1	
Confección _C		2		2	1	
Desplazamiento _C		0,25		2,25	1	
Cola ₆	CT3 O6	10		12,25	1	6,408
Preparación ₆		0,5	0,4005	12,75	1	
Ejecución ₆		7,5	6,0075	20,25	1	
Espera ₆		0,2		20,45	1	
Desplazamiento ₆		0,3		20,75	1	
Cola ₇	CT2 O7	10		30,75	1	7,233
Preparación ₇		0,2	0,1564	30,95	1	
Ejecución ₇		15	11,73	45,95	2	
Espera ₇		0,25		46,2	2	
Inspección _C		0,5		46,7	2	
Desplazamiento ₇		0,25		46,95	2	

Tabla A2.22. Programación hacia delante y carga para un lote de 500 unidades del ítem C.

En relación a los lotes del ítem C, la diferencia de la carga originada por las emisiones de lotes de 400 o 500 unidades (Tablas A2.22. y A2.23.), se encuentra, en este ejemplo, sólo en el valor de ésta, si bien también se podrían producir variaciones en el momento en que se necesita la capacidad.

Así, los lotes del ítem C incluidos en el Plan de Materiales (Tabla A.2.1.) generarán carga en el Centro de Trabajo 3, un periodo después de la emisión. Sin embargo, la capacidad necesaria para el procesamiento de los lotes de este ítem en el Centro de Trabajo 2 se distribuirá entre los periodos primero y segundo desde la emisión de tales lotes.

Ítem	C					
Tamaño	400					
Concepto	CT	Tiempo (h.r.)	Carga (h.e.)	Hora final	Periodo	Carga periodo (h.e.)
Inicio	CT3 O6			0	1	
Confección _C		2		2	1	
Desplazamiento _C		0,25		2,25	1	
Cola ₆		10		12,25	1	
Preparación ₆		0,5	0,4005	12,75	1	5,207
Ejecución ₆	CT2 O7	6	4,806	18,75	1	
Espera ₆		0,2		18,95	1	
Desplazamiento ₆		0,3		19,25	1	
Cola ₇		10		29,25	1	
Preparación ₇		0,2	0,1564	29,45	1	8,406
Ejecución ₇		12	9,384	41,45	2	1,134
Espera ₇		0,25		41,7	2	
Inspección _C		0,5		42,2	2	
Desplazamiento ₇		0,25		42,45	2	

Tabla A2.23. Programación hacia delante y carga para un lote de 400 unidades del ítem C.

A2.3.3. Determinación del Plan de Carga

La identificación de la capacidad necesaria para el procesamiento de los lotes incluidos en el Plan de Materiales y la continuación de los que se encuentran en proceso, así como la distribución de ésta entre los periodos del horizonte de planificación, se han reflejado por separado en tablas para una mejor comprensión del origen de las cargas. Así, en la Tabla A2.24., se desarrolla el procedimiento seguido para la elaboración del Plan de Carga en el Centro de Trabajo 1. Se observa que la carga total está compuesta por la suma de:

- La capacidad necesaria para finalizar los lotes en curso (sólo A y B se fabrican en el Centro de Trabajo 1), incluida en la Tabla A2.2.

- La carga generada por los lotes planificados de A que, tal como consta en el Plan de Materiales (ver Tabla A2.1.), se emitirán en los periodos 1, 3, 5 y 6 (Carga de los pedidos A1, A3, A5 y A6).
- La carga generada por los lotes planificados de B que, tal como se incluye en el Plan de Materiales (ver Tabla A2.1.), se emitirán en los periodos 2, 3, 4 y 7 (Carga de los pedidos B2, B3, B4 y B7).

Para la distribución de la carga se ha considerado que un lote comienza a fabricarse en el periodo siguiente al que se emite, dado que se atribuye la emisión al final del periodo. Así, por ejemplo, la capacidad necesaria para el procesamiento de un lote de 2.000 unidades de B, emitido en el periodo 2 (Carga B2), se podría originar a partir del periodo 3. En concreto, según la Tabla A2.21., se debe asignar en el Centro de Trabajo 1, 19,532 horas estándar al segundo periodo tras la emisión (periodo 4) y 18,62 horas estándar al tercer periodo después del lanzamiento del pedido (periodo 5). El mismo procedimiento seguido para este Centro de Trabajo CT1 se utilizará para la distribución de las cargas dentro de los Centros CT2 y CT3 (Tablas A2.39. y A2.40.).

Ítem/Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
A	100		100		100	100		
B		2000	2000	2000			2000	
C	500	500		500		400		500
P. Curso A	10,868	5,753						
P. Curso B		20,125	12,833					
Carga A1		16,188	0,433					
Carga A3				16,188	0,433			
Carga A5						16,188	0,433	
Carga A6							16,188	0,433
Carga B2				19,532	18,62			
Carga B3					19,532	18,62		
Carga B4						19,532	18,62	
Carga B7								
TOTAL	10,868	42,066	13,266	35,72	38,585	54,34	35,241	0,4332

Tabla A2.24. Plan de Carga para el Centro de Trabajo 1 (CT1).

Ítem/Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
A	100		100		100	100		
B		2.000	2.000	2.000			2.000	
C	500	500		500		400		500
P. Curso A		14,056						
P. Curso B	20,113							
P. Curso C	3,812	6,165						
Carga A1			18,142					
Carga A3					18,142			
Carga A5							18,142	
Carga A6								18,142
Carga B2			20,723					
Carga B3				20,723				
Carga B4					20,723			
Carga B7								20,723
Carga C1		7,2335	4,6529					
Carga C2			7,2335	4,6529				
Carga C4					7,2335	4,6529		
Carga C6							8,4065	1,1339
TOTAL	23,925	27,455	50,751	25,376	46,099	4,6529	26,549	39,999

Tabla A2.25. Plan de Carga para el Centro de Trabajo 2 (CT2).

El Plan de Carga para el Centro de Trabajo 2 (Tabla A2.25.) tiene una carga media por periodo de 30,59 h.e., observándose un valor excesivamente bajo en el periodo 6, ya que la carga planificada para esta semana es tan solo de 4,6529 h.e.

Esta misma situación de ociosidad parece producirse en el Centro de Trabajo 3, para los periodos 4, 6 y 8, donde la capacidad necesaria es inferior a una hora estándar, mientras que en el resto de periodos el valor de la carga se encuentra en torno a las 6 h.e.

No obstante, para completar el análisis y tomar las decisiones oportunas, la empresa deberá comparar estos Planes de Carga con la capacidad disponible por Centro de Trabajo (véase Capítulo 5).

Ítem/Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
A	100		100		100	100		
B		2.000	2.000	2.000			2.000	
C	500	500		500		400		500
P. Curso A		0,569						
P. Curso C	5,867							
Carga A1				0,641				
Carga A3						0,641		
Carga A5								0,641
Carga A6								
Carga C1		6,408						
Carga C2			6,408					
Carga C4					6,408			
Carga C6							5,207	
TOTAL	5,867	6,977	6,408	0,641	6,408	0,641	5,207	0,641

Tabla A2.26. Plan de Carga para el Centro de Trabajo 3 (CT3).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFORD, L.P. , BANGS, J.R. y HAGEMANN, G.E. (1969), *Manual de la Producción*, Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, Barcelona.
- CHEN, T. C. E. (1986), "Capacity requirements planning by stochastic linear programming", *Mathematical Modelling*, Vol. 7, No. 2-3, pp. 443-448.
- COMPANYS PASCUAL, R. y COROMINAS SUBIAS, A. (1995), *Organización de la Producción II*, Edicions UPC, Barcelona.
- CONNOR, S. (1986), "The Value-Added Equation", *Manufacturing Systems*, Vol. 4, No. 12, pp. 19 - 22.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A. y otros (1995), *Dirección de Operaciones. Aspectos estratégicos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- JONSSON, P. y MATTSSON, S. (2002), "Use and applicability of capacity planning methods", *Production and Inventory Management*, Vol. 43, No. 3/4, pp. 89-95.
- NIEBEL, B.W (1996), *Ingeniería Industrial. Métodos, Tiempos y Movimientos*, Alfaomega, México.

- SCOTT, B. (1994), *Manufacturing Planning System*, McGraw-Hill, Berkshire, England.
- SLACK, N. (1997), *The Blackwell Encyclopedic Dictionary of Operations Management*, Blackwell, Oxford.
- WEMMERLÖV, U. (1984), *Capacity Management Techniques. For Manufacturing Companies with MRP Systems*, American Production and inventory Control Society, Cincinnati, Ohio.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- DE LA FUENTE GARCÍA, D. y PINO DíEZ, R. (2001), *Teoría de Líneas de Espera. Modelos de colas*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo.
- LUNN, T. y NEFF, S. A. (1992), *MRP Integrating Material Requirements Planning And Modern Business*, Irwin, New York.

ANEXO

3

NOMENCLATURA EMPLEADA

A	= acuracidad o exactitud deseada, en tanto por uno.
a_i	= factor de aprovechamiento de la operación i , en tanto por uno. Calculados como $a_i = (1 - de_i)$, considerando de_i como la fracción de defectuosas media obtenida al ejecutar la operación i al artículo j .
A_j	= aprovechamiento de la ruta del ítem j , en tanto por uno. Calculado como el producto de los factores de aprovechamiento (a_i) de todas las operaciones que conforman la ruta el ítem.
CD_{kp}	= capacidad disponible, en horas estándar, para un periodo p en el Centro de Trabajo k .
C_{jkp}	= tiempo de carga, en horas estándar, originado por un ítem j , para un periodo p , en el Centro de Trabajo k .
C_{kp}	= tiempo de carga por periodo p en el Centro de Trabajo k , en horas estándar.

C_{Qijk}	= tiempo de carga por el procesamiento de la operación i a un lote de Q unidades del ítem j en el Centro de Trabajo k , en horas estándar.
C_{Qijkp}	= carga en horas estándar, originada en el Centro de Trabajo k , por todas las operaciones que utilizan este Centro para un lote del ítem j , en un periodo p .
C_{Qjkp}	= carga en horas estándar, asignada al periodo p , por el procesamiento de la operación i a un lote de Q unidades del ítem j en el Centro de Trabajo k .
$C_{Qj,lp}$	= carga en horas estándar, asignada al periodo p , originada en el Centro de Trabajo k , por todas las operaciones que utilizan este Centro para un lote de Q unidades del ítem j , emitido en el periodo l .
de_i	= factor de defectuosas de la operación i , en tanto por uno.
d_i	= distancia desde el Centro de Trabajo en el que a un lote se le ejecuta la operación i , hasta el lugar donde se le vaya a realizar la operación siguiente o al almacén, si el lote ha pasado ya por todas las operaciones de su ruta.
d_{mj}	= distancia desde el lugar donde están almacenados los materiales hasta el Centro de Trabajo donde comenzará la ruta de fabricación del ítem j .
E_k	= factor de eficiencia del Centro de Trabajo k , utilizado para reflejar los distintos ritmos de actividad de los diferentes trabajadores o máquinas que intervienen en el Centro de Trabajo.
E_{kp}	= factor de eficiencia del Centro de Trabajo k durante el periodo p .
f	= fracción de unidades que se inspecciona de un lote.
Fe_{Qj}	= fecha de emisión de un lote de Q unidades del ítem j .
$f_{x/y,ijk}$	= fracción de carga asignada al periodo número x , de un total de y , entre los que se reparte la carga de la operación i , que se realiza al ítem j en el Centro de Trabajo k .

HP	= horizonte de planificación.
I	= número total de operaciones que se ejecutan en la empresa.
J	= número de ítems que fabrica la empresa.
M	= número de Centros de Trabajo que tiene la empresa.
m_{iQ_j}	= número de mantenencias medias necesarias para transportar un lote de tamaño Q del ítem j , tras habersele realizado la operación i .
m_{mQ_j}	= número de mantenencias necesarias para transportar los materiales precisos para la fabricación de un lote de tamaño Q del ítem j .
NHP	= número de horas productivas.
NHR	= número de horas reales.
$n^{\circ}maq_{kt}$	= número total de máquinas que se podrían utilizar en el turno t del Centro de Trabajo k .
$n^{\circ} trab\ maq_{kt}$	= número de trabajadores que necesitan una máquina para ejercer su trabajo en el turno t del Centro de Trabajo k .
$n^{\circ} trab_{kt}$	= número de trabajadores del turno t del Centro de Trabajo k , a los que no les afecta la disponibilidad de máquinas para trabajar y que pueden realizar su trabajo ya sea individualmente o en grupo (en tal caso, si una tarea precisa del trabajo conjunto con otros compañeros se considerará, a efectos del cálculo de la capacidad, como uno solo).
$n^{\circ} trab\ por\ maq_{kt}$	= número de trabajadores necesarios para poner en funcionamiento cada máquina que compone el Centro de Trabajo k en el turno t .
P_0	= probabilidad de que ningún trabajo esté en cola de espera a la llegada de un lote al sistema.
p_b	= periodo concreto en los que se deberá distribuir la carga, donde b toma valores desde 1 hasta α_{Qijk} .

p_e	= periodo de emisión del lote.
P_n	= probabilidad de que haya n trabajos en cola de espera a la llegada de un lote al sistema de cola.
P_{Qil}	= número de periodos en los que se distribuye la carga del lote l de tamaño Q del ítem j .
Qe_j	= lote emitido del ítem j .
Qf_{ij}	= unidades sin defectos que salen del Centro de Trabajo tras ejecutársele la operación i a un lote del ítem j .
Q_{ij}	= número de unidades a procesar del artículo j , en la operación i .
Q_j	= total de unidades que componen el lote emitido del ítem j .
$Tcola_{ijk}$	= tiempo de espera en cola, en el Centro de Trabajo k , para que se le realice la operación i a un lote de artículo j , en horas reales.
$Tcola_{ijkp}$	= tiempo de espera en cola, en el Centro de Trabajo k , para que se le realice la operación i a un lote de artículo j , en horas reales, que se produce en el periodo p .
$Tcola_k$	= tiempo de espera en cola en el Centro de Trabajo k , en horas reales.
$Tconf_j$	= tiempo de confección de un pedido del artículo j , en horas reales.
Tco_{Qijk}	= tiempo transcurrido desde la emisión del lote hasta que se inicia la ejecución de la operación i en el Centro de Trabajo k al lote de tamaño Q del ítem j .
tc_{ijk}	= tiempo de carga, en horas estándar, que generaría el procesamiento de operación i a una unidad del artículo j en el Centro de Trabajo k .
tc'_{ijk}	= tiempo de carga, en horas estándar, que generaría el procesamiento de operación i a una unidad del artículo j en el Centro de Trabajo k , utilizando, para su cálculo, un tamaño medio de lote.

Tc_k'	= tiempo de carga, en horas reales, calculado como la media ponderada, de acuerdo al número de veces que se repite cada operación, relacionado con las tasas de llegada de éstas.
Tc_{Qijk}	= tiempo de carga, en horas reales, necesario para la realización de la operación i , en el Centro de Trabajo k , a todas las unidades que conforman el lote de Q unidades del artículo j .
Tc_{Qijk}'	= tiempo, en horas reales, necesario para el procesamiento de la operación i , en el Centro de Trabajo k , para un lote de tamaño medio del ítem j .
$Tc_{Qijl,k}$	= tiempo de carga, en horas reales, necesario para la realización de la operación i , en el Centro de Trabajo k , a todas las unidades que conforman el lote de Q unidades del artículo j emitido en el periodo l .
td_{ijk}	= tiempo de desplazamiento por unidad de distancia y manutención, en horas reales, necesario para el traslado del ítem j desde el Centro de Trabajo k , donde se le acaba de realizar la operación i , al siguiente de su ruta o al almacén.
tdm_j	= tiempo de desplazamiento por unidad de distancia y manutención, en horas reales, necesario para el traslado hasta el Centro de Trabajo donde se le realizará la primera operación, de los materiales necesarios para elaborar un lote de ítem j .
Tdm_{Qj}	= tiempo de desplazamiento, en horas reales, de los materiales necesarios para elaborar un lote de tamaño Q del artículo j , desde su zona de almacenamiento hasta el primer Centro de Trabajo de su ruta.
Tdm_{Qli}	= tiempo de desplazamiento, en horas reales, de los materiales necesarios para elaborar un lote de tamaño Q del artículo j emitido en el periodo l , desde su zona de almacenamiento hasta el primer Centro de Trabajo de su ruta.

Td_{Qijk}	= tiempo de desplazamiento, en horas reales, de un lote de Q unidades del ítem j , desde el Centro de Trabajo k , donde se ejecuta la operación i , hasta el siguiente Centro de Trabajo o hasta la zona de almacenamiento, si la operación i es la última de su ruta.
Td_{Qijk}'	= tiempo de desplazamiento, en horas estándar, tras la ejecución de la operación i en el Centro de Trabajo k a un lote de tamaño medio del ítem j .
Td_{Qijkp}	= tiempo de desplazamiento que se produce en el periodo p , en horas estándar, tras la ejecución de la operación i en el Centro de Trabajo k a un lote de tamaño Q del ítem j .
Td_{ijlk}	= tiempo de desplazamiento, en horas reales, de un lote de Q unidades del ítem j emitido en el periodo l , desde el Centro de Trabajo k , donde se ejecuta la operación i , hasta el siguiente Centro de Trabajo o hasta la zona de almacenamiento, si la operación i es la última de su ruta.
te_i	= tiempo necesario para desarrollar o ejecutar una vez la operación i , en horas estándar.
Ten_{Qijk}	= Momento de entrada en el Centro de Trabajo k para ejecutar la operación i , al lote de tamaño Q del ítem j . Refleja el tiempo transcurrido, en horas reales, desde la emisión del lote hasta la entrada en un Centro, entendida ésta como el comienzo del ajuste de los equipos si ello fuera necesario.
$Tesp_{ijk}$	= tiempo de espera, en horas reales, a la salida del Centro de Trabajo k , una vez realizada la operación i al lote de artículo j , para su traslado al Centro de Trabajo donde se le realizará la operación siguiente, o al almacén si el lote está completado.
$Tesp_{ijkp}$	= tiempo de espera, en horas reales, a la salida del Centro de Trabajo k , una vez realizada la operación i al lote de artículo j , para su traslado al Centro de Trabajo donde se le realizará la operación siguiente, o al almacén si el lote está completado, que se produce en el periodo p .

Tf_{Qj}	= tiempo que transcurre una vez finalizada la última operación de la ruta y hasta que el lote de Q unidades de j quede localizado en su lugar de destino.
Tfo_{Qijk}	= momento de finalización de la operación i , en el Centro de Trabajo k , al lote de Q unidades del ítem j . Indica el tiempo que ha pasado desde que se emitió el lote hasta que se ejecuta la operación i a todas las unidades que lo componen.
Tf_{Qj}	= momento de finalización del proceso productivo del lote de tamaño Q del ítem j . Refleja el tiempo transcurrido, en horas reales, desde la emisión hasta la terminación completa del lote.
$Tinsp_j$	= tiempo, en horas reales, dedicado a la inspección de un lote del artículo j , si ésta se realiza al final de la ruta.
$Tinsp_{Qj}$	= tiempo, en horas reales, dedicado a la inspección de un lote de Q unidades del artículo j , si ésta se realiza al final de la ruta.
$Tinsp_{Qijk}$	= tiempo de inspección de un lote, en horas reales, tras realizarle la operación i a un lote de Q unidades el ítem j en el Centro de Trabajo k .
$Tinsp_{Qijk}$	= tiempo de inspección de un lote, en horas reales, tras realizarle la operación i a un lote de Q unidades el ítem j en el Centro de Trabajo k , que se asigna al periodo p .
$Tinsp_{Qijk}$	= tiempo de inspección de un lote, en horas reales, tras realizarle la operación i a un lote de Q unidades el ítem j , emitido el periodo l , en el Centro de Trabajo k .
$Tint_{Qijk}$	= tiempo intermedio existente desde que finaliza el procesamiento de la operación i a un lote Q del ítem j en el Centro de Trabajo k , hasta el comienzo del procesamiento de la operación que se realiza en el siguiente Centro de Trabajo de su ruta.
tiu_{ijk}	= tiempo de inspección unitario de un ítem j , una vez que se le ha ejecutado la operación i en el Centro de Trabajo k , en horas reales.

tiu_j	= tiempo de inspección unitario de un ítem j , al final de su ruta, en horas reales.
T_k	= número de turnos de trabajo por día en el Centro de Trabajo k .
Tp	= duración del periodo de tiempo.
tpd_{ijk}	= tiempo de preparación para el desplazamiento de un lote del artículo j , en horas reales, en el caso de que éste sea necesario, tras serle realizada la operación i en el Centro de Trabajo k , cuando el traslado anterior ha sido de un ítem al que se le acaba de ejecutar una operación diferente.
$tpdm_j$	= tiempo de preparación, en horas reales, para el desplazamiento de los materiales que necesita un lote de artículo j , en el caso de que el traslado inmediatamente anterior constara de componentes distintos y precisen de ajuste en el elemento de transporte.
tp_{ik}	= tiempo de preparación o ajuste del Centro de Trabajo k para ejecutar la operación i , tras haber estado realizando una operación distinta con anterioridad, ofrecido en horas estándar.
TS_{Qj}	= tiempo de suministro de un lote de Q unidades del ítem j , en horas reales.
TS_{Qjl}	= tiempo de suministro de un lote de Q unidades del ítem j emitido en el periodo l , en horas reales.
U_k	= factor de utilización del Centro de Trabajo k , que relaciona el número de horas productivas con las reales.
$u.r._{kt}$	= número de unidades de tiempo reales (horas reales, por ejemplo) del turno t en el Centro de Trabajo k .
V	= margen de variación permitido para la consideración de cumplimiento de la planificación de capacidad, para evitar que la probabilidad sea nula, dado que tratamos con una variables continuas.

v_i	= aprovechamiento acumulado de la operación i , producto de los factores de aprovechamientos de la operación i (a_i) y de todas las operaciones siguientes que se realicen hasta el final de su ruta.
W_k	= tiempo de espera medio en cola de espera en el Centro de Trabajo k .
$Z_{1-[(1-\alpha)/2]}$	= valor de la cola izquierda de una distribución normal $N(0,1)$, para una probabilidad de $1-[(1-\alpha)/2]$.
α	= nivel de confianza (en tanto por uno).
α_{Qijk}	= número de periodos en los que se distribuye la carga generada por el procesamiento de la operación i a un lote de Q unidades del ítem j en el Centro de Trabajo k .
λ_k	= tasa media de llegada de lotes al Centro de Trabajo k , calculada como la suma de todas las tasas de llegada de las operaciones que se ejecutan en el Centro.
λ_{ik}	= tasa de llegada al Centro de Trabajo k del ítem al que hay que hacerle la operación i .
ρ	= utilización del sistema de cola ($\rho = \lambda_k / \mu_k$).
μ_{ik}	= tasa de servicio o salida de la operación i en el Centro de Trabajo k . Indica cuántos lotes a los que se les ha ejecutado la operación i , saldrían por unidad de tiempo, en el caso de que el Centro de Trabajo se dedicara a realizar únicamente esta operación.
μ_k	= tasa media de servicio o salida del Centro del Trabajo k , calculada como la suma de todas las tasas de salida de las operaciones que se ejecutan en el Centro.

ANEXO

4

DESARROLLO DE LA PROBABILIDAD DE CUMPLIMIENTO DEL EJEMPLO UTILIZADO EN EL APARTADO 4.4.

En este anexo se desarrolla la expresión (4.4), que refleja la probabilidad de cumplimiento de la planificación de capacidad elaborada mediante CRP, para el primero de los ejemplos que se exponen en el Apartado 4.4. Es el caso de una empresa que emite tres lotes de dos ítems en un horizonte de planificación de cuatro periodos y para lo que utiliza dos Centros de Trabajo, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} P(\text{Cumpla planificación CRP}) &= P(E_{11} \times U_{11} = 0,7 \pm V) \times P(E_{12} \times U_{12} = 0,64 \pm V) \times \\ &\times P(E_{13} \times U_{13} = 0,57 \pm V) \times P(E_{14} \times U_{14} = 0,8 \pm V) \times P(E_{21} \times U_{21} = 0,64 \pm V) \times \\ &\times P(E_{22} \times U_{22} = 0,6 \pm V) \times P(E_{23} \times U_{23} = 0,75 \pm V) \times \\ &\times P(E_{24} \times U_{24} = 0,86 \pm V) \times P\left(f_{\frac{1}{2}1A1} \times \left(te_1 \times 200 \times v_1 + tp_{11} \left(1 - \frac{\lambda_{11}}{\lambda_1}\right)\right) = 10 \pm V\right) \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1} \right) \right)}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right)^2 \right] \\
& \times P(Tconf_A + (tdm_A \times d_1 \times m_{1200}) + \frac{\left[\sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1} \right) \right)}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right)^2 \right] \right]}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1} \right) \right)}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right)^2 \right] \right]} = \\
& = 104,375 \pm V) \times P(f_{2/21A1} \times \left(te_1 \times 200 \times v_1 + tp_{11} \left(1 - \frac{\lambda_{11}}{\lambda_1} \right) \right) = 20 \pm V) \times \\
& \times P(te_2 \times 200 \times v_2 + tp_{22} \left(1 - \frac{\lambda_{22}}{\lambda_2} \right) = 35 \pm V) \times \\
& \sum_{i \in R2} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i2} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i2} \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_2} \right) \right)}{\overline{E_2} \times \overline{U_2}} \right)^2 \right] \\
& \times P((td_{1A1} \times d_1 \times m_{200}) + \frac{\left[\sum_{i \in R2} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i2} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i2} \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_2} \right) \right)}{\overline{E_2} \times \overline{U_2}} \right)^2 \right] \right]}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in R2} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i2} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i2} \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_2} \right) \right)}{\overline{E_2} \times \overline{U_2}} \right)^2 \right] \right]} \\
& \leq 38,245) \times \\
& \times \left[\frac{\sum_{i \in R2} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i2} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i2} \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_2} \right) \right)}{\overline{E_2} \times \overline{U_2}} \right)^2 \right]}{P((td_{1A1} \times d_1 \times m_{200}) + \frac{\left[\sum_{i \in R2} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i2} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i2} \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_2} \right) \right)}{\overline{E_2} \times \overline{U_2}} \right)^2 \right] \right]}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in R2} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i2} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i2} \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_2} \right) \right)}{\overline{E_2} \times \overline{U_2}} \right)^2 \right] \right]} \right]} \\
& \leq 38,245) -
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -P((td_{1A1} \times d_1 \times m_{200}) + \frac{\sum_{i \in R2} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i2} \times \left(\frac{te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i2} (1 - \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_2})}{\overline{E_2} \times \overline{U_2}} \right)^2 \right]}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in R2} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i2} \times \left(\frac{te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i2} (1 - \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_2})}{\overline{E_2} \times \overline{U_2}} \right)^2 \right] \right]}) + \\
& + (td_{2A2} \times d_2 \times m_{200}) + \frac{\sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \left(\frac{te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} (1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1})}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right)^2 \right]}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \left(\frac{te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} (1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1})}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right)^2 \right] \right]} \leq 120) \times \\
& \times P(te_3 \times 200 \times v_3 + tp_{31} (1 - \frac{\lambda_{31}}{\lambda_1}) = 40 \pm V) \times \\
& \times P((td_{2A2} \times d_2 \times m_{200})_4 + \frac{\sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \left(\frac{te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} (1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1})}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right)^2 \right]}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \left(\frac{te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} (1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1})}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right)^2 \right] \right]}) \\
& \leq 70) \times \times P(f_{\frac{1}{2}1A1} \times \left(te_1 \times 300 \times v_1 + tp_{11} (1 - \frac{\lambda_{11}}{\lambda_1}) \right) = 10 \pm V) \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times P(Tconf_A + (tdm_A \times d_1 \times m_{1200}) + \\
& \quad \sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1} \right) \right)}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right)^2 \right] \\
& + \frac{107,5 \pm V}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1} \right) \right)}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right] \right]} \times \\
& \times P(f_{1/2}^{4B2} \times \left(te_4 \times 100 \times v_4 + tp_{42} \left(1 - \frac{\lambda_{42}}{\lambda_2} \right) \right) = 20 \pm V) \times \\
& \times P(Tconf_B + (tdm_B \times d_4 \times m_{4200}) + \\
& \quad \sum_{i \in R2} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i2} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i2} \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_2} \right) \right)}{\overline{E_2} \times \overline{U_2}} \right)^2 \right] \\
& + \frac{93,333 \pm V}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in R2} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i2} \times \frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i2} \left(1 - \frac{\lambda_{i2}}{\lambda_2} \right) \right)}{\overline{E_2} \times \overline{U_2}} \right] \right]} \times \\
& \times P(f_{2/2}^{4B2} \times \left(te_4 \times 100 \times v_4 + tp_{42} \left(1 - \frac{\lambda_{42}}{\lambda_2} \right) \right) = 25 \pm V) \times \\
& \times P(f_{1/2}^{5B1} \times \left(te_5 \times 100 \times v_5 + tp_{51} \left(1 - \frac{\lambda_{51}}{\lambda_1} \right) \right) = 45 \pm V) \times
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1} \right) \right)^2}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right) \right] \\ & \times P((td_{4B2} \times d_4 \times m_{4100})) + \frac{\left[\sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1} \right) \right)^2}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right) \right] \right]}{2 \times \left[1 - \sum_{i \in R1} \sum_{j=1}^J \left[\lambda_{i1} \times \left(\frac{\left(te_i \times Q_j \times v_i + tp_{i1} \left(1 - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_1} \right) \right)^2}{\overline{E_1} \times \overline{U_1}} \right) \right] \right]} = \\ & = 34,681 \pm V) \end{aligned}$$

ANEXO

5

SIMULACIÓN DE LA REDUCCIÓN EN EL NÚMERO DE VARIABLES ALEATORIAS

En este anexo se presentan los resultados graficados de la simulación realizada para analizar la reducción en el número de variables aleatorias que se consigue con la utilización del modelo de Planificación de Capacidad desarrollado en vez de CRP.

Según se analiza en el Apartado 5.6.3., la cantidad de variables aleatorias necesarias para los cálculos de capacidad dependen de la complejidad del proceso productivo. En este sentido se conseguirá una máxima reducción de variables en los procesos más complejos y una mínima reducción en los más simples y automatizados.

A continuación se refleja cómo inciden en la máxima y mínima reducción en el número de variables aleatorias: la cantidad de Centros de Trabajo que tenga la empresa, la variedad de ítems, las operaciones necesarias para elaborar cada uno de ellos y el número de lotes que se emiten de cada ítem dentro del horizonte de planificación. En concreto se ha analizado la posibilidad de que la empresa tenga un máximo de 50 Centros de Trabajo diferentes, 10.000 ítems, 20 operaciones necesarias para elaborar cada uno de ellos y la posibilidad de que se emitan hasta 20 lotes de cada uno de los ítems dentro de un horizonte de planificación de 20 periodos.

A.5.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA MÁXIMA REDUCCIÓN EN EL NÚMERO DE VARIABLES

Si una empresa tiene un proceso productivo *Job-Shop* muy complejo en el que se originan colas de espera a la entrada y la salida de los Centros de Trabajo y su política de calidad implica la inspección de los lotes tras la operación de todas las operaciones que conforman su ruta de fabricación, la sustitución de CRP por el modelo presentado en este trabajo ofrece los máximos beneficios.

Para analizar esto se presentan en los Gráficos del A5.1. hasta el A5.28 la reducción, en tanto por uno, en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, obtenidos a partir de una simulación para un horizonte de planificación de 20 periodos con distintos valores de operaciones por ítems, número de ítems y lotes que se emiten de cada uno de ellos dentro del horizonte de planificación. Así, por ejemplo, en el Gráfico A.5.1. se puede observar que, para una empresa con un proceso productivo complejo, que fabrique únicamente 5 ítems a partir de 2 operaciones cada uno, la máxima reducción en el número de variables que conseguiría sería del 56,3%, lo cual se alcanzaría si la planta dispone de 5 Centros de Trabajo y se emiten 20 lotes de cada uno de los ítems durante todo el horizonte de planificación.

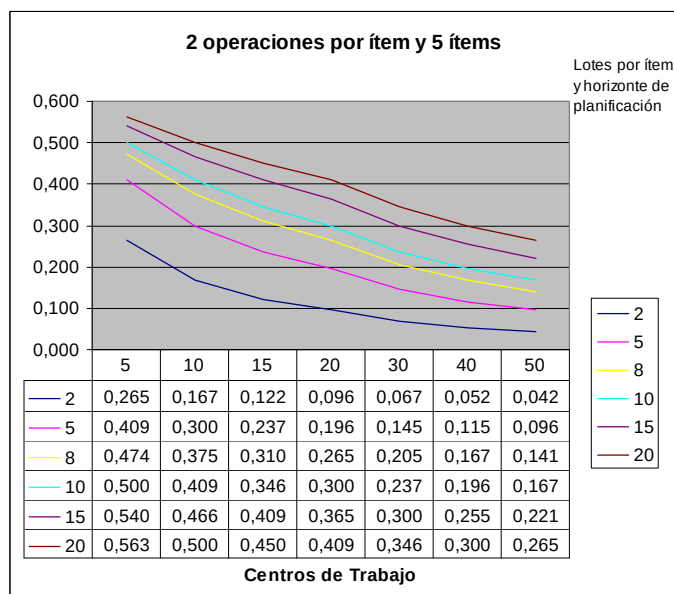


Gráfico A5.1. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 5 ítems y 2 operaciones por ítem.

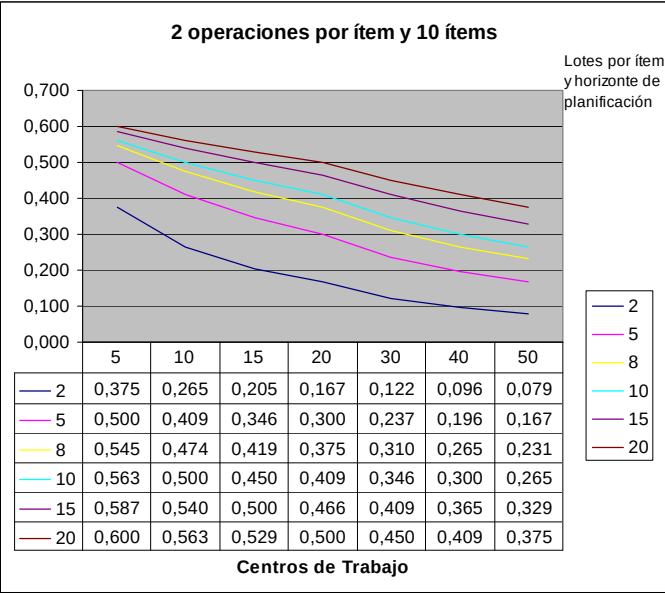


Gráfico A5.2. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10 ítems y 2 operaciones por ítem.

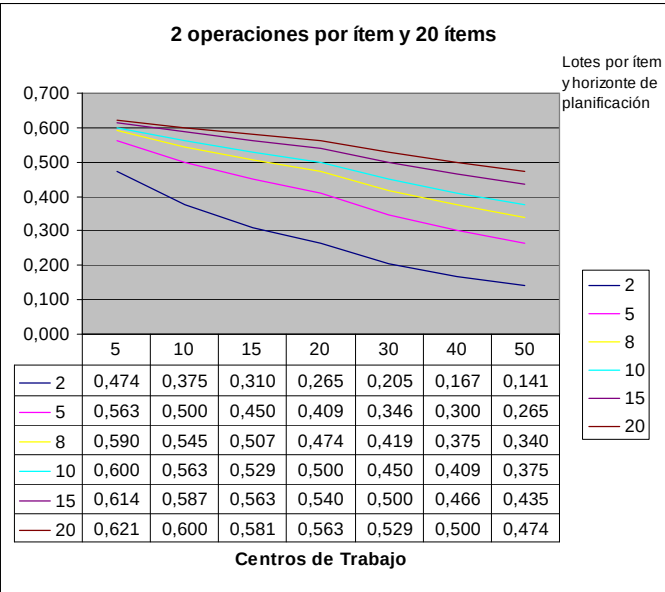


Gráfico A5.3. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 20 ítems y 2 operaciones por ítem.

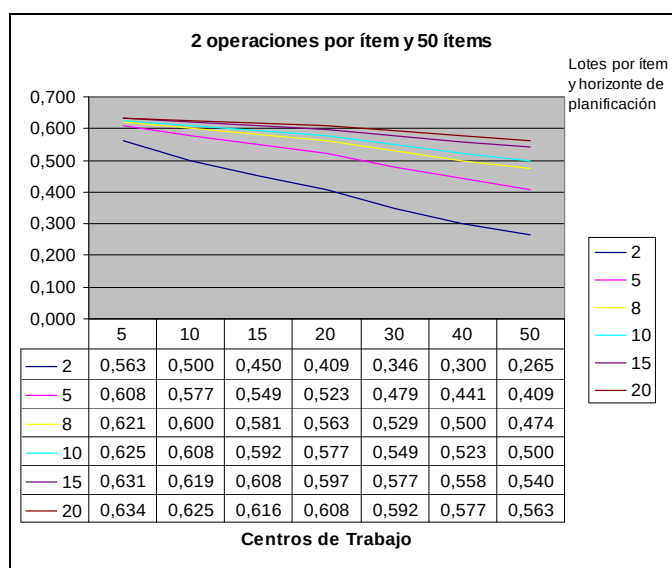


Gráfico A5.4. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 50 ítems y 2 operaciones por ítem.

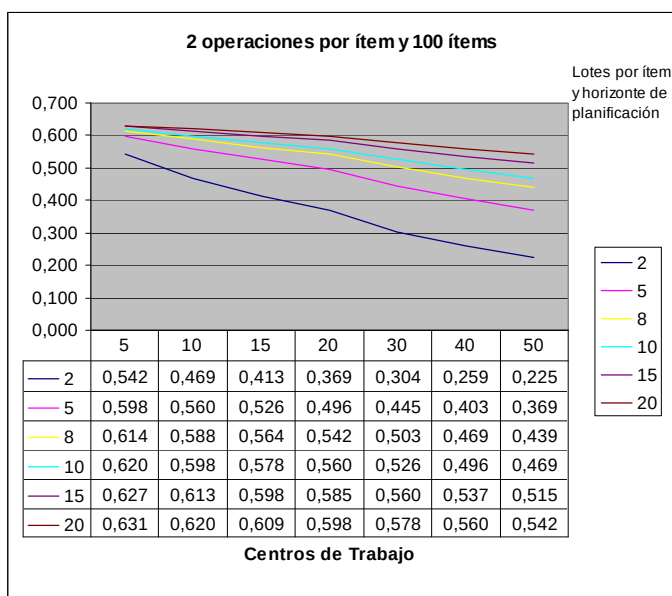


Gráfico A5.5. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 100 ítems y 2 operaciones por ítem.

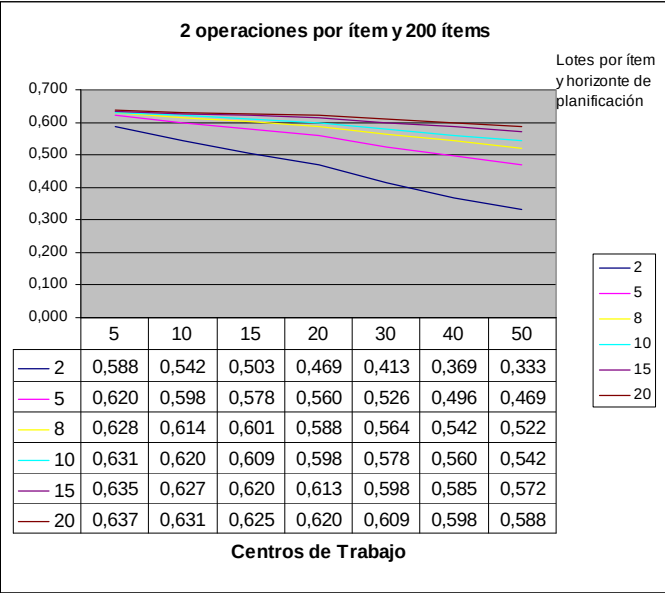


Gráfico A5.6. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 200 ítems y 2 operaciones por ítem.

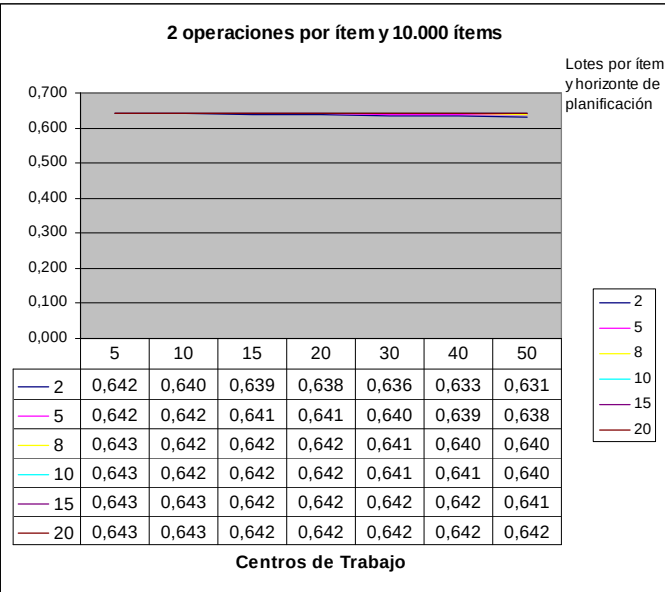


Gráfico A5.7. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10.000 ítems y 2 operaciones por ítem.

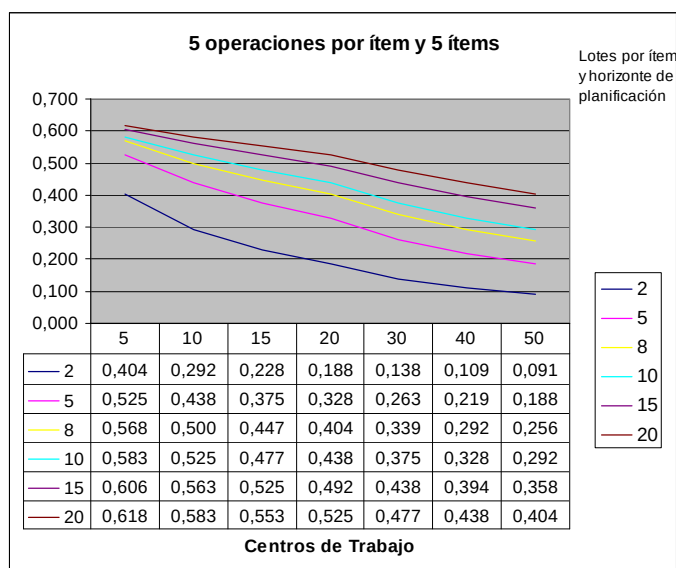


Gráfico A5.8. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 5 ítems y 5 operaciones por ítem.

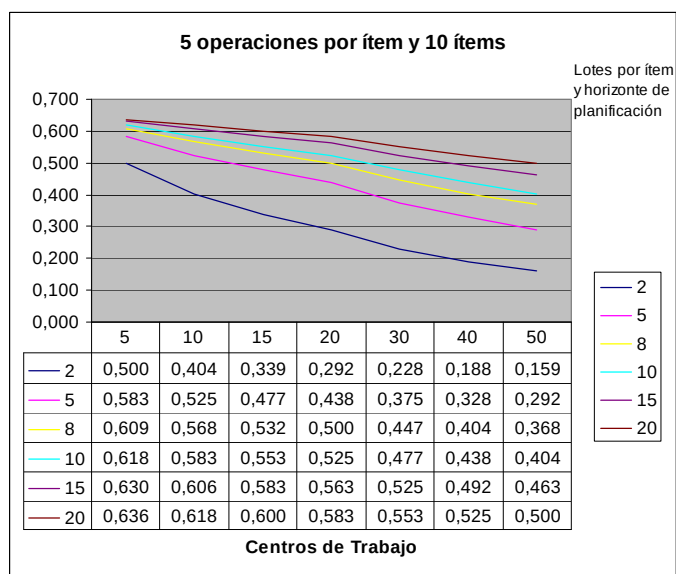


Gráfico A5.9. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10 ítems y 5 operaciones por ítem.

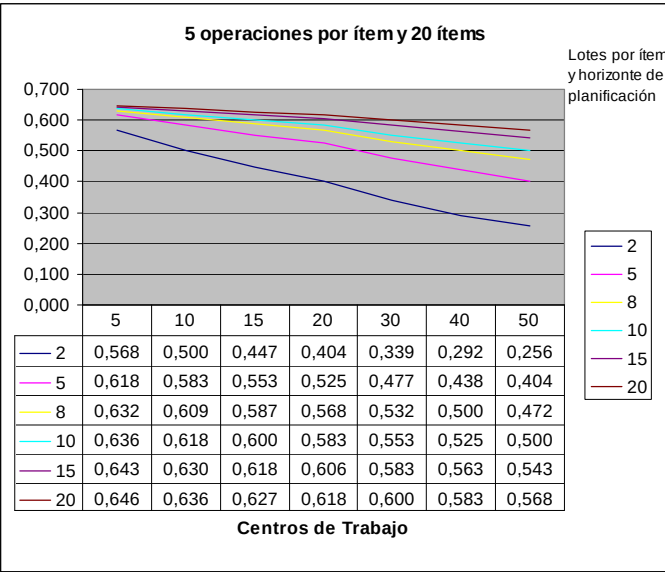


Gráfico A5.10. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 20 ítems y 5 operaciones por ítem.

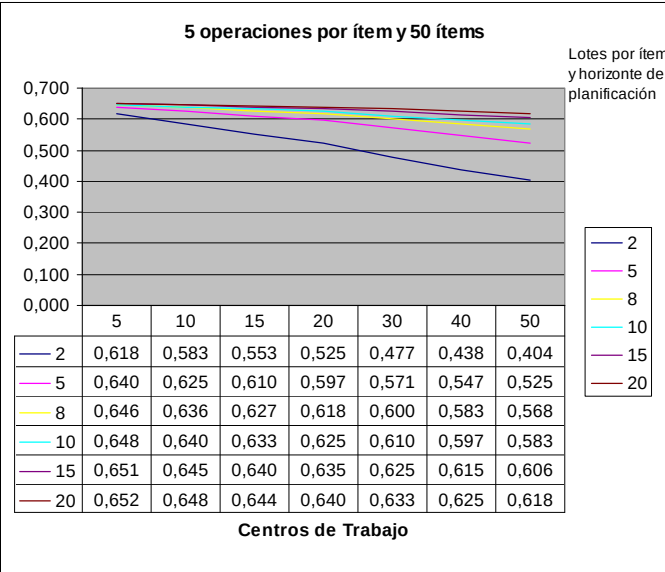


Gráfico A5.11. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 50 ítems y 5 operaciones por ítem.

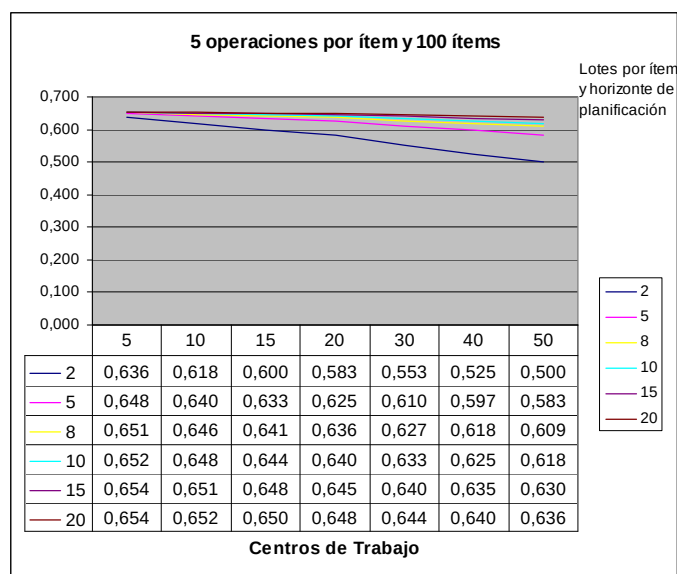


Gráfico A5.12. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 100 ítems y 5 operaciones por ítem.

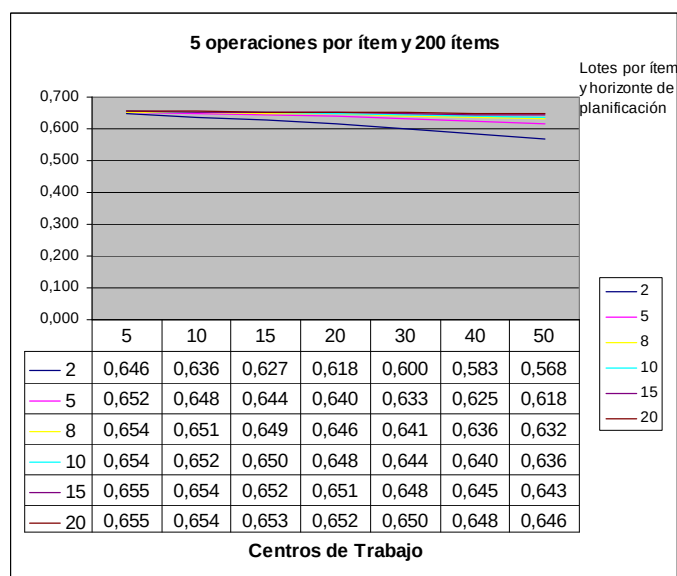


Gráfico A5.13. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 200 ítems y 5 operaciones por ítem.

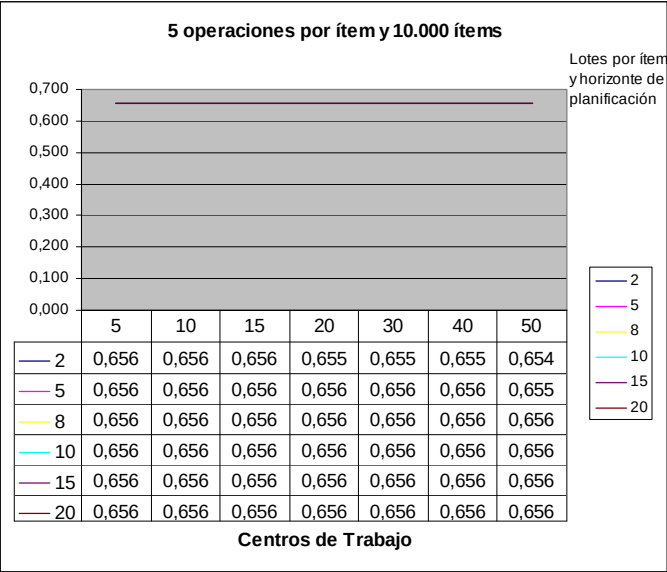


Gráfico A5.14. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10.000 ítems y 5 operaciones por ítem.

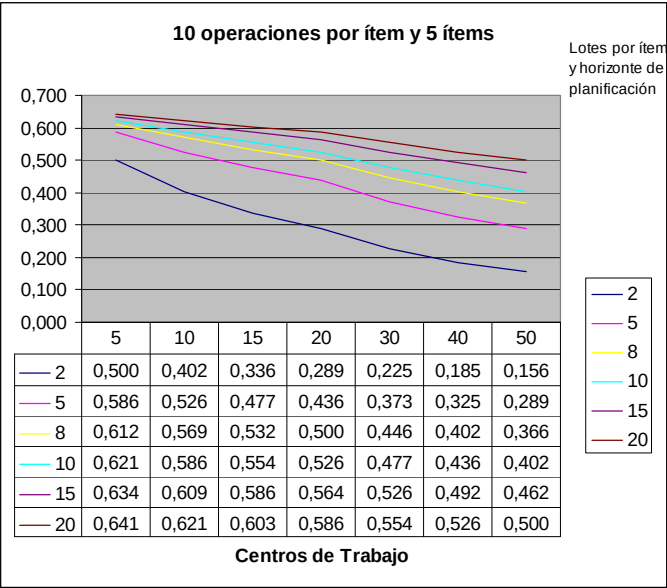


Gráfico A5.15. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 5 ítems y 10 operaciones por ítem.

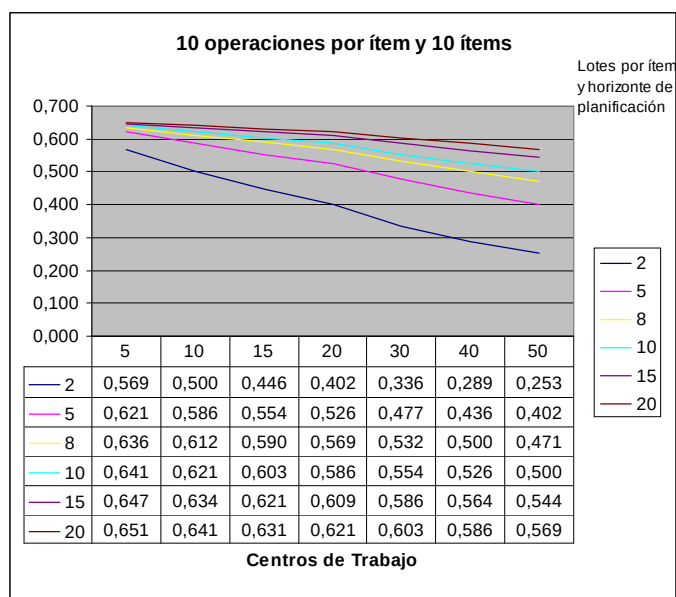


Gráfico A5.16. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10 ítems y 10 operaciones por ítem.

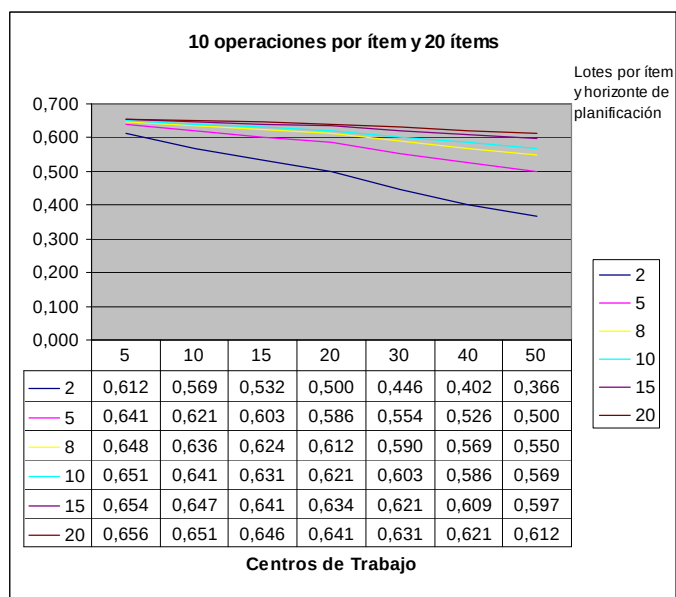


Gráfico A5.17. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 20 ítems y 10 operaciones por ítem.

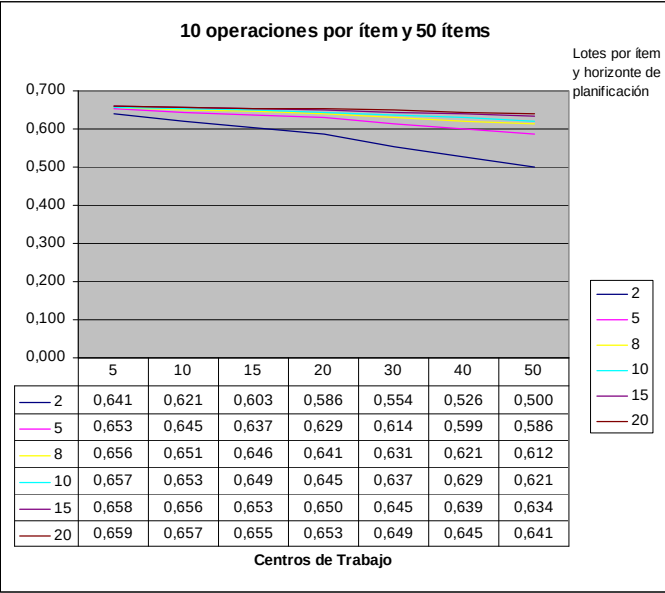


Gráfico A5.18. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 50 ítems y 10 operaciones por ítem.

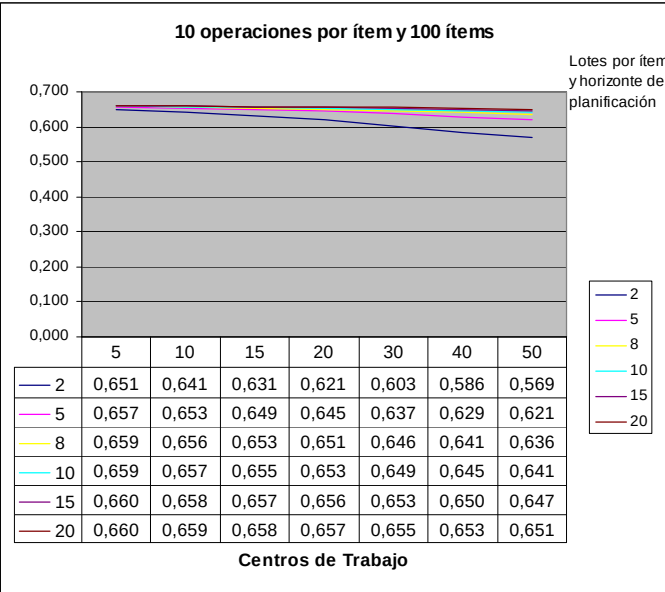


Gráfico A5.19. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 100 ítems y 10 operaciones por ítem.

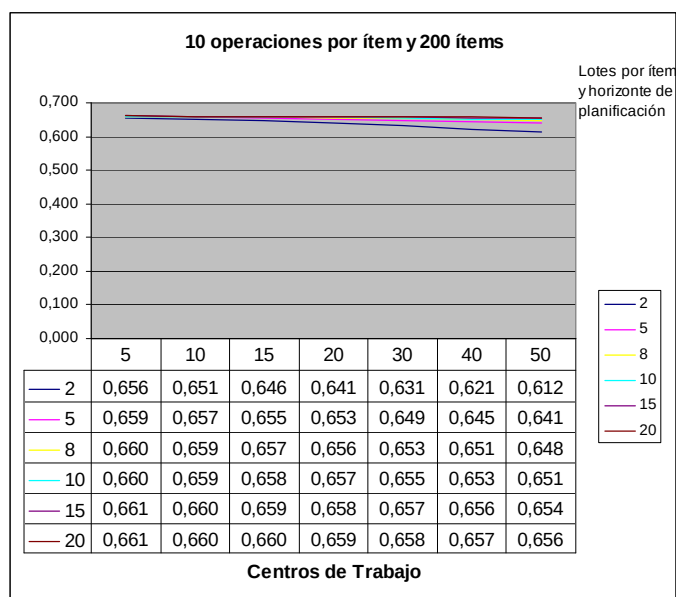


Gráfico A5.20. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 200 ítems y 10 operaciones por ítem.

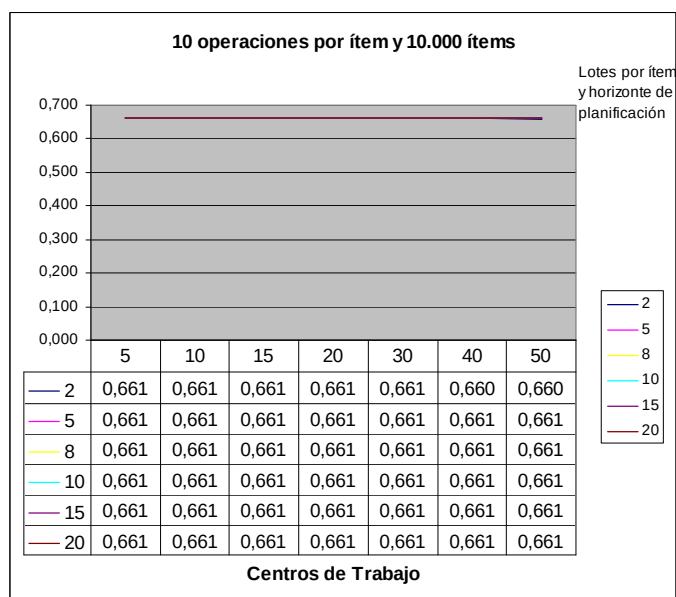


Gráfico A5.21. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10.000 ítems y 10 operaciones por ítem.

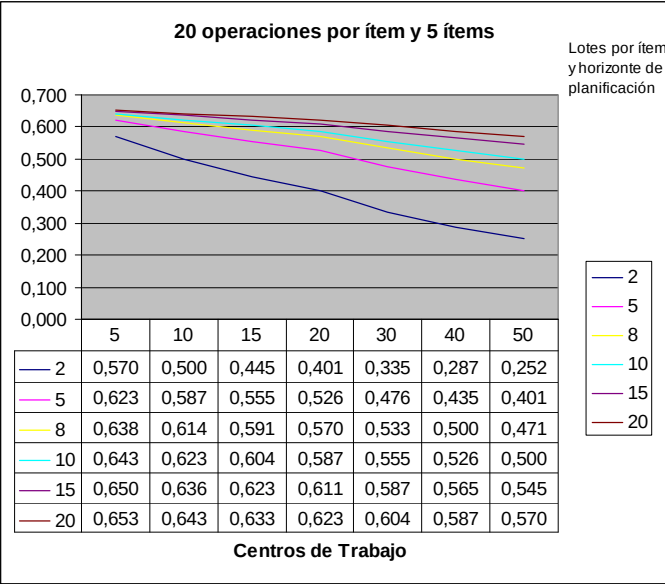


Gráfico A5.22. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 5 ítems y 20 operaciones por ítem.

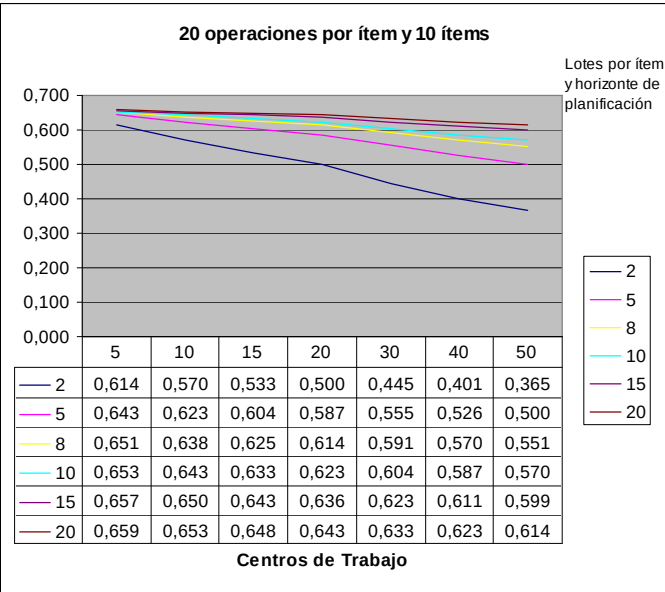


Gráfico A5.23. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10 ítems y 20 operaciones por ítem.

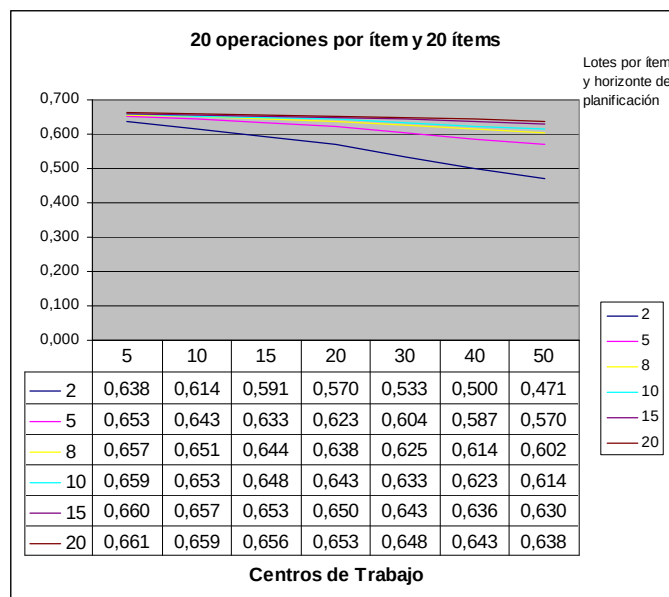


Gráfico A5.24. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 20 ítems y 20 operaciones por ítem.

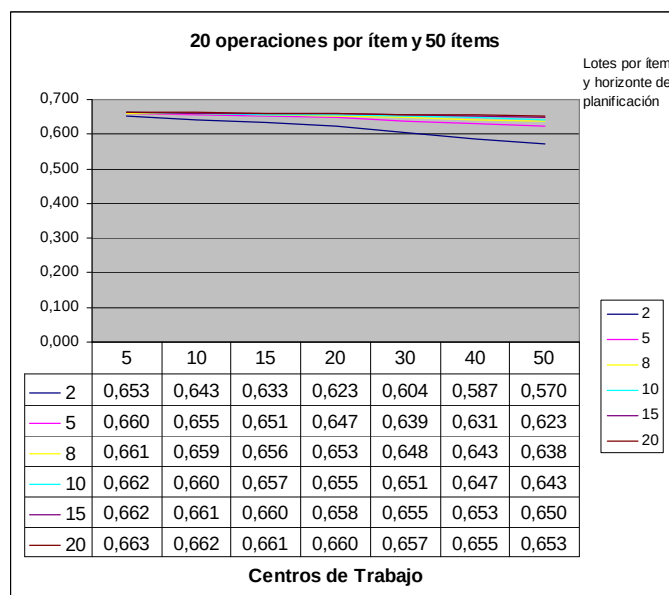


Gráfico A5.25. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 50 ítems y 20 operaciones por ítem.

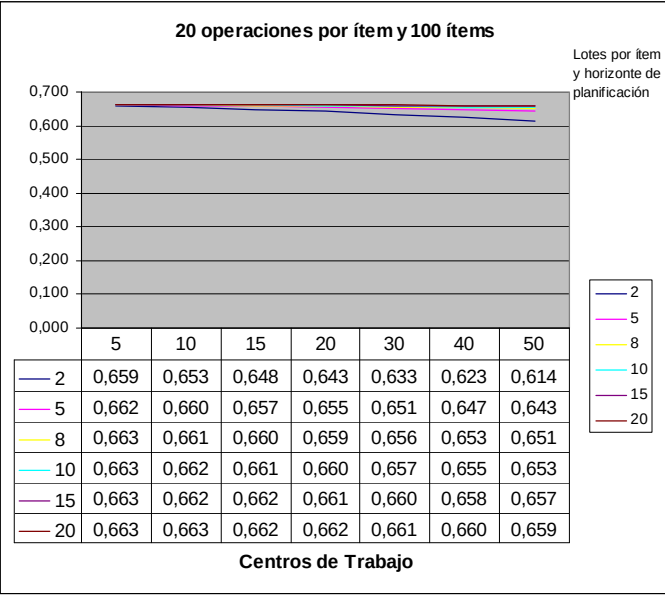


Gráfico A5.26. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 100 ítems y 20 operaciones por ítem.

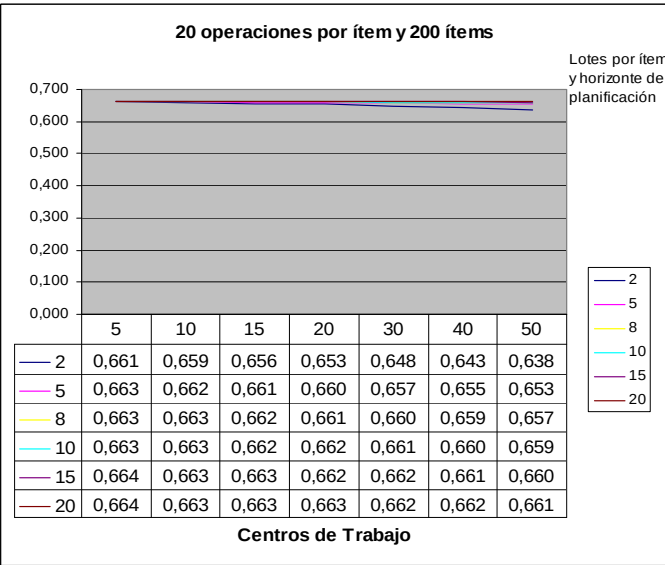


Gráfico A5.27. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 200 ítems y 20 operaciones por ítem.

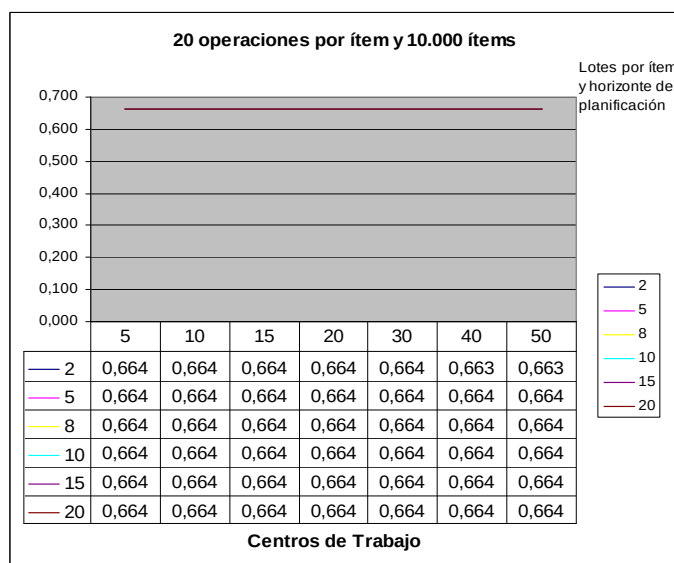


Gráfico A5.28. Máxima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10.000 ítems y 20 operaciones por ítem.

A.5.2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA MÍNIMA REDUCCIÓN EN EL NÚMERO DE VARIABLES

Como se expone en el Capítulo 5, la utilización del modelo propuesto reduce el número de variables aleatorias necesarias para el desarrollo de la planificación de capacidad, produciéndose una menor reducción en empresas con procesos productivos más simples. Este sería el caso de plantas productivas en las que los lotes pasan automáticamente desde un Centro de Trabajo al posterior en su ruta, dedicándose cada uno de ellos a la ejecución de una única operación y no realizándose ninguna inspección de los ítems elaborados.

A continuación se presentan, en los Gráficos del A5.29. a A5.56., la influencia que tiene el número de Centros de Trabajo, ítems, lotes por ítems emitidos y operaciones necesarias para elaborar cada uno de los ítems, sobre la disminución en la cantidad de variables aleatorias utilizadas por modelo propuesto, en comparación con CRP.

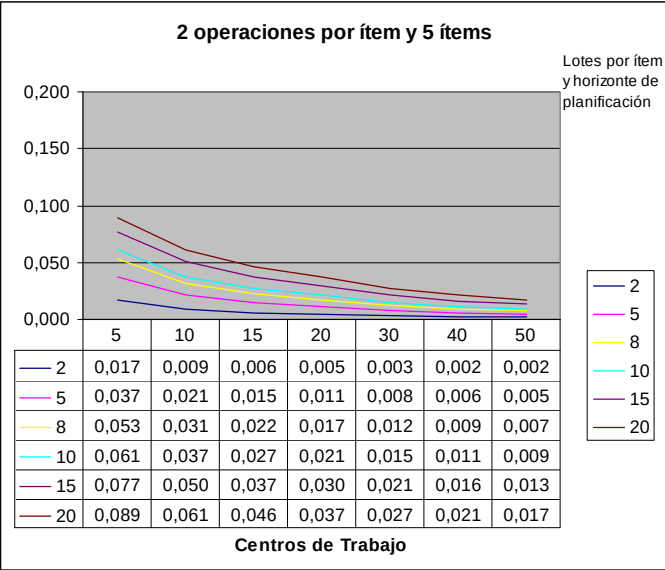


Gráfico A5.29. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 5 ítems y 2 operaciones por ítem.

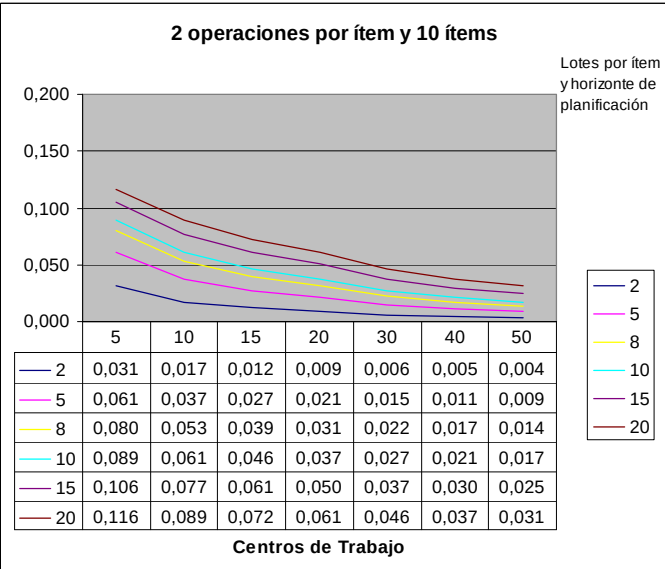


Gráfico A5.30. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10 ítems y 2 operaciones por ítem.

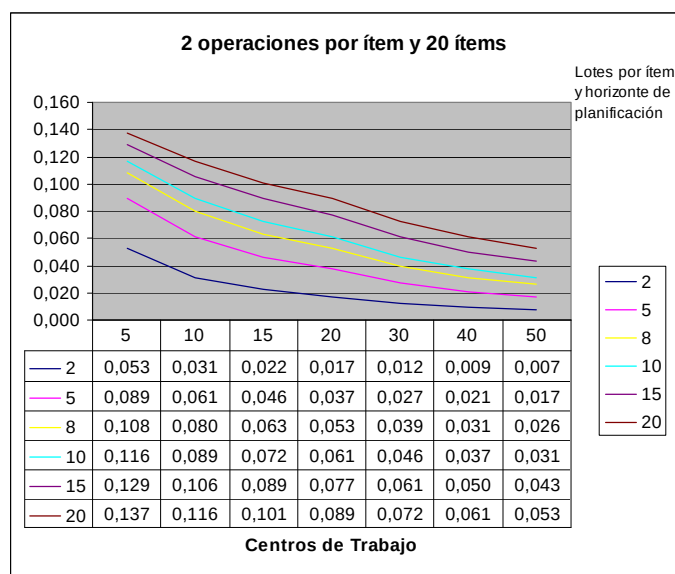


Gráfico A5.31. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 20 ítems y 2 operaciones por ítem.

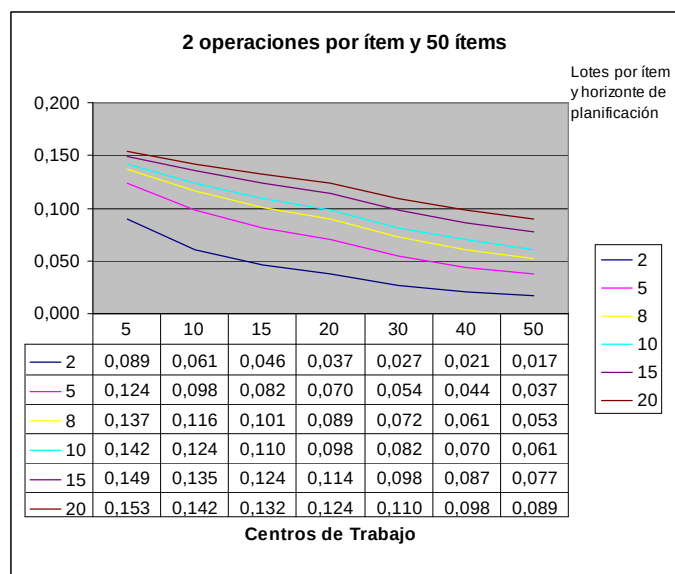


Gráfico A5.32. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 50 ítems y 2 operaciones por ítem.

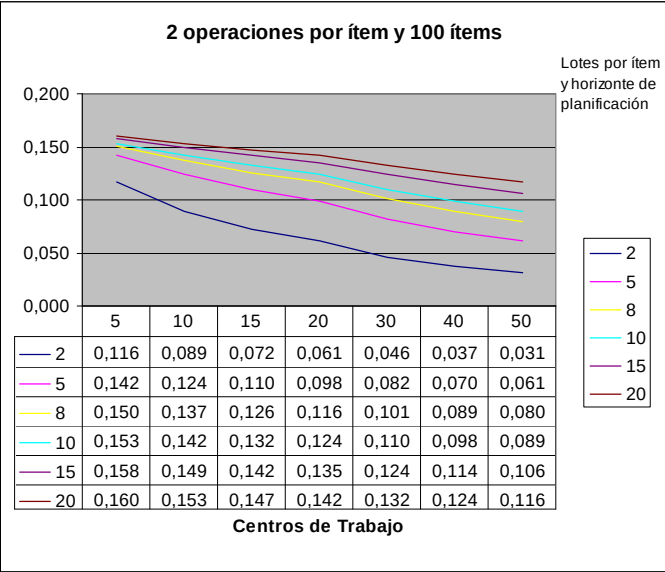


Gráfico A5.33. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 100 ítems y 2 operaciones por ítem.

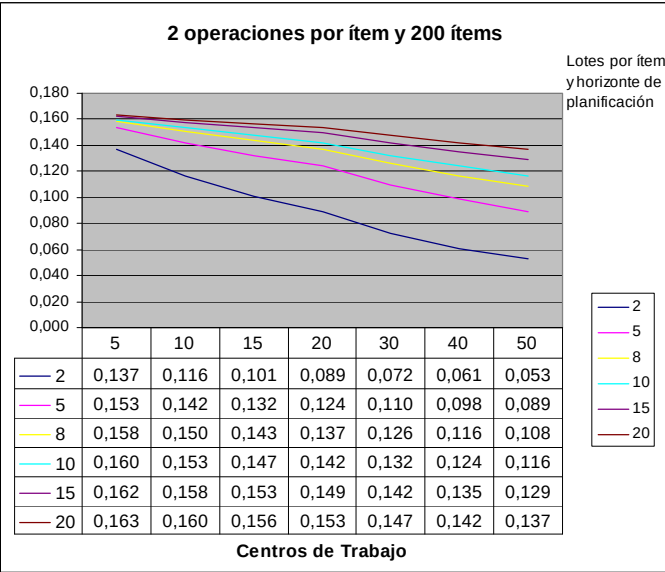


Gráfico A5.34. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 200 ítems y 2 operaciones por ítem.

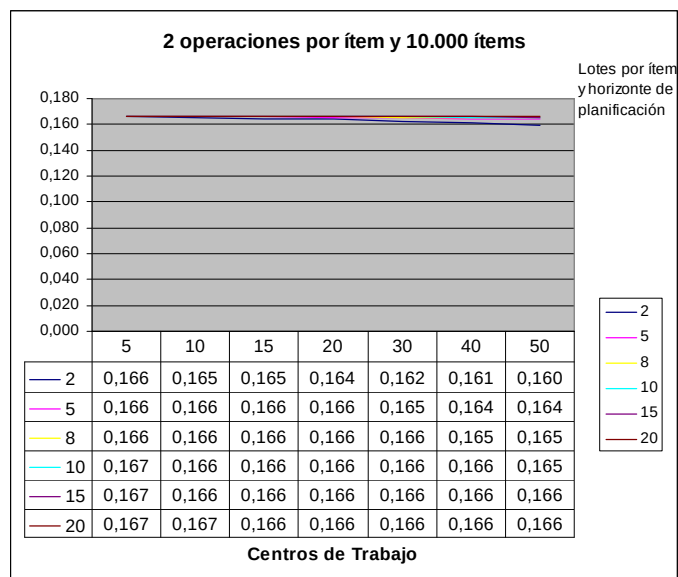


Gráfico A5.35. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10.000 ítems y 2 operaciones por ítem.

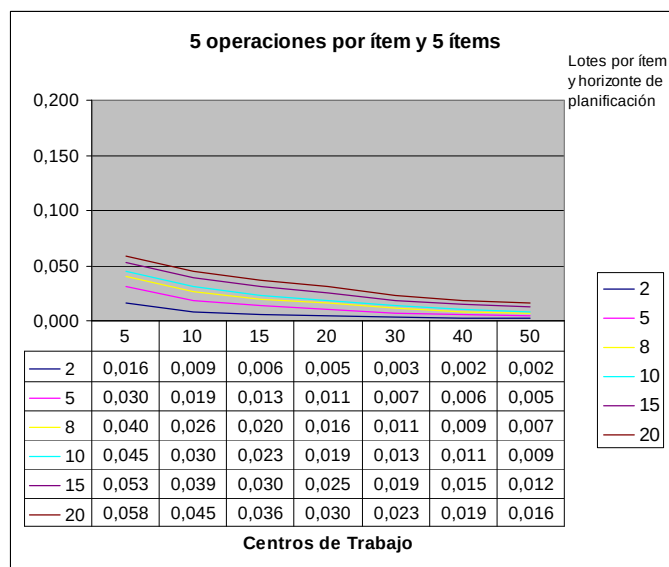


Gráfico A5.36. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 5 ítems y 5 operaciones por ítem.

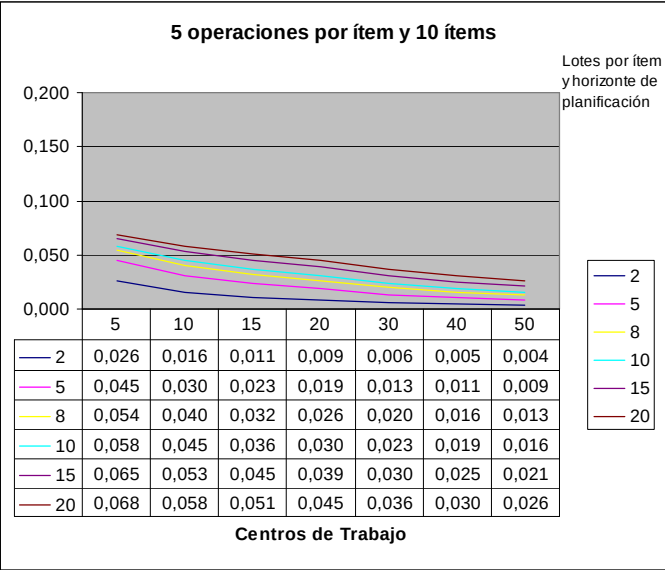


Gráfico A5.37. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10 ítems y 5 operaciones por ítem.

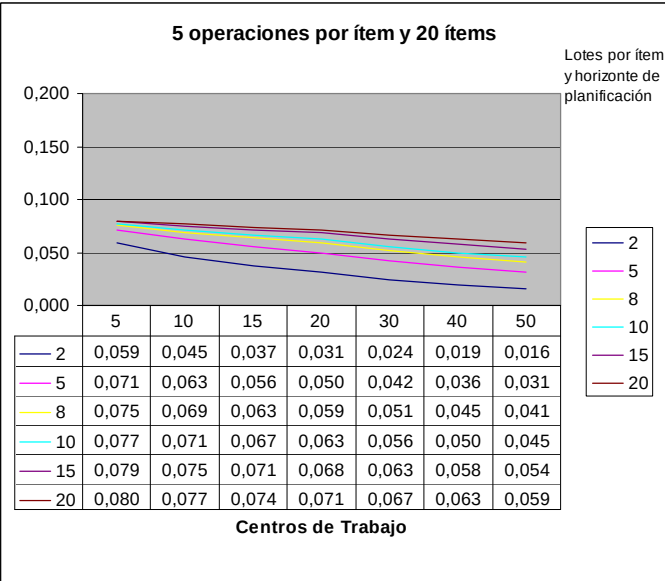


Gráfico A5.38. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 20 ítems y 5 operaciones por ítem.

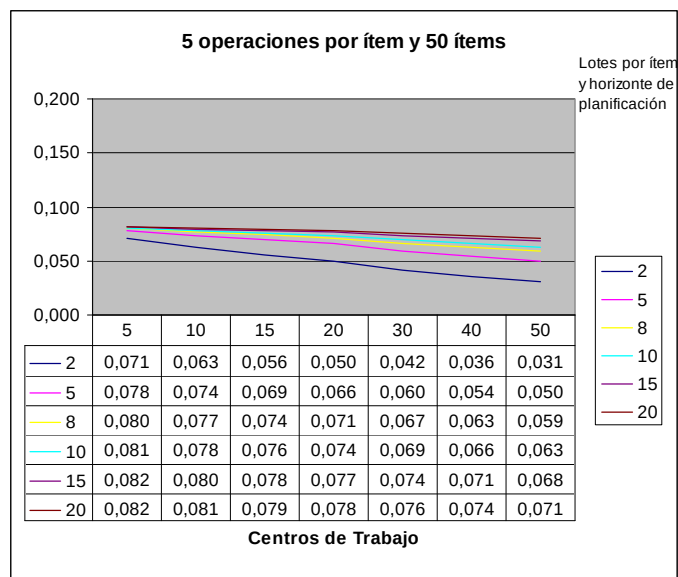


Gráfico A5.39. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 50 ítems y 5 operaciones por ítem.

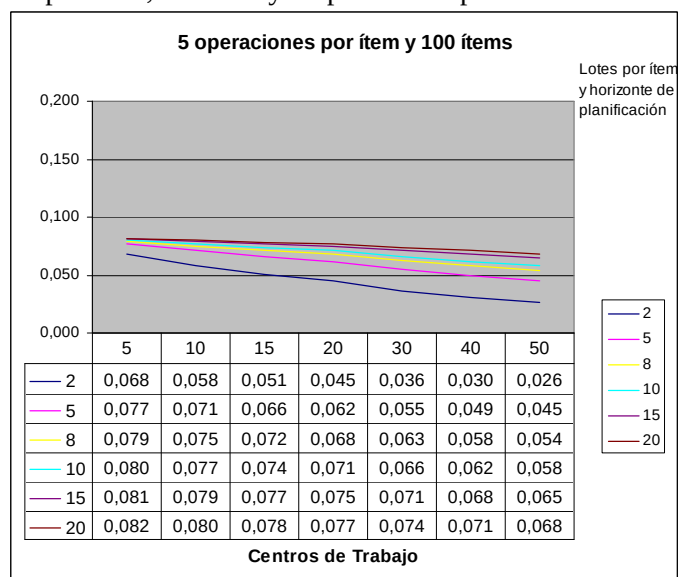


Gráfico A5.40. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 100 ítems y 5 operaciones por ítem.

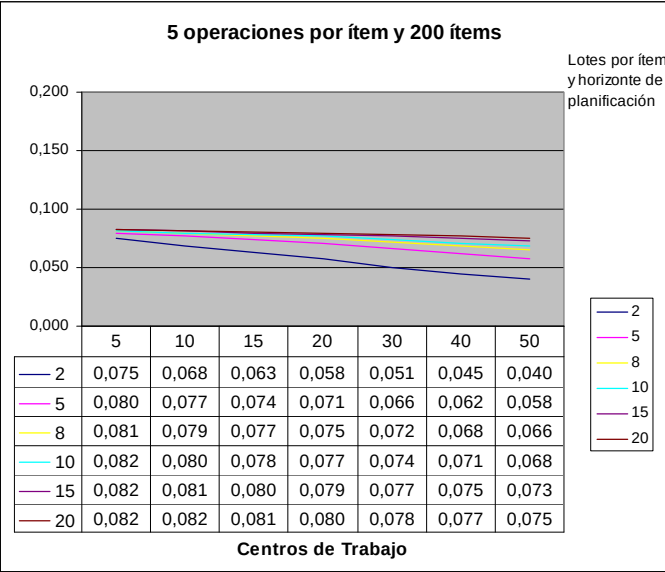


Gráfico A5.41. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 200 ítems y 5 operaciones por ítem.

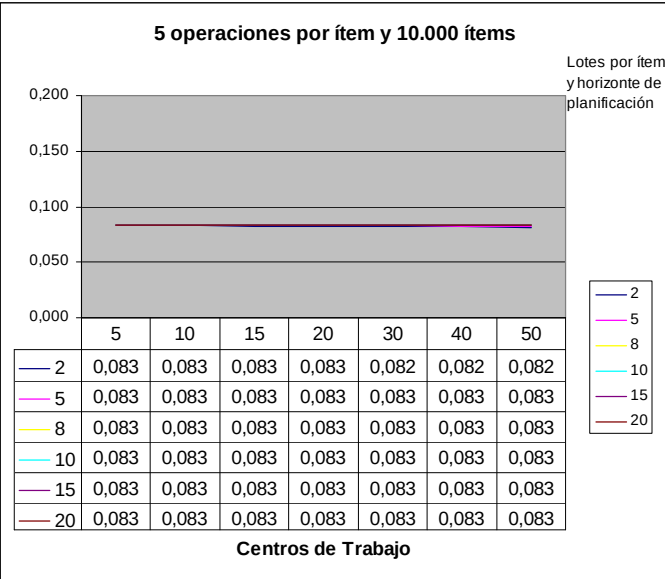


Gráfico A5.42. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10.000 ítems y 5 operaciones por ítem.

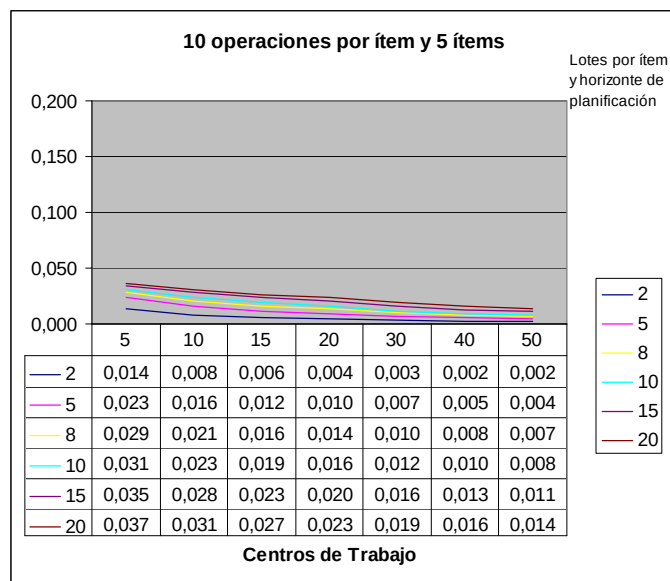


Gráfico A5.43. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 5 ítems y 10 operaciones por ítem.

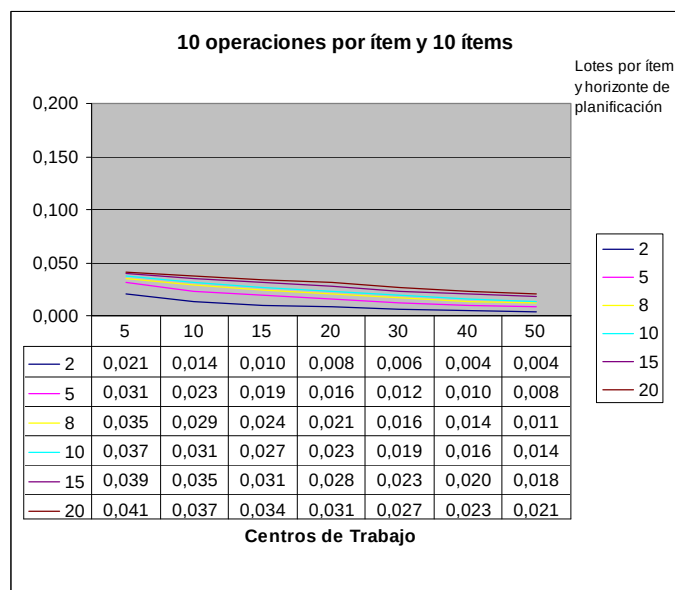


Gráfico A5.44. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10 ítems y 10 operaciones por ítem.

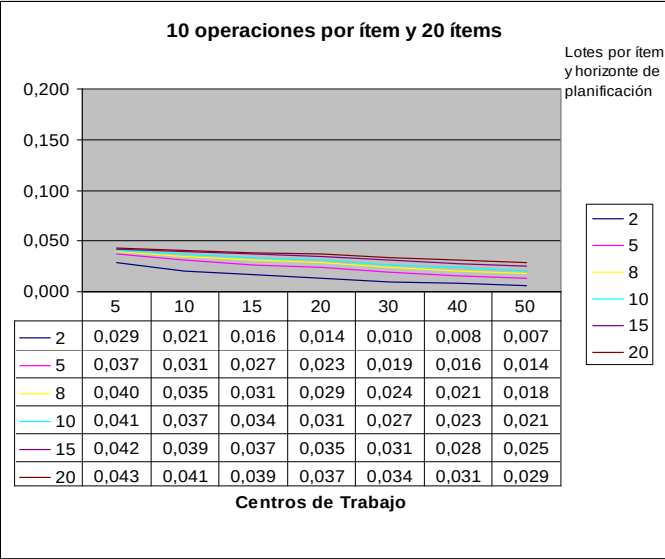


Gráfico A5.45. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 20 ítems y 10 operaciones por ítem.

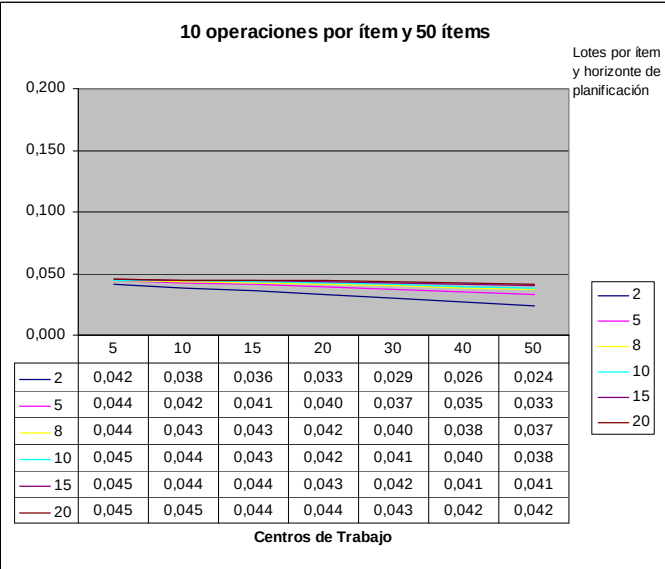


Gráfico A5.46. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 50 ítems y 10 operaciones por ítem.

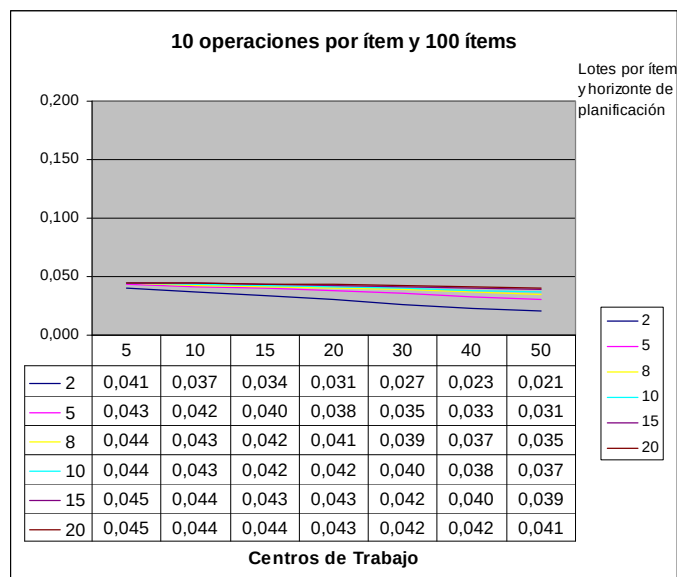


Gráfico A5.47. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 100 ítems y 10 operaciones por ítem.

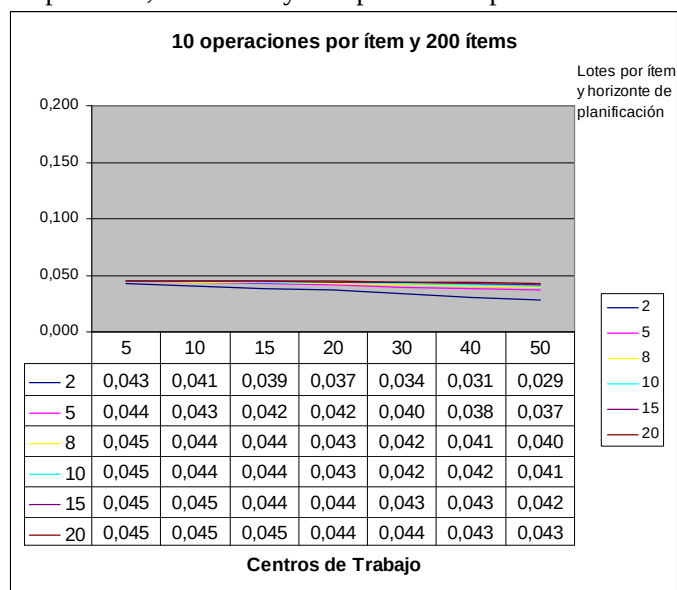


Gráfico A5.48. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 200 ítems y 10 operaciones por ítem.

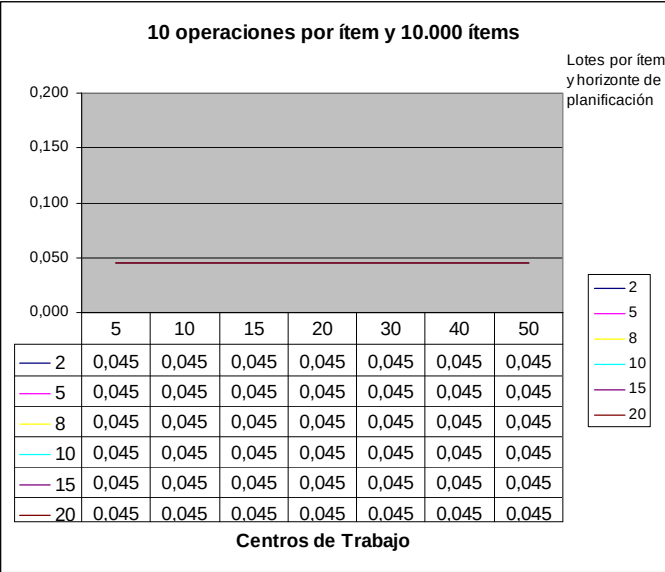


Gráfico A5.49. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10.000 ítems y 10 operaciones por ítem.

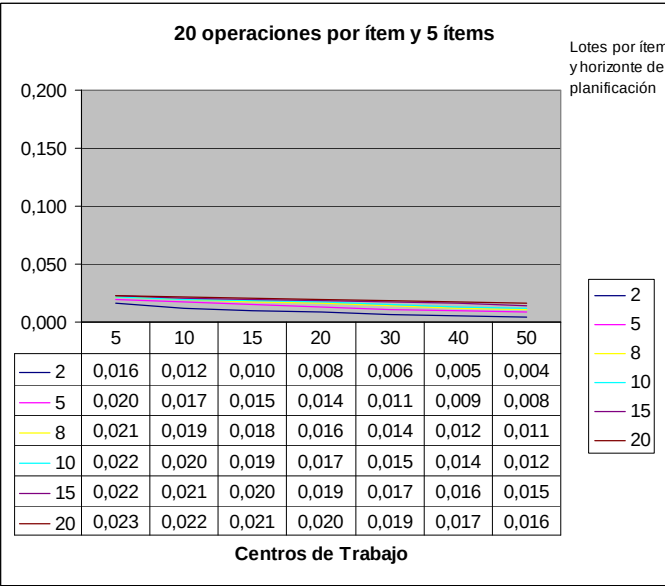


Gráfico A5.50. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 5 ítems y 20 operaciones por ítem.

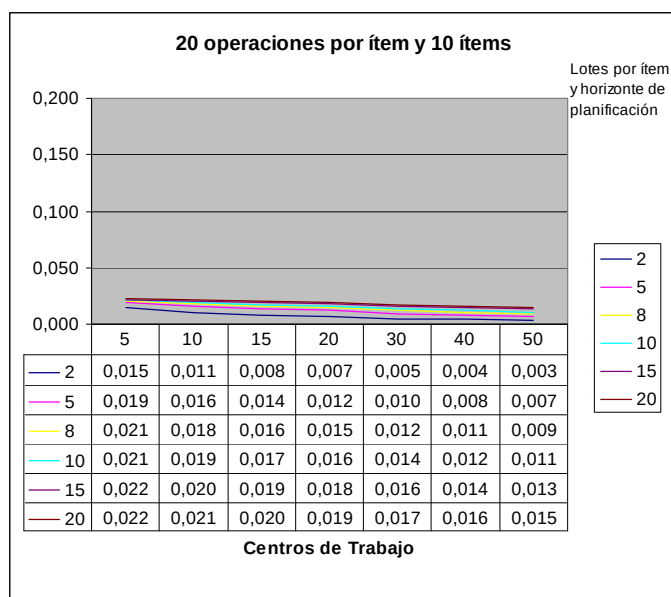


Gráfico A5.51. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10 ítems y 20 operaciones por ítem.

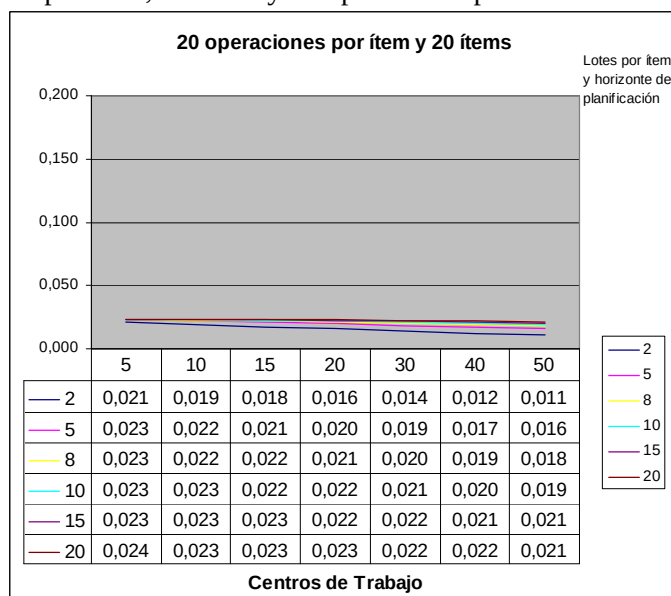


Gráfico A5.52. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 20 ítems y 20 operaciones por ítem.

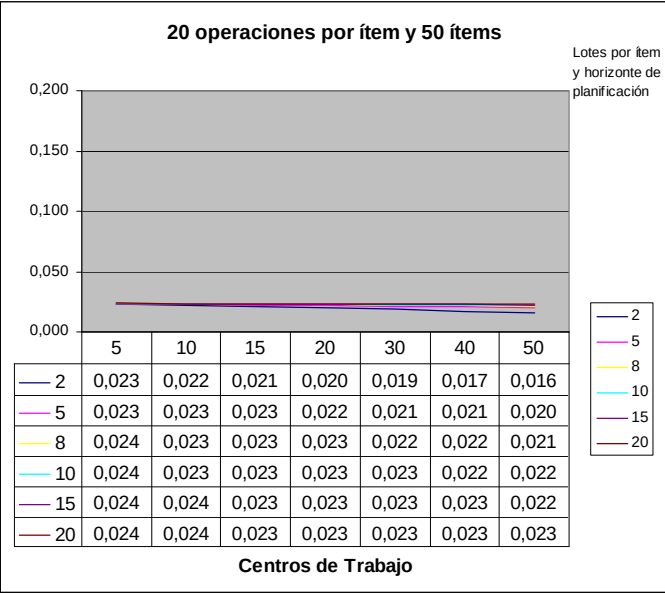


Gráfico A5.53. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 50 ítems y 20 operaciones por ítem.

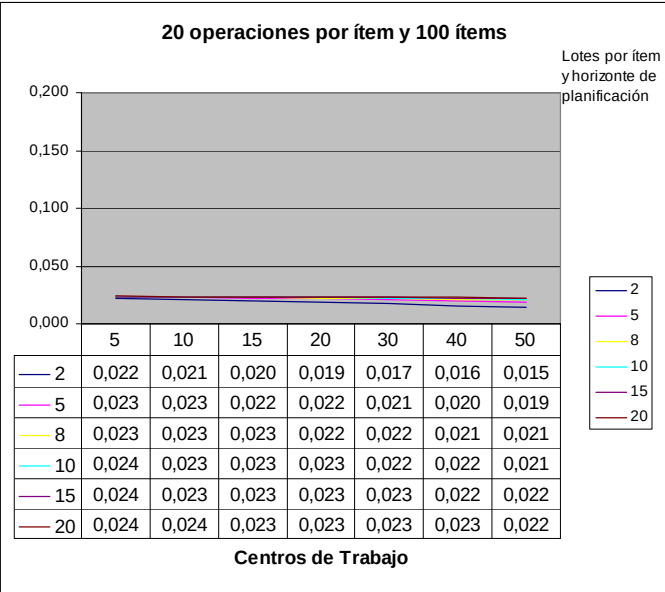


Gráfico A5.54. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 100 ítems y 20 operaciones por ítem.

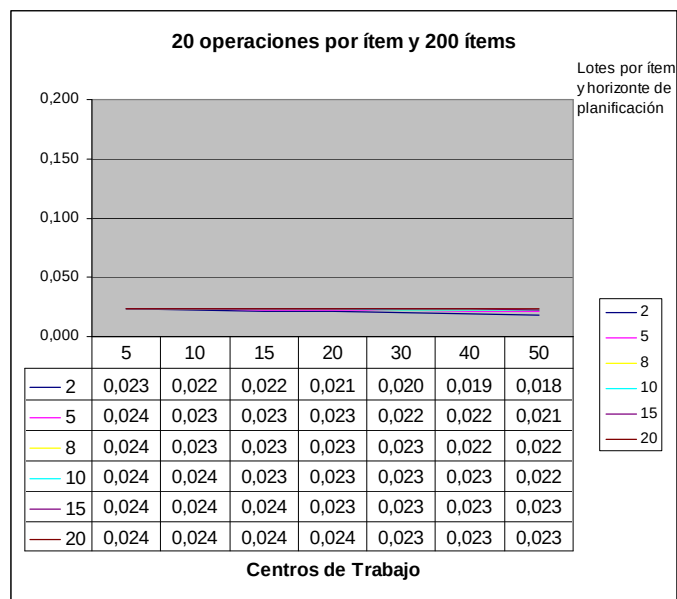


Gráfico A5.55. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 200 ítems y 20 operaciones por ítem.

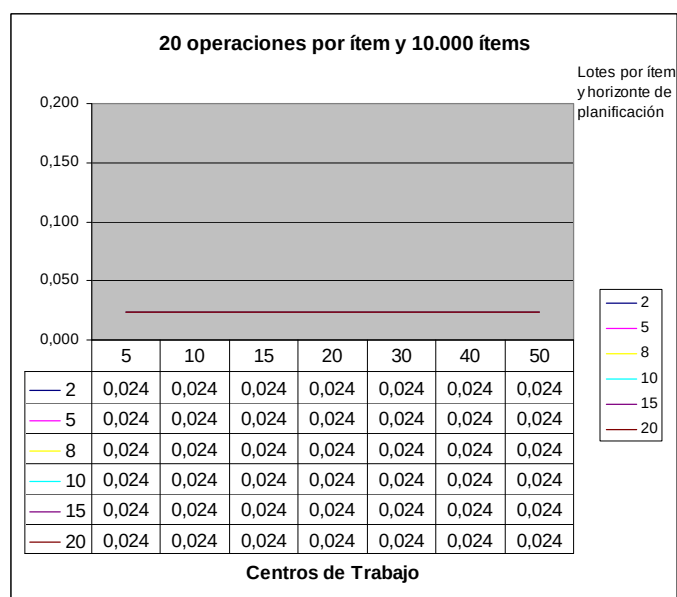


Gráfico A5.56. Mínima reducción en el número de variables aleatorias con el uso del modelo propuesto, para un horizonte de planificación de 20 periodos, 10.000 ítems y 20 operaciones por ítem.

ANEXO

6

BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- ACKOFF, R. y SASIENI, M. (1971), *Fundamentos de Investigación de Operaciones*, Limusa-Wiley, Mexico.
- ADAM, E.E. y EBERT, R.J. (1991), *Administración de la Producción y las Operaciones. Conceptos, modelos y funcionamiento*, Prentice-Hall, Naupalcan de Juárez, Mexico.
- ADAM, N. y SURKIS, J. (1977), "A comparison of capacity planning techniques in a job shop control system", *Management Science*, Vol. 23, No. 9, pp. 1044-1015.
- ADAMS, F. P. y COX, J. F. (1985), "Manufacturing resource planning: An information systems model", *Long Range Planning*, Vol. 18, No. 2, pp. 86-92.
- AGHAZADEH, S. (2003), "MRP contributes to a company's profitability", *Assembly Automation*, Vol. 23, No. 3, pp. 257-265.
- AGLIARI, A., DILIGENTI, M. y ZAVANELLA, L. (1995), "Variable priority dispatching rules: an analytical approach", *International Journal of Production Economics*. Vol. 41, No. 1, pp. 51-58.
- AGUARÓN JOVEN, J., CALVETE FERNÁNDEZ, H., LASALA CALLEJA, P., MORENO JIMÉNEZ, J. M. y PLO ALUSTUÉ, F. (1993), *Simulación*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza.

- ALEY, P. N. y ZIMMER, G. H. (1974), "Capacity planning", *Industrial Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 16 -19.
- ALFALLA LUQUE, R. y DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A. (2002), *La formación en dirección de producción/operaciones. El caso de la universidad española*, Universidad de Sevilla. Secretariado de Publicaciones.
- ALFALLA LUQUE, R., GARCÍA SÁNCHEZ M.R., GARRIDO VEGA, P., GONZALEZ ZAMORA, M.M. y SACRISTÁN DÍAZ, M. (2008), *Introducción a la Dirección de Operaciones Táctico-Operativa: Un enfoque práctico*, Delta Publicaciones, Madrid.
- ALFORD, L.P., BANGS, J.R. y HAGEMANN, G.E. (1969), *Manual de la Producción*, Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana, Barcelona.
- ALIDAEI, B. y RAMAKRISHNAN, K. (1996), "A computational experiment of COVERT-AU class of rules for single machine tardiness scheduling problem", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 201-209.
- AMENDOLA LEÓN, L. J. (2006), *Estrategias y tácticas en la dirección y gestión de proyectos*, Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de Publicaciones.
- AMENGUAL ANTICH, J. (2001), "La implantación de un ERP para la gestión, contabilidad y control de la Administración pública", *Gestión y Análisis de Políticas Públicas*, No. 22, pp. 139-151.
- AMIRI, A. (1998), "The design of service systems with queueing time cost, workload capacities and backup service", *European Journal of Operational Research*, Vol. 104, No. 1, pp. 201-217.
- AQUILANO, N., CHASE, R. y DAVIS, M. (1995), *Fundamentals of Operations Management*, Irwin, Homewood, Illinois.
- AQUILANO, N., CHASE, R. y DAVIS, M. (2001), *Fundamentos de dirección de operaciones*, McGraw-Hill, Madrid.
- ARIAS ARANDA, D. (2003), *La estrategia de operaciones en las empresas consultoras de ingeniería*, Impredisur, S.L.
- BAHL, H. C. y RITZMAN, L. P. (1983), "An Empirical Investigation of Different Strategies for Material Requirements Planning", *Journal of Operations Management*, Vol. 3, No. 2, pp. 67-77.
- BAHL, H. C. y RITZMAN, L. P. (1984), "An Integrated Model for Master Scheduling, Lot Sizing and Capacity Requirements Planning", *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 35, No. 5, pp. 389-399.
- BAKKE, N. A. y HELLBERG, R. (1993), "The challenges of capacity planning", *International Journal of Production Economics*, Vol. 30-31, No. 1, pp. 243-264.
- BÁRCENA RUIZ, M. J., FERNÁNDEZ AGUIRRE, K., FERREIRA GARCÍA, E. y GARÍN MARTÍN, M. A. (2003), *Elementos de probabilidad y estadística descriptiva*, Universidad del País Vasco, Bilbao.

- BARNES, R. M. (1980), *Motion and Time Study Desing and Measurement of Work*, John Wiley & Sons, New York.
- BAYÓN MARINÉ, F. y MARTÍN ROJO, I. (2004), *Operaciones y procesos de producción en el sector turístico*, Editorial Síntesis, S.A.
- BAYRAKTAR, E., JOTHISHANKAR, M. C., TATOGLU, E. y WU, T. (2007), "Evolution of operations management: past, present and future", *Management Research News*, Vol. 30, No. 11, pp. 843-871.
- BELT, B. (1976), "Integrating Capacity Planning and Capacity Control", *Production and Inventory Management*, Vol. 17, No. 1, pp. 9-25.
- BENDOLY, E. y SCHOENHERR, T. (2005), "ERP system and implementation-process benefits: implications for B2B e-procurement", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 25, No 4, pp. 304-319.
- BENJAAFAR, S. y SHEIKHZADEH, M. (1996), "Relationships between batch sizes, scheduling policies, and lead times in manufacturing systems", *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minesota, pp. 2787-2791.
- BENTON, W. C. y SHIN, H. (1998), "Manufacturing planning and control: The evolution of MRP and JIT integration", *European Journal of Operational Research*, Vol. 110, No. 3, pp. 411-440.
- BERNARD, P. (1990), "Inaccurate Schedules? Check Your CRP Logic", *Production & Inventory Management Review & Apics News*, Vol. 10, No. 1, pp. 37-40.
- BERRY, W. L., SCHMITT, T. G. y VOLLMANN, T. E. (1982), "Capacity Planning Techniques for Manufacturing Control Systems: Information Requirements and Operational Features", *Journal of Operations Management*, Vol. 3, No. 1, pp. 13-25.
- BESTERFIELD, D. H.: *Control de Calidad*, Prentice Hall, 1995.
- BICHENO, J. y ELLIOT, B. (1997), *Operations Management*, Blackwell, Malden, Massachusetts.
- BITRAN, G. R. y HAX, A. C. (1977), "On the Design of Hierarchical Production Planning Systems", *Decision Sciences*, Vol. 8, No. 1, pp. 28-55.
- BLACKSTONE JR., J. H. (1985), "Tutorial on Capacity Planning", *Annual International Conference Proceedings-American Production and Inventory Control Society 28th.*, pp. 105-107.
- BLACKSTONE, J. H., JR (1989), *Capacity Management*, South-Western Publishing, Cincinnati.
- BOCK, D.B. y PATTERSON, J.H. (1990), "A Comparison of Due Date Setting, Resource Assignment and Job Preemption Heuristics for the Multiproject Scheduling Problem", *Decision Sciences*, Vol. 21, No. 2, pp. 387-402.
- BROWNE, J., HARHEN, J. y SHIVNAN, J. (1988), *Production Management Systems, A CIM Perspective*. Addison Wesley. England.

- BROWNE, J., HARHEN, J. y SHIVNAN, J. (1996), *Production Management Systems: An integrated perspective*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- BURCHER, P. G. (1992), "Effective Capacity Planning", *Management Services*, Vol. 36, No. 10, pp. 22-25.
- BURMAN, R. (1995), *Manufacturing Management: Principles and System*, McGraw-Hill, Berkshire, England.
- CAFFREY, J. y HITCHINGS, G. (1995), "Makespan distribution in flow shop scheduling", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 3, pp. 50-58.
- CANAVOS, G. (1988), *Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y Métodos*, McGraw-Hill.
- CAO ABAD, R. (2002), *Introducción a la Simulación y a la Teoría de Colas*, Netbiblo, La Coruña.
- CEBALLOS HERNÁNDEZ, C. y RUIZ JIMÉNEZ, A. (2005), *Un avance de la investigación académica española en dirección de operaciones en organizaciones de servicios*, Universidad de Sevilla. Departamento de Economía Financiera y Dirección de Operaciones.
- CHAN, J. W. K. (2005), "Competitive strategies and manufacturing logistics: An empirical study of Hong Kong manufacturers", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 35, No. 1, pp. 20-43.
- CHAN, J. W. K. y BURNS, N. D. (2002), "Benchmarking manufacturing planning and control (MPC) systems: An empirical study of Hong Kong supply chains", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 9, No. 3, pp. 256-277.
- CHASE, R. B., AQUILANO, N. J. y JACOBS, F. R. (2001), *Operations Management for Competitive Advantage*, McGraw-Hill/Irwin, New York.
- CHEN, J., FAN, Y. y CHEN, C. (2009), "Capacity requirements planning for twin Fabs of wafer fabrication", *International Journal of Production Research*, Vol. 47, No. 16, pp. 4473-4496.
- CHEN, T. C. E. (1986), "Capacity requirements planning by stochastic linear programming", *Mathematical Modelling*, Vol. 7, No. 2-3, pp. 443-448.
- CHUNG, S., HUANG, C. y LEE, A. (2008), "Heuristic algorithms to solve the capacity allocation problem in photolithography area (CAPPA)", *OR Spectrum*, Vol. 30, No. 3, pp. 431-452.
- CHUNG, S., LEE, A., HUANG, C. y CHUANG, C. (2008), "Capacity pricing mechanism for wafer fabrication", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 55, No. 3, pp. 647-662.
- CLASSEN, R. J. y MALSTROM, E. M. (1982), "Effective Capacity Planning for Automated Factories Requires Workable Simulation Tools and Responsive Shop Floor Controls", *Industrial Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 73-77.

- COLLIER, D. A. (1980), "A Comparison of MRP Lot Sizing Methods Considering Capacity Change Costs", *Journal of Operations Management*, Vol. 1, No. 1, pp. 23-29.
- COMECHE MARTÍNEZ, J. M., CANTARERO SANZ, S. y NAVARRO BAQUERO, L. (2009), *Cómo mejorar el funcionamiento de su empresa: guía básica para una gestión de operaciones eficiente*, Editorial Promolibro.
- COMPANYS PASCUAL, R. y COROMINAS SUBIAS, A. (1995), *Organización de la Producción II*, Edicions UPC, Barcelona.
- CONDE COLLADO, J. (2008), *Dirección de operaciones y logística*, Ediciones Robles, S.L.
- CONNOR, S. (1986), "The Value-Added Equation", *Manufacturing Systems*, Vol. 4, No. 12, pp. 19-22.
- COOPER, K. (2008), "ERPs are no simple fix", *Graphic Arts Monthly*, Vol. 80, No. 1, pp. 19.
- CORRELL, J. (1984), "A Case for Capacity Management", *ICP Interface*, Vol. 9, No. 3, pp. 21-22.
- CORRELL, J. G. y EDSON, N. W. (1998), *Gaining Control: Capacity Management and Scheduling*, John Wiley & Sons, New York.
- COSTAS GUAL, J. (2001), "Factores de éxito en la implantación de un sistema ERP", *Capital Humano*, Vol. 14, No. 142, pp. 40-43.
- CRANDALL, R. E. (2006), "The epic life of ERP", *APICS magazine*, Feb, pp. 17-20.
- CREPEAU, E. A. (1995), "CRP: manage your capacity...or it will manage you!", *Annual International Conference Proceedings - American Production and Inventory Control Society*, pp. 134-136.
- CUATRECASAS ARBÓS, L. (2000), *Organización de la producción y dirección de operaciones : sistemas actuales de gestión eficiente y competitiva*, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, S.A.
- DE LA FUENTE GARCÍA, D. (2008), *Ingeniería de organización en la empresa: dirección de operaciones*, Universidad de Oviedo. Servicio de Publicaciones.
- DE LA FUENTE GARCÍA, D. y PINO DíEZ, R. (2001), *Teoría de Líneas de Espera. Modelos de colas*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, Oviedo.
- DELGADO, J. y MARÍN, F. (2000), "Evolución en los sistemas de gestión empresarial. Del MRP al ERP", *Economía Industrial*, No. 331, pp. 51-58.
- DESSOUKY, Y. M., BEAUMARIAGE, T.G., ROBERTS, C.A. y MICHAEL, K. (1993), "An intelligent system for batch scheduling for the process industry", *Computers in Industry*, Vol. 22, No. 3, pp. 233-247.
- DÍAZ, A. (1993), *Producción: Gestión y Control*, Ariel, Barcelona.
- DILWORTH, J.B. (1993), *Production and Operations Management. Manufacturing and Service*, McGraw Hill, New York.

- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A. y GARCÍA GONZÁLEZ, S. (1991), "Del MRP al MRP II: evolución, descripción y precisión conceptual", *Alta Dirección*, No. 155, pp. 13 -20.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A., ÁLVAREZ GIL, M. J., GARCÍA GONZÁLEZ, S., DOMÍNGUEZ MACHUCA, M. A. y RUÍZ JIMÉNEZ, A. (1995), *Dirección de Operaciones. Aspectos estratégicos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A., DURBÁN OLIVA, S. y MARTÍN ARMARIO, E. (1990), *El Subsistema Productivo de la Empresa*, Pirámide, Madrid.
- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J. A., GARCÍA GONZÁLEZ, S., DOMÍNGUEZ MACHUCA, M. A., RUÍZ JIMÉNEZ, A. y ÁLVAREZ GIL, M. J. (1995), *Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill, Madrid.
- DUARTE, J. (2001), "Del ERP al E-Business: integración, eficiencia, rentabilidad", *Dirección y Progreso*, No. 175, pp. 21-24.
- DUPON, A., VAN NIEUWENHUYSE, I. y VANDAELE, N. (2002), "The impact of sequence changes on product lead time", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, pp. 327-333.
- EILON, S. y CHOWDHURY, I. G. (1975), "Due dates for job shop scheduling", *International Journal of Production Research*, Vol. 14, pp. 223-237.
- ELBERTSEN, L., BENDERS, J. y NIJSSEN, E. (2006), "ERP use: exclusive or complemented?", *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 106, No. 6, pp. 811-824.
- EPPEN, G. D. y otros (2000), *Investigación de Operaciones en la ciencia administrativa*, Pearson, México.
- EPPEN, G.D., GOULD, F.J., SCHMIDT, C.P., MOORE, J.H. y WEATHERFORD, L.R. (2000), *Investigación de Operaciones en la ciencia administrativa*, Pearson, México.
- ERSCHLER, J. y otros (1986), "Consistency of the Dissagregation Process in Hierarchical Planning", *Operations Research*, Vol. 34, No. 3, pp. 464-469.
- ESCALERA IZQUIERDO, G. y CONDE COLLADO, J. (2007), *Dirección de operaciones*, Ediciones Robles, S.L.
- ESCUDERO, L. F. (1972), *Aplicaciones de la Teoría de las Colas*, Deusto, Bilbao.
- EVANS, J.R. (1997), *Production/Operations Management. Quality, Performance and Value*, West Publishing Co. New York.
- EVANS, M. J. y ROSENTHAL, J. S. (2005), *Probabilidad y estadística: la ciencia de la incertidumbre*, Reverté, Barcelona.
- FATTAHI, P., SAIDI MEHRABAD, M. y JOLAI, F. (2007), "Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 18, No. 3, pp. 331-342.
- FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, E. y VAZQUEZ ORDAS, C.J. (1994), *Dirección de la Producción. II. Métodos Operativos*, Civitas, Madrid.

- FISK, J. C. (1979), "A Goal Programming Model for Output Planning", *Decision Sciences*, Vol. 10, No. 4, pp. 593-603.
- FOGARTY, D. W., BLACKSTONE, J. H. JR y HOFFMANN, T. R. (1991), *Production & Inventory Management*. APICS. Cincinnati.
- FOLEY, M. J. (1988), "The Winds of Change Are Blowing for MRP II Users", *Datamation*, Vol. 34, No. 3, pp. 19-21.
- FRAMINÁN, J. M. y RUIZ USANO, R. (2003), "Sistemas ERP(II): Ventajas e inconvenientes, implantación y tendencias de futuro", *Alta Dirección*, Vol. 39, No. 228, pp. 54-62.
- FRAXANET DE SIMÓN, M (1990), *Organización y Gestión de la Producción*, CDN Ciencias de la Dirección, Madrid.
- FRAZER, J. D. y NAKHAI, B. (1992), "The Problems with MRP on Microcomputer Spreadsheets", *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 1-5.
- GALLOWAY, R. L. (1994), *Principles of Operations Management*, Routledge, Kent.
- GARAVELLI, A. C. (2001), "Performance analysis of a batch production system with limited flexibility", *International Journal of Production Economics*, Vol. 69, No. 1, pp. 39-48.
- GARCÍA GONZÁLEZ, S, RABADÁN MARTÍN, I. y GESSA PERERA, A. (2003), "El efecto de la regla de secuenciación sobre el tiempo de carga de las instalaciones en configuraciones por lotes", *Papers Proceedings 2003, AEDEM XIII Congreso Hispano-Francés*, Bordeaux, Francia, pp. 85-95
- GARCIA GONZALEZ, S. y AGUADO CORREA, F. (1998), "Planificación de recursos de la empresa (ERP): ¿un nuevo modelo de gestión asistida por ordenador?", *Alta Dirección*, Vol. 33, No. 201, pp. 82-90.
- GARCÍA GONZÁLEZ, S. y GARCÍA GRAGERA, J. A. (1996), "Medición de la capacidad en configuraciones productivas por funciones: los tiempos de carga unitarios", *Alta Dirección*, No. 186 y 187, pp. 111-120 y 201-209.
- GELDERS, L. F. y VAN WASSENHOVE, L. N. (1982), "Hierarchical Integration in Production Planning: Theory and Practice", *Journal of Operations Management*, Vol.3, No. 1, pp. 27-35.
- GIBSON, P., GREENHALGH, G. y KERR, R. (1995), *Manufacturing Management. Principles and concepts*, Chapman & Hall, Cornwall.
- GODDARD, W. (1984), "Shop Floor Control: Its Role in Manufacturing", *Modern Materials Handling*, Vol. 39, No. 12, pp. 51-58.
- GODDARD, W. E. (1986), "Capacity Planning: Ten Steps to Better Operating Control", *Industrial Management*, Vol. 10, No. 4, pp. 22-27.
- GOLDRATT, E. y COX, J. (1986), *La Meta: un proceso de mejora continua*, Editorial Taular.
- GONZÁLEZ LINES, A. (2009), *Análisis de los tiempos de producción: técnica de cronometraje*, Editorial Edita.

- GONZÁLEZ RIESCO, M. *Gestión de la producción: cómo planificar y controlar la producción industrial*, Ideaspropias Editorial.
- GONZALO DERTEANO, M. (1999), "RPK, El éxito de una empresa industrial apoyado en un sistema ERP", *Capital Humano*, Vol. 12, No. 124, pp. 48-52.
- GRABSKI, S. V., LEECH, S. A. y BU, B. (2001), "Riesgos y controles en la implementación de sistemas ERP", *The International Journal of Digital Accounting Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 47-68.
- GREENE, J. H. (1997), *Production And Inventory Control Handbook*, McGraw-Hill, New York.
- GRUBBSTROM, R. W. y TANG, O. (2000), "An Overview of Input-Output Analysis Applied to Production-Inventory Systems", *Economic Systems Research*, Vol. 12, No. 1, pp. 3-26.
- GUPTA, M. y KOHLI, A. (2006), "Enterprise resource planning systems and its implications for operations function", *Technovation*, Vol. 26, No. 5-6, pp. 687-696.
- GUPTA, O., PRIYADARSHINI, K., MASSOUD, S. y AGRAWAL, S. K. (2004), "Enterprise resource planning: a case of a blood bank", *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 104, No. 7, pp. 589-603.
- HABER, A. y RUNYON, R. P. (1973), *Estadística general*, Fondo Educativo Interamericano, México.
- HARL, J. E. (1984), "Alternative Heuristics for Large Scale Capacitated Requirements Planning Systems", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 4, No. 3, pp. 22-35.
- HARL, J.E. y RITZMAN, L. P. (1985), "A heuristic algorithm for capacity sensitive requirements planning", *Journal of Operations Management*, Vol. 5, No. 3, pp. 309-326.
- HASEN, B. L. (1980), *Control de Calidad*, Hispano Europea.
- HASKOSE, A., KINGSMAN, B. G. y WORTHINGTON, D. (2002), "Modelling flow and jobbing shops as a queueing network for workload control", *International Journal of Production Economics*, Vol. 78, No. 3, pp. 271-287.
- HAYES, R. H. y WHEELWRIGHT, S. C. (1984), *Restoring our competitive edge: competing through manufacturing*, John Wiley and Sons, Nueva York.
- HEIZER, J. y RENDER, B. (2001), *Dirección de la Producción. Decisiones Tácticas*, Prentice-Hall, Madrid.
- HELO, P., ANUSSORNITISARN, P. y PHUSAVAT, K. (2008), "Expectation and reality in ERP implementation: consultant and solution provider perspective", *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 108, No. 8, pp. 1045-1059.
- HILL, T. (1991), *Production/Operations Management. Text and Cases*, Prentice Hall, New York.

- HILLIER, F.S. y LIEBERMAN, G.J. (1999), *Introducción a la Investigación de Operaciones*, McGraw-Hill, México D.F.
- HOPEMAN, R.J y (1973), *Producción. Conceptos, análisis y control*, Compañía Editorial Continental, Calz. De Tlalpan, Mexico.
- HOPP, W.J., SPEARMAN, M.L. y WOODRUFF, D.L. (1990), "Practical Strategies for lead time reduction", *Manufacturing Review*, Vol. 3, No. 2, pp. 78-84.
- HOUGHTON, E y PORTOUGAL. V. (1995), "A planning model for just-in-time batch manufacturing", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 9, pp. 9-26.
- HSU, L. y CHEN, M. (2004), "Impacts of ERP systems on the integrated-interaction performance of manufacturing and marketing", *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 104, No. 1, pp. 42-55.
- HUERTAS GARCÍA, R. y DOMÍNGUEZ GÁLCEERÁN, R. (2008), *Decisiones estratégicas para la dirección de operaciones en empresas de servicios y turísticas*, Universidad de Barcelona. Publicaciones y Ediciones.
- HUNG Y. F. y CHIEN K. L. (2000), "A multi-class multi-level capacitated lot sizing model", *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, No. 11, pp. 1309-1318.
- HUNSUCKER, J.L. y SHAH, J.R. (1994), "Comparative performance of priority rules in a constrained flow shop with multiple processors environment", *European Journal of Operational Research*, Vol. 72, No. 1, pp. 102-114.
- IGLEHART, D. L. y SHEDLER, G. S. (1978), "Simulation of Response Times in Finite-Capacity Open Networks of Queues", *Operations Research*, Vol. 26, No. 5, pp. 896-914.
- INE -INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA- (2005), *Anuario estadístico de España 2006*, Instituto Nacional de Estadística, Madrid.
- INVE, P. y LAMBRECHT, M. (1996), "Extending the shifting bottleneck procedure to real-life applications", *European Journal of Operational Research*, Vol. 90, No. 2, pp. 252-268.
- IWATA, Y., TAJI, K. y TAMURA, H. (2003), "Multi-objective capacity planning for agile semiconductor manufacturing", *Production Planning and Control*, Vol.14, No. 3, pp. 244-254
- IZQUIERDO COLLADO, J. (2005), *Organización de empresas: gestión de operaciones y técnicas de planificación de los aprovisionamientos*, Izquierdo Collado, Juan de Dios.
- JAYARAMAN, V. y SRIVASTAVA, R. (1996), "Expert systems in production and operations management. Current applications and future prospects", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 16, No. 12, pp. 27-44.
- JENSEN, J.B., PHILIPOOM, P.R. y MALHOTRA, M.K. (1995), "Evaluation of scheduling rules with commensurate customer priorities in job shops", *Journal of Operations Management*, Vol. 13, No. 3, pp 213-228.

- JOHNSON, A. (1986), "MRP? MRPII? OPT? CIM? FIS? JIT? Is any system letter perfect?" *Management Review*, Vol. 75, No. 9, pp. 22-27.
- JONES, W. J. (1992), "Rough-cut capacity planning and CRP, which method suits your company?", *Annual International Conference Proceedings - American Production and Inventory Control Society*, pp. 629-632.
- JONSSON, P. y MATTSSON, S. (2002), "Use and applicability of capacity planning methods", *Production and Inventory Management*, Vol. 43, No. 3/4, pp. 89-95.
- JONSSON, P. y MATTSSON, S. (2003), "The implications of fit between planning environments and manufacturing planning and control methods", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 23, No. 8, pp. 872-900.
- JONSSON, P. y MATTSSON, S. (2006), "A longitudinal study of material planning applications in manufacturing companies", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 26, No. 9, pp. 971-995.
- JUSTICE, K. (1985), "Tailored MRP", *ICP Manufacturing Software*, Vol. 10, No. 2, pp. 14-16.
- KAMHAWI, E. M. (2008), "Enterprise resource-planning systems adoption in Bahrain: motives, benefits, and barriers", *Journal of Enterprise Information Management*, Vol. 21, No. 3, pp. 310-334.
- KARNI, R. (1982), "Capacity Requirements Planning-a systematization.", *International Journal of Production Research*, Vol. V 20, No. N 6, pp. 715-739.
- KASILINGAM, R. G. (1991), "Mathematical Modeling of the AGVS Capacity Requirements Planning Problem", *Engineering Costs and Production Economics*, Vol. 21, No. 2, pp. 171-175.
- KAUFMANN, A. (1974), *Métodos y Modelos de la Investigación de Operaciones*, Compañía Editorial Continental, Calz. De Tlalpan, Mexico.
- KEKRE, S., RAO, U., SARTHI, S. y YI, J. (2004), "Risk-Based Integration of Strategic and Tactical Capacity Planning", *Annals of Operations Research*, Vol. 132, No. 1/4, pp. 85-108.
- KHOSLA, I. (1995), "The scheduling problem where multiple machines compete for a common local buffer", *European Journal of Operational Research*, Vol. 84, No. 2, pp. 330-342.
- KHUMAWALA, B. M., HIXON, C. y LAW, J. S. (1986), "MRP II in the Service Industries", *Production and Inventory Management*, Vol. 27, No. 3, pp. 57-64.
- KIM, D. y MABERT, V. A. (1995), "Integrative versus separate cycle scheduling heuristics for capacitated discrete lot sizing and sequencing problems", *International Journal of Production Research*, Vol. 33, pp. 2007-2021.
- KIM, H. y HOSNI, Y. A. (1998), "Manufacturing lot-sizing under MRP II environment: An improved analytical model & heuristic procedure", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 35, No. 3/4, pp. 423-426.

- KOH, S. C. L. (2004), "MRP-Controlled Batch-Manufacturing Environment under Uncertainty", *Journal of the Operations Research Society*, Vol. 55, No. 3, pp. 219-232.
- KOH, S. C. L. y SIMPSON, M. (2007), "Could enterprise resource planning create a competitive advantage for small businesses?", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 14, No. 1, pp. 59-76.
- KOH, S. C. L., SIMPSON, M. y LIN, Y. (2006), "Uncertainty and contingency plans in ERP-controlled manufacturing environments", *Journal of Enterprise Information Management*, Vol. 19, No. 6, pp. 625-645.
- KREPCHIN, I. P. (1986), "How We Got to Class A MRP Status in One Year", *Modern Materials Handling*, Vol. 41, No. 14, pp. 107-109.
- KREPCHIN, I. P. (1989), "Using Computers for Planning and Control", *Modern Materials Handling*, Vol. 44, No. 13, pp. 68-71.
- KUIK, R. y TIELEMANS, P. (1997), "Setup utilization as a performance indicator in production planning and control", *International Journal of Production Economics*, Vol. 49, No. 2, pp. 175-182.
- KUIK, R. y TIELEMANS, P. (1999), "Lead-time variability in a homogeneous queueing model of batching", *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, No. 1/3, pp. 435-441.
- KULONDA, D. J. (1983), "Using CRP output: what have you done for your plant manager lately?", *Annual International Conference Proceedings-American Production and Inventory Control Society 26th.*, pp. 324-326.
- LANDVATER D. V. (1993), *World Class Production and Inventory Management*, Oliver Wight, Vermont.
- LANKFORD, R. (1990), "Capacity Management in Complex Production Environments", *Production & Inventory Management Review & Apics News*, Vol. 10, No. 5, pp. 40-43.
- LARRAÑETA, J.C. y otros, (1988), *Métodos modernos de Gestión de la Producción*, Alianza Universidad, Lugar.
- LEA, B. (2007), "Management accounting in ERP integrated MRP and TOC environments", *Industrial Management & Data Systems*, Vol. 107, No. 8, pp. 1188-1211.
- LEE, C. Y. (1993), "A recent development of the integrated manufacturing system: A hybrid of MRP and JIT", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 13, No. 4, pp. 3-18.
- LEE, Y.H. y PINEDO, M. (1997), "Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times", *European Journal of Operational Research*, Vol. 100, No. 3, pp. 464-474.
- LEMIN, Z. y ZHANG, Z. (2004), "Research about Basic Data Related to CRP and Problem Improvement for ERP Implementation", *Computer Engineering*, Vol. 30, No. 12, pp. 434-436.
- LITTLE, J.D.C. (1961), "A proof of the queueing formula $L = A W$ ", *Operations Research*, Vol. 9, pp. 383-389.

- LUNN, T. y NEFF, S. A.. (1992), *MRP Integrating Material Requirements Planning And Modern Business*, Irwin, New York.
- MABERT, V. A., SONI, A. y VENKATARAMANAN, M. A. (2002), "Sistemas ERP: mitos comunes "versus" realidad evolutiva", *Harvard-Deusto Business Review*, No. 106, pp. 74-82.
- MACKULACK, G. T. y otros (1980), "Computerized Hierarchical Production Control in Steel Manufacturing", *International Journal of Production Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 455-466.
- MANJI, J. F. (1990), "MRP Adapts to Forging Dies", *Automation*, Vol. 37, No. 8, p. 56.
- MARKLAND, R., VICKERY, S. y DAVIS, R. (1995), *Operations Management. Concepts in Manufacturing and Services*, West Publishing, St. Paul, Massachusetts.
- MARTÍNEZ, R. (1984), *Cómo rentabilizar la producción*, Ediciones Deusto, Bilbao.
- MASKELL, B. (1987), "Just-in-Time Manufacturing", *Industrial Management + Data Systems*, Vol. 87, No. 9, pp. 17-20.
- MATSUURA, H. y TSUBONE, H. (1993), "Setting planned leadtimes in capacity requirements planning", *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 44, No. 8, pp. 809-816.
- MCCARTHY, S. W. y BARBER, K. D. (1990), "Medium to short term finite capacity scheduling: a planning methodology for capacity constrained workshops", *Engineering Costs and Production Economics*, Vol. 19, No. 1/3, pp. 189-199.
- MELNYK, S. A. y DENZLER, D. R. (1996), *Operations Management*, Irwin, New York.
- MELNYK, S.A., SHAWNEE, K y CARTER, P.L. (1986), "Scheduling, Sequencing and Dispatching: Alternative Perspectives", *Production and Inventory Management*, Vol. 27, No. 2, pp. 58-6
- MEREDITH, J. R. (1992), *The management of operations: a conceptual emphasis*, John Wiley and Sons.
- METAXIOTIS, K. S., PSARRAS, J. E. y ERGAZAKIS, K. A. (2003), "Production scheduling in ERP systems: An AI-based approach to face the gap", *Business Process Management Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 221-247.
- MIKE, T. Z., NIU, S., DENG, S., ZHANG, Z., LI, Q. y ZHENG, L. (2007), "Hierarchical capacity Planning With Reconfigurable Kits in Global Semiconductor Assembly and Test Manufacturing", *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 543-552.
- MIRANDA GONZÁLEZ, F. J., RUBIO LACOBIA, S. CHAMORRO MERA, A. y BAÑEGIL PALACIOS, T. (2005), *Manual de Dirección de Operaciones*, Thomson, Madrid.

- MISSBAUER, H. (1997), "Order release and sequence-dependent setup times", *International Journal of Production Economics*, Vol. 49, No. 2, pp. 131-143.
- MOLINDER, A. y OLHAGER, J. (1998), "The effect of MRP lot sizing on actual cumulative lead times in multi-level systems", *Production Planning & Control*, Vol. 9, No 3, pp. 293-302.
- MONKS, J.G. (1985), *Administración de Operaciones*, McGraw-Hill, Naupalcan de Juárez, Mexico.
- MONKS, J.G. (1988), *Administración de Operaciones*. McGraw-Hill. Madrid.
- MORALEDA MARTÍNEZ, A. (2002), "Soluciones tecnológicas para competir en el siglo XXI", *Dirección y Progreso*, No. 182, pp. 13-17.
- MULA, J., POLER, R., GARCÍA-SABATER, J. P. y LARIO, F. C. (2006), "Models for production planning under uncertainty: A review", *International Journal of Production Economics*, Vol. 103, No. 1, pp. 271-285.
- MUÑIZ GONZÁLEZ, L. (2004), *ERP guía práctica para la selección e implantación: ERP, Enterprise Resource Planning o Sistema de Planificación de Recursos Empresariales*, Ediciones Gestión 2000, S.A.
- MUÑOZ GINER, J. (2007), *Sistemas de gestión ERP en el sector textil*, Instituto Tecnológico Textil.
- MUÑOZ OÑATE, F. y RODRIGO MOYA, B. (2003), *Dirección de operaciones en alojamiento y restauración*, Universitas Internacional, S.L.
- MUSCATELLO, J. R., SMALL, M. H. y CHEN, I. J. (2003), "Implementing enterprise resource planning (ERP) systems in small and midsize manufacturing firms", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 23, No 8, pp. 850-871.
- MUSSELMAN, K., O' REILLY, J. y DUKET, S. (2002), "The role of simulation in advanced planning and scheduling", *Proceedings of 2002 the Winter Simulation Conference*, pp. 1825-1830.
- NAHMIAS, S. y (1999), *Análisis de la producción y las operaciones*, Compañía Editorial Continental, Colonia San Juan Tliluaca.
- NARASIMHAN, S. L., MCLEAVEY, D. W. y BILLINGTON, P. J. (1996), *Planeación de la Producción y Control de Inventarios*, Prentice Hall, Naupalcan de Juárez, Mexico.
- NARVAIZA, J. L., LAKA, J. P., MADARIAGA, J. A. y UGARTE, J. V. (1998), *Estadística descriptiva y probabilidad*, Desclee de Brouwer, Bilbao.
- NAYLOR, J. (1999), *Operations Management*, Pitman Publishing, Glasgow.
- NIEBEL, B.W (1996), *Ingeniería Industrial. Métodos, Tiempos y Movimientos*, Alfaomega, México.
- NOORI, H. y RADFORD, R. (1997), *Administración de Operaciones y Producción*, McGraw-Hill, Santafé de Bogotá.
- ODEN, H. W., LANGENWALTER, G. A. y LUCIER, R. A. (1987), "Integrating Manufacturing Resources Planning (MRP II) with Flexible Manufacturing

- Systems (FMS)", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 13, No. 1-4, pp. 107-111.
- ODEN, H. W., LANGENWALTER, G. A. y LUCIER, R. A. (1993), *Handbook of Material & Capacity Requirements Planning*, McGraw-Hill, New York.
- OIT, (1971), *Introducción al Estudio del Trabajo*, OIT, Ginebra.
- OLANETA, J. A. (2002), "El control de gestión: situación actual y oportunidades", *Banca y Finanzas*, No. 74, pp. 29-32.
- ORLICKY, J. (1975), *Material Requirements Planning*, McGraw Hill, New York.
- OZEKI, K. (1992), *Manual de herramientas de calidad*, Tecnologías de Gerencia y Producción S.A.
- PANDEY P. C., YENRADEE P. y ARCHARIYAPRUEK S. (2000), "A finite capacity material requirements planning system", *Production Planning and Control*, Vol. 11, No. 2, pp. 113-121.
- TAAL, M y WORTMANN, J. C. (1997), "Integrating MRP and finite capacity planning", *Production Planning & Control*, Vol. 8, No. 3, pp. 245-254.
- PARASKEVOPOULOS, D., KARAKITSOS, E. y RUSTEM, B. (1991), "Robust Capacity Planning under Uncertainty", *Management Science*, Vol. 37, No. 7, pp. 787-800.
- PARK, M.W. y KIM, Y.D. (1999), "A heuristic algorithm for a production planning problem in an assembly system", *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 50, No. 2, pp. 138-147.
- PARZEN, E. (1972), *Procesos estocásticos*, Paraninfo, Madrid.
- PAZOS ARIAS, J. J., SUÁREZ GONZÁLEZ, A. y DÍAZ REDONDO, R. P. (2003), *Teoría de Colas y Simulación de Eventos Discretos*, Prentice-Hall, Madrid.
- PELÁEZ, A. (2002), "ERP: La gestión empresarial integrada", *Banca y Finanzas*, No. 74, pp. 25-26.
- PELIGROS ESPADA, M. C. (2005), *Organización productiva en la industria española del automóvil*, Consejo Económico y Social (España).
- PÉREZ GOROSTEGUI, E. (1989), *Economía de la Empresa (Introducción)*, Centro de Estudios Ramón Areces.
- PETRONI, A. (2002), "Critical factors of MRP implementation in small and medium-sized firms", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 22, No. 3, pp. 329-348.
- PETRONI, A. y RIZZI, A. (2002), "A fuzzy logic based methodology to rank shop floor dispatching rules", Vol. 76, No. 1, pp. 99-108.
- PILLAI, V. y CHANDRASEKHARAN, M. (2008), "An absorbing Markov chain model for production systems with rework and scrapping", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 55, No. 3, pp. 695-706.
- PLENERT, G. (1992), "What Does a Decision Support System (DSS) Do for Manufacturing?", *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 33, No. 1, pp. 17- 19.

- PLENERT, G. (1999), "Focusing material requirements planning (MRP) towards performance", *European Journal of Operations Research*, Vol. 119, pp. 91-99.
- PLENERT, G. (2002), *International Operations Management*, Copenhagen Business School Press, Copenague.
- PLENERT, G. y BEST, T. (1986), "MRP, JIT, and OPT what's best?", *Production and Inventory Management*, Vol. 27, No. 2, pp. 22-29.
- PLENERT, G. y KIRCHMIER, B. (2000), *Finite Capacity Scheduling. Management, Selection and Implementation*, John Wiley & Sons, Nueva York.
- PLOSSL, G.W. (1983), *Production and Inventory Control Applications*, George Plossl Educational Services, Atlanta.
- PLOSSL, G.W. (1988), "Throughput time control", *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 493-499.
- PLOSSL, G.W. (1995), *Orlicky's Material Requirements Planning*, McGraw-Hill, New York.
- PLOSSL, G. W. y WIGHT, O. W. (1973), "Capacity Planning and Control", *Production and Inventory Management*, Vol. 14, No. 3, pp. 31-68.
- POPE, J. A. y WERMUS, M. (1993), "The university in an MRP framework: The administration perspective", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 13, No. 2, pp. 36-46.
- PORTER, J. K., JARVIS, P., LITTLE, D., LAAKMANN, J., HANNEN, C. y SCHOTTEN, M. (1996), "Production planning and control system developments in Germany", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 16, No. 1, pp. 27-39.
- PRAWDA WITENBERG, J. (1988), *Métodos y modelos de investigación de operaciones*, Noriega Editores, México.
- PROKOPENKO, J (1989), *La Gestión de la Productividad, Manual Práctico*, Oficina Internacional del Trabajo, Ginebra.
- PTAK, C. (1991) "MRPII, OPT, JIT and CIM-Succession, evolution, or necessary combination", *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 32, No. 2, pp. 7-11.
- PTAK, C. A. (1997), *MRP and Beyond*, McGraw-Hill, New York.
- RABADÁN MARTÍN, I., GARCÍA GONZÁLEZ, S., GESSA PERERA, A y SANCHÁ DIONISIO, M. P. (2004), "Análisis de la incidencia de las reglas de prioridad FCFS y MTP en la carga y el plan de capacidad de un centro de trabajo", *Proceeding 2004, XIV Jornadas Hispano-lusas de Gestión Científica, Azores, Portugal*.
- RAO, A. y SCHERAGA, D. (1988), "Moving From Manufacturing Resource Planning To Just-In-Time", *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 29, No. 1, pp. 44-49.
- REGUANT FOSAS, F. (2006), *Gestión integrada con un ERP : apuntes para liderar el cambio*, Asociación Catalana de Contabilidad y Dirección.

- ROBB, D. (2005), "Up to Capacity", *Computerworld*, Vol. 39, No. 35, pp. 24-26.
- ROBERT JACOBS, F. y TEDWESTON, J., F.C. (2007), "Enterprise resource planning (ERP)--A brief history", *Journal of Operations Management*, Vol. 25, No. 2, pp. 357-363.
- RODRÍGUEZ HUERTAS, R. y GÁMEZ MELLADO, A. (2002), *Investigación Operativa. Teoría, ejercicios y prácticas con ordenador*, Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, Cádiz.
- ROYO SÁNCHEZ, J. A. (2002), *Planificación y gestión de la producción*, Kronos.
- RUIZ JIMÉNEZ, A. y CHAVES MIRANDA, M. E. (1999), *Economía, servicios y dirección y gestión de la producción*, Universidad de Sevilla. Departamento de Economía Financiera y Dirección de Operaciones.
- RUÍZ RECIO, R. (1991), *Cómo calcular los tiempos de trabajo*, Deusto, Bilbao.
- RUIZ USANO, R. y FRAMINÁN TORRES, J. M. (2002), "Sistemas ERP (I): Caracterización y evolución histórica", *Alta Dirección*, Vol. 38, No. 226, pp. 37-44.
- RUSSELL, R. S. y TAYLOR, B. W. (1995), *Production and Operations Management. Focusing on Quality and Competitiveness*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- SANTOS PEÑAS, J., MUÑOZ ALAMILLOS, A., JUEZ MARTEL, P. y GUZMÁN JUSTICIA, L. (1999), *Diseño y Tratamiento Estadístico de Encuestas para Estudios de Mercado*, Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid.
- SANZ SANZ, M. (2001), "Metodología de análisis del impacto de la implantación de SAP R/3 en una organización empresarial: Diseño conceptual SAP R/3", *Alta Dirección*, Vol. 37, No. 218, pp. 76-92.
- SARABIA VIEJO, A. (1996), *La Investigación Operativa*, Publicaciones de la Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- SARMENTO COSTA, R y JARDIM, E. G. M. (1998), "Total punctuality approach for the jobbing industry", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 18, No. 3, pp. 260-270.
- SCHMITT, T. G., BERRY, W. L. y VOLLMANN, T. E. (1984), "An Analysis of Capacity Planning Procedures for a Material Requirements Planning System", *Decision Sciences*, Vol. 15, No. 4, pp. 522-541.
- SCHROEDER, R. (1992), *Administración de Operaciones*, McGraw-Hill, México.
- SCHROEDER, R.G. (2000), *Operations Management: Contemporary Concepts*, McGraw-Hill/Irwin, New York.
- SCOTT, B. (1994), *Manufacturing Planing System*, McGraw-Hill, Berkshire, England.
- SELLADURAI, V. y otros (1995), "Dynamic simulation of job shop scheduling for optimal performance", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, No. 7, pp. 106-120.
- SERRANO BEDÍA, A. M. y HERNANDO MOLINER, G. (2006), "La vertiente organizativa de los sistemas de planificación de recursos de la empresa

- (ERP): revisión de la literatura y perspectivas de futuro de la investigación”, *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*, Vol. 12, No. 3, pp. 63-76.
- SHEHAB, E. M., SHARP, M. W., SUPRAMANIAM, L. y SPEDDING, T. A. (2004), “Enterprise resource planning: An integrative review”, *Business Process Management Journal*, Vol. 10, No. 4, pp. 359-386.
- SHEU, C. y WACKER, J. G. (1997), “The effects of purchased part commonality on manufacturing lead time”, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 17, No. 8, 725-745.
- SIRIGINIDI, S. R. (2000), “Enterprise resource planning in reengineering business”, *Business Process Management Journal*, Vol. 6, No. 5, pp. 376-391.
- SLACK, N. (1997), *The Blackwell Encyclopedic Dictionary of Operations Management*, Blackwell, Oxford.
- SMITH, M. (2008), “Chasing the light”, *Industrial Engineer*, Vol. 40, No. 8, pp. 45-49.
- SMOLIN, C. R. (1986), “CRP: Who Needs It ... And Why”, *Manufacturing Systems*, Vol. 4, No. 12, pp. 14-16.
- SNYDER, C. (1985), “Bright New Promise: Micro MRP II Moves into the Mainstream”, *ICP Manufacturing Software*, Vol. 10, No. 2, pp. 11-13.
- SNYDERS, J. (1982), “Inventory Control: It's Like Money in the Bank”, *Computer Decisions*, Vol. 14, No. 6, pp. 54-62.
- STEVENSON, W. J. (1990), *Production/Operations Management*, Irwin.
- STEVENSON, W. J. (2002), *Operations Management*, McGraw-Hill/Irwin, New York.
- STONEBRAKER, P. W. y LEONG, G. K. (1994), *Operations Strategy*, Allyn & Bacon, Needham Heights, Massachusetts.
- THOMAS, M. (2006), *The gold standard*, *Industrial Engineer*, Vol. 38, No. 4, pp. 35-39.
- THOMPSON, K. (1983), “MRP II in the Repetitive Manufacturing Environment”, *Production and Inventory Management*, Vol. 24, No. 4, pp. 1-14.
- THOMPSON, M. B. (1993), “Simulation-based capacity planning and scheduling with autoshed”, *Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference*, pp. 255-262.
- TOOMEY, J. W. (1996), *MRP II Planning for Manufacturing Excellence*, Chapman & Hall, New York.
- TOYE JR. C. A. (1990), “Let's update capacity requirements planning logic”, *Annual International Conference Proceedings - American Production and Inventory Control Society*, pp. 215-221.
- TRIGEIRO, W.W., THOMAS, L.J. y MCLAIN, J.O. (1989) “Capacitated lot sizing with setup times”, *Management Science*, Vol. 35, pp. 353-366.
- TRINO, J. (1990), “The Competitive Advantage Is Provided By Integrated Informa”, *Industrial Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 36-38.

- TURBIDE, D. A. (1994), "What's so new about execution systems?", *3X/400 Systems Management*, Vol. 22, No. 3, pp. 130-131.
- UMBLE, E. J., HAFT, R. R. y UMBLE, M. M. (2003), "Enterprise resource planning: Implementation procedures and critical success factors", *European Journal of Operational Research*, Vol. 146, No. 2, pp. 241-257.
- URCELAY, A. (2005), "Balance logístico de los sistemas ERP", *Estudios Empresariales*, No. 117, pp. 18-21.
- VALLHONRAT, J. M. y COROMIAS, A. (1991), *Localización, Distribución en Planta y Manutención*, Marcombo, Barcelona.
- VELÁZQUEZ MEDINA, S. (2005), *Guía teórica de la dirección de operaciones: aspectos estratégicos*, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- VERAL, E.A. y MOHAN, R.P. (1999), "A two-phased approach to setting due-dates in single machine job shops", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 36, No. 1, pp. 201-218.
- VOLGENANT, A. y TEERHUIS, E. (1999), "Improved heuristics for the n-job single-machine weighted tardiness problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 26, No. 1, pp. 35-44.
- VOLLMANN, T. E., BERRY, W. L. y WHYBARK, D. C. (1995), *Sistemas de Planificación y Control de Producción*, Irwin, Mexico.
- VONDEREMBSE, M. A. y WHITE, G. P. (1996), *Operations Management*, West Publishing, St. Paul, Minneapolis.
- WACKER, J. G. (1985), "Effective Planning and Cost Control for Restaurants: Making Resource Requirements Planning Work", *Production and Inventory Management*, Vol. 26, No. 1, pp. 55-70.
- WALLACE, T. ed. (1987), *APICS Dictionary*, American Production and Inventory Control Society, Falls Church.
- WALLACE, T. y KREMZAR, M. (2001), *ERP: Making it Happen*, John Wiley & Sons, New York.
- WALTERS, C. D. J. (1991), *An Introduction to Operations Management*, Addison Wesley, Lugar.
- WATERS, D. (1996), *Operations Management. Producing Goods & Service*, Addison-Wesley Publishing Co, New York.
- WEBSTER, S.T. (1993), "A priority rule for minimizing weighted flow time in a class of parallel machine scheduling problems", *European Journal of Operational Research*, Vol. 70, No. 3, pp. 327-334.
- WEEKS, J. K. (1979), "A simulation study of predictable due dates", *Management Science*, Vol. 25, pp. 363-373.
- WEIL M. y (2000), "Meeting diverse demands", *Manufacturing Systems*, Vol. 18, No. 4, pp. 30-34.
- WEINBERG, N. (1998), "Preparing for ERP", *Network World*, Vol. 15, No. 44, pp. 47-49.

- WEMMERLÖV, U. (1979), "Designed factors in MRP systems: A limited survey", *Production and Inventory Management*, Vol. 20, No. 4, pp. 15-34.
- WEMMERLÖV, U. (1980), "A Note on Capacity Planning", *Production and Inventory Management*, Vol. 21, No. 3, pp. 85-89.
- WEMMERLÖV, U. (1984), *Capacity Management Techniques. For Manufacturing Companies with MRP Systems*, American Production and Inventory Control Society, Cincinnati, Ohio.
- WENYI, Y., JIAN, L., JUNBIN, Y., JIANHUA, P. y XIAOQIANG, W. (2007), "A study of the method of capacity requirements planning", *Proceedings IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, GSIS*, pp. 1363-1369.
- WIGHT, O. W. (1981), *MRP II, Unlocking America's Productivity Potential*, CBI Publishing, Mass, Boston.
- WILLIAMS, B. R. (1995), *Manufacturing for Survival*, Addison-Wesley Publishing, Massachusetts.
- WOODWARD, J. (1965), *Industrial organization: theory and practice*, Oxford University Press, Londres.
- WORTMAN, J. C., EUWE, M. J., TAAL, M. y WIERS, V. C. S. (1996), "A review of capacity planning techniques within standard software packages", *Production Planning and Control*, Vol. 7, No. 2, pp. 117-128.
- YEH, C. (1997), "Schedule based production", *International Journal of Production Economics*, Vol. 51, pp. 235-242.
- ZAMARREÑO LÓPEZ, J. (2008), *Informatización del sector servicios: ejemplo de ERP*, Redactors i Editors SL.
- ZOBOLAS, G. I., TARANTILIS, C. D. y IOANNOU, G. (2008), "Extending capacity planning by positive lead times and optional overtime, earliness and tardiness for effective master production scheduling", *International Journal of Production Research*, Vol. 46, No. 12, pp. 3359-3386.