

UN ANÁLISIS TEÓRICO DE LA PROBABILIDAD DE CUMPLIMIENTO DEL PLAN DE CAPACIDAD A CORTO PLAZO

Inmaculada Rabadán Martín
Santiago García González

RESUMEN

El trabajo pretende realizar una aproximación a los orígenes de las desviaciones provocadas en el cálculo del Plan de Carga elaborado con la técnica de Planificación de Necesidades de Capacidad (CRP), estudiando por separado las que devienen de la diferencia del valor del tiempo de carga estimado con respecto al realmente producido y las provocadas por las divergencias entre el periodo en el que se ha asignado la carga de una operación y el momento en el que se produce realmente ésta (debido a variaciones en el resto de los tiempos que componen el tiempo de suministro). Para ello se han estudiado, de forma teórica, los intervalos de variación de la carga y del periodo de asignación de ésta, analizando, a continuación, la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga, tanto para el caso de que las operaciones se completen en un solo periodo, como si la carga se distribuye entre varios cubos de tiempo.

PALABRAS CLAVE: Planificación de Necesidades de Capacidad, Plan de Carga, Gestión de la Capacidad.

ABSTRACT

The aim of this work is to approach to deviations in the calculation of the Capacity Requirements with Capacity Requirement Planning (CRP), studying two possible causes: in one hand, the wrong calculation of the load time; and, in other hand, although the load time was right, it can be transferred total or partially to a different period from it was assigned initially, due to variations in the other times that compose the lead time. The likelihood of the amount of load and the allocation of this one has been studied of theoretical form, under the consideration as much of that all the operations in a period are executed totally in it, as well as when some operations are unfinished. Afterwards the joint likelihood for these two cases is analyzed.

KEY WORDS: Capacity Requirement Planning, Capacity Requirements, Capacity Management.

1. LA PLANIFICACIÓN DE NECESIDADES DE CAPACIDAD (CRP)

La Planificación de Necesidades de Capacidad, también llamada CRP (por sus siglas en inglés, Capacity Requirement Planning), “*es una técnica que planifica las necesidades de capacidad de los pedidos planificados emitidos por MRP³⁷, bajo la consideración de la disponibilidad ilimitada de capacidad*” (Dominguez y otros

³⁷ Material Requirements Planning o Plan de Necesidades de Materiales.

1995b, p.164). Desde su incorporación a los primeros Sistemas MRP de Bucle Cerrado (*MRP Closed Loop*) a principios de los 70 (Orlicky, 1975, p. 244), CRP 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*). Sin embargo su nivel de implantación no ha alcanzado el de otros módulos³⁸, entre otros motivos debido a la gran cantidad de información que precisa y la dificultad de su proceso de cálculo. Teniendo en consideración que la mayoría de los datos necesarios son variables aleatorias, cuyo valor medio es preciso estimar, el resultado de la aplicación de CRP está sujeto a una amplia aleatoriedad. Por ello hemos creído conveniente reflejar, de manera teórica, la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga, puesto que el riesgo de incumplimiento de los planes elaborados es una magnitud determinante en la decisión de implementar dicha técnica, dado que condiciona su utilidad para la toma de decisiones y condiciona la viabilidad del Plan de Materiales aprobado.

2. EL PLAN DE CARGA ELABORADO MEDIANTE CRP

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, calculando la capacidad necesaria o carga de cada Centro de Trabajo³⁹ (en adelante CT), para poder cumplir la planificación.

Para la elaboración del Plan de Carga, el CRP utiliza el tiempo de suministro, que será el que determinará el momento en el que asignar la carga. Se puede definir aquél como el “intervalo de tiempo que transcurre entre el momento en 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). Para el cálculo del tiempo medio de suministro interno⁴⁰ para un artículo j (ya sea un componente fabricado por la empresa o un producto final), en horas reales (\overline{TS}_j), que necesita pasar por I operaciones para elaborarse⁴¹, llevadas a cabo en un total de M CT, se podría representar como:

$$\overline{TS}_j = \overline{Tconf}_j + \overline{Tdm}_j + \sum_{i=1}^I \overline{Td}_{ij} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tcola}_{ijk} + \sum_{k=1}^M \frac{\sum_{i=1}^I (\overline{tc}_{ijk}) \cdot Q_j / v_i}{E_k \cdot U_k} + \sum_{i=1}^I \overline{Tesp}_{ij} + \sum_{i=1}^I \overline{Tinsp}_{ij} \quad (1)$$

Donde:

\overline{Tconf}_j = tiempo medio de confección de un pedido de artículo j .

³⁸ Véase, por ejemplo, Burcher (1992), Classen. y Malstrom (1982) y Schmitt, Berry y Vollmann (1984).

³⁹ 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.

⁴⁰ Cuando el ítem solicitado lo fabrica la propia empresa.

⁴¹ La secuencia de operaciones por las que deben pasar los materiales para la obtención de un ítem compone la ruta de fabricación.

\overline{Tdm}_j = tiempo medio de desplazamiento de los materiales necesarios para elaborar un lote medio de artículo j , desde su zona de almacenamiento hasta el primer CT.

\overline{Td}_{ij} = tiempo medio de desplazamiento desde el CT donde se ejecuta la operación i hasta el siguiente CT 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 para que se le realice la operación i , que se realiza en el CT k , a un lote de artículo j .

tc_{ijk} = tiempo de carga unitario para la operación i en el CT k para elaborar el artículo j ⁴², en horas estándar.

\overline{Q}_j = tamaño medio de un lote del artículo j .

v_i = producto de los factores de aprovechamientos de la operación i ⁴³ y de todas las operaciones siguientes que se realicen hasta el final de su ruta.

E_k = factor de eficiencia del CT k ⁴⁴.

U_k = factor de utilización del CT k ⁴⁵.

\overline{Tesp}_{ij} = tiempo medio de espera una vez realizada la operación i al lote de artículo j , para su traslado al CT donde se le realizará la operación siguiente, o al almacén si el lote está completado.

\overline{Tinsp}_{ij} = tiempo medio dedicado a la inspección de un lote medio de artículo j , tras realizarle la operación i .

Todos los elementos que componen el tiempo de suministro suelen actuar como variables aleatorias, por lo que se deben estimar sus valores medios, existiendo pues, un riesgo de que el tiempo de suministro planificado y sus elementos, no coincidan con los que realmente se producirán.

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 CT 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), provocan la aleatoriedad de su comportamiento.

Por ello, las desviaciones entre la planificación de la capacidad elaborada mediante de 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. Esto implica que el hecho de que el Plan de Carga calculado se cumpla, depende tanto de si se ha establecido bien el valor de la carga generada en cada CT 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 del tiempo en que va a producirse.

⁴² 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 CT k para realizar la operación i (tp_{ik}).

⁴³ Calculados como $a_i = (1 - d_i)$, considerando d_i como la fracción de defectuosas media obtenida al ejecutar la operación i al artículo j . Ver García y García (1994) o Domínguez y Otros (1995).

⁴⁴ Considerado como la media de los ritmos de actividad de las distintas operaciones realizadas por los diferentes operarios que trabajan en un CT.

⁴⁵ Cociente entre las horas productivas y las horas reales o teóricas de trabajo.

En consecuencia, en este trabajo nos dedicaremos, en primer lugar, a analizar por separado las dos fuentes de variación del Plan para, posteriormente, reflejar el efecto conjunto de éstas a través de la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga generado. Para ello diferenciaremos dos posibles situaciones que se pueden generar a la hora de calcular el valor de la carga que se asignará a un periodo concreto: que la carga de la operación se asigna totalmente a un periodo; o bien que ésta deba distribuirse entre varios periodos del horizonte de planificación.

Para ello partiremos de un caso muy simple, en el que una empresa elabora un único ítem j , para lo cual utiliza varios CT. Tomaremos también como hipótesis de partida que en un periodo de tiempo no coincide carga procedente de la elaboración de varios lotes. Con objeto de simplificar los cálculos consideraremos que los tiempos de espera e inspección se producen únicamente tras la última operación de la ruta.

2.2 ASIGNACIÓN DE LA CARGA A UN PERIODO

Si se pretende 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. Se debe tener en consideración que, mientras que la carga de los CT se mide en horas estándar (con objeto de compararla con la capacidad disponible), para estudiar los posibles traslados de ésta entre periodos, utilizaremos horas reales. Es preciso, por tanto, definir el tiempo de carga de un lote, en horas reales. Así, por ejemplo, el tiempo medio de carga necesario para ejecutar una operación i , que se realiza en el CT k , a todas las unidades de un lote medio del ítem j (\overline{Tc}_{ijk}) será, en horas reales, para el caso de que las tasas de llegada al CT se distribuyan como una Poisson⁴⁶ y se produzca la entrada en el CT por orden de llegada⁴⁷:

$$\overline{Tc}_{ijk} = \frac{\overline{tc}_{ijk} \times \overline{Q}_j / v_i}{E_k \times U_k} = \frac{\overline{tc}_{ijk} \times \overline{Q}_j}{E_k \times U_k \times v_i} = \frac{1}{E_k \times U_k} \left(\overline{te}_i \times \frac{\overline{Q}_j}{v_i} + \overline{tp}_{ik} \left(1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}} \right) \right) \quad (2)$$

Donde:

\overline{te}_i = tiempo medio de ejecución de la operación i .

\overline{tp}_{ik} = tiempo medio de preparación del CT k para ejecutar la operación i tras haber estado realizando otra operación distinta con anterioridad.

v_i = producto de los factores de aprovechamientos medios de la operación i y de todas las operaciones siguientes que se realicen hasta el final de su ruta.

λ_{ik} = tasa de llegada al CT k del ítem al que hay que hacerle la operación i .

I_k = total de operaciones que se realizan en el CT k .

⁴⁶ En la fabricación por lotes, existen gran cantidad de casos en los que la tasa de llegada se ajusta adecuadamente a la distribución de Poisson; siendo esta distribución la más aplicada para la modelización de las líneas de espera en la teoría de colas. Véase, por ejemplo Domínguez y otros (1995, p.388), Eppen (2000, p.576) y De la Fuente y Pino (2001, p.5). No obstante, para comprobar si se cumple en la práctica sería necesario realizar un contraste de hipótesis.

⁴⁷ Basándonos en García y García (1994) donde indican el efecto de las unidades defectuosas en el tiempo de carga y García, Rabadán y Gessa (2003) en el que se refleja la incidencia en el tiempo de preparación de las reglas de secuenciación.

2.2.1. CARGA DE LAS OPERACIONES ASIGNADAS A UN SOLO PERIODO

Considerando que se realizan, en un mismo periodo (cuya duración es Tp), varias operaciones que pueden procesarse en CT diferentes, cuando se utiliza la programación hacia delante en el proceso de asignación de cargas⁴⁸, 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 :

$$Tp - \overline{Td_{n-1j}} - \overline{Tcola_{nj}} \leq \overline{Tconf_j} + \overline{Tdm_j} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=1}^M \overline{Tc_{ijk}} + \sum_{i=1}^{n-2} \overline{Td_{ij}} \leq Tp \quad (3)$$

En el segundo periodo, si éste no es el último que conforma el tiempo de suministro, se realizan desde la operación n hasta la m :

$$Tp - \overline{Td_{mj}} - \overline{Tcola_{m+1jk}} \leq \sum_{i=n-1}^{m-1} \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M \overline{Tc_{ijk}} \leq Tp \quad (4)$$

Los intervalos siguientes, hasta el penúltimo de su tiempo de suministro, se calcularán de manera similar a la anteriormente descrita. 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 es:

$$\sum_{i=y}^I \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=y+1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} + \sum_{i=y+1}^I \sum_{k=1}^M \overline{Tc_{ijk}} + \overline{Tesp_j} + \overline{Tinsp_j} \leq Tp \quad (5)$$

2.2.2. CARGA DE LAS OPERACIONES DISTRIBUIDAS ENTRE VARIOS PERIODOS

La carga generada por el procesamiento de una operación a un lote, puede no ser asignada totalmente a un periodo del horizonte de planificación, sino que, debido al resto de los elementos que componen el tiempo de suministro, puede verse 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 (que consideraremos constante). Para cada periodo concreto nos podemos encontrar varias posibles situaciones: que éste comience con el procesamiento de un lote (el cual quede inconcluso, de manera que sólo una parte de la carga quede asignada al periodo), que en un mismo periodo termine la ejecución de una operación comenzada en periodos anteriores (quedando alguna operación posterior en proceso), que un periodo comienza con la finalización de un operación parcialmente ejecutada (no quedando carga fraccionada para periodos posteriores) y, en último lugar, podría darse el caso de operaciones, que para lotes altos, originen un

⁴⁸ 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. Véase, por ejemplo, Wemmerlöv (1984, p.32), Connor (1986, p.21), Cheng (1986, p.443), Oden, Langenwalter y Lucier (1993, p.195), y Companys y Coromias (1995, p.276).

tiempo de carga superior al tiempo del periodo (ocupando tres o más cubos de tiempo). Procedemos a continuación a reflejar estas situaciones.

Si la carga fraccionada se origina únicamente al final de un periodo en el que se ejecuta desde la operación n a la m completamente, realizándose una fracción $f_{1/y_{m+1}}^{m+1jk}$ de la operación $m+1$:

$$\sum_{i=n-1}^m \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=n}^{m+1} \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M \overline{Tc_{ijk}} + \sum_{k=1}^M (f_{1/y_{m+1}}^{m+1jk} \times \overline{Tc_{m+1jk}}) = Tp \quad (6)$$

Siendo $f_{1/y_{m+1}}^{m+1jk}$ la primera fracción de un total de y_{m+1} periodos entre los que se repartirá la carga de la operación $m+1$. Consideraremos, en términos generales, que f_{x_n/y_n}^{njk} es la fracción de carga, asignada a un periodo, de la operación n para el ítem j , que se realiza en el CT k , reflejando x_n el número de ordinal del periodo en el que se reparte la carga de la operación sobre el total de y_n . Lógicamente, la suma de las fracciones consideradas en los distintos periodos, en los que se distribuye la carga de la operación $m+1$, tiene que ser uno. Así por ejemplo, $f_{2/3}^{541}$ será la fracción de carga asignada al segundo de los tres periodos entre los que se reparte la carga de la operación 5 del ítem 4 en el CT 1.

El sumatorio de las fracciones de carga incluido en la expresión (6) nos sirve para reflejar que hará que incluir parte de la carga de la operación $m+1$, independientemente del CT donde se realice ésta. Por otro lado, se puede observar que no se permite un intervalo de variación, lo cual se debe a que si la suma reflejada es mayor o menor que el tiempo que ocupa un periodo (Tp), se originaría un desplazamiento de la carga, puesto que entraría parte de la asignada al periodo siguiente.

Otra situación con la que nos podemos encontrar es aquella en la que se ejecuta totalmente desde la operación n a la m , pudiéndose comenzar con la continuación de la operación $n-1$ (en el caso de no haberse terminado en el periodo anterior) y acabar con el comienzo de la realización de la operación $m+1$:

$$\sum_{k=1}^M (f_{x_{n-1}/y_{n-1}}^{n-1jk} \times \overline{Tc_{n-1jk}}) + \sum_{i=n-1}^m \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=n}^{m+1} \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M \overline{Tc_{ijk}} + \sum_{k=1}^M (f_{1/y_{m+1}}^{m+1jk} \times \overline{Tc_{m+1jk}}) = Tp \quad (7)$$

Cuando un periodo comienza con la continuación de la ejecución de una operación que no es terminada en él, es decir, se realiza la fracción $f_{x_{m+1}/y_{m+1}}^{m+1jk}$ de la operación $m+1$ correspondiente al ítem j , en el CT k , siendo x_{m+1}

distinto de y_{m+1} , obtendremos:

$$f_{x_{m+1}/y_{m+1}}^{m+1jk} \times \overline{Tc_{m+1jk}} = Tp \quad (8)$$

Siendo este caso el más restrictivo y el que tiene menor probabilidad de cumplimiento, puesto que no existen otras variables con las que compensar las posibles desviaciones que se pueden originar.

A diferencia de los casos anteriores, si en un periodo sólo existe una operación parcialmente realizada (la operación $m+1$), que se termina al principio de éste, y se ejecuta hasta la operación q (completada en ese periodo), existe cierto margen de movimiento:

$$Tp - \overline{Td}_{qj} + \overline{Tcola}_{q+1jk} \leq \sum_{k=1}^M (f_{x_{m+1}/y_{m+1}}^{m+1jk} \times \overline{Tc}_{m+1jk}) + \sum_{i=m+1}^{q-1} \overline{Td}_{ij} + \sum_{i=m+2}^q \sum_{k=1}^M \overline{Tcola}_{ijk} + \sum_{i=m+2}^q \sum_{k=1}^M \overline{Tc}_{ijk} \leq Tp \quad (9)$$

Si en el periodo en cuestión sólo se termina la operación comenzada en el periodo anterior, únicamente se incluye el tiempo necesario para acabar la operación $m+1$ (x_{m+1} es igual a y_{m+1}):

$$Tp - \overline{Td}_{m+1j} + \overline{Tcola}_{m+2jk} \leq \sum_{k=1}^M (f_{x_{m+1}/y_{m+1}}^{m+1jk} \times \overline{Tc}_{m+1jk}) \leq Tp \quad (10)$$

Cuando no quedan operaciones inconclusas al final del periodo la planificación permite cierto intervalo de variación de la carga dentro del periodo, encontrándonos con una situación similar a la observada para el caso de que no existan fracciones de carga (Apartado 2.2). Sin embargo, si un periodo finaliza con la ejecución parcial de una operación, cualquier movimiento de la carga de ésta originará un desplazamiento de la carga asignada.

Para el análisis de los desplazamientos de carga hay que tener en cuenta el tiempo de carga de todas las operaciones que se realizan en el periodo objeto de estudio, independientemente del CT donde se ejecuten. Esto se ha reflejado en las expresiones (6), (7), (9) y (10) con la inclusión del sumatorio con respecto a k . Considerando la hipótesis de partida de que en un periodo no coincide carga de lotes diferentes, sólo puede comenzar el periodo realizando una única operación no terminada en el periodo anterior y únicamente existirá una operación que quede inconclusa al final del cubo de tiempo.

2.3. EL VALOR DE LA CARGA ASIGNADA A UN PERIODO

El procedimiento de cálculo de CRP se inicia elaborando un Plan de Carga a partir de las órdenes planificadas y en curso, determinando la capacidad necesaria para cada CT en cada período de tiempo del horizonte temporal considerado. El valor medio de la carga necesaria, en horas estándar, para ejecutar una operación i en el CT k a un lote emitido de tamaño medio (\overline{Q}_j), se calculará, basándonos en la expresión (2), como:

$$\overline{Tc}_{ijk} \times E_k \times U_k = \overline{te}_i \times \frac{\overline{Q}_j}{v_i} + \overline{tp}_{ik} \left(1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}}\right) \quad (11)$$

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 carga 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 CT 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.

2.3.1. CARGA DE UNA OPERACIÓN ASIGNADA TOTALMENTE A UN PERIODO

Si en un periodo, en un CT, se realizan varias operaciones de la ruta de un ítem j , la carga asignada es la suma de los tiempos de carga originados por la ejecución de todas las operaciones que se realizan en él. Así, por ejemplo, partiendo de la expresión (11), podemos decir que la carga media, en horas estándar, originada en el CT k el periodo p , por un lote medio del ítem j , donde se realiza desde la operación n hasta la operación m de su ruta, será:

$$CARGA_{jkp} = \sum_{i=n}^m \overline{Tc_{ijk}} \times E_k \times U_k = \sum_{i=n}^m \overline{te_i} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_i} + \overline{tp_{ik}} \left(1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}} \right) \quad (12)$$

Según esta expresión, si una operación no se ejecuta en el CT k , el valor de Tc_{ijk} será cero.

2.3.2. CARGA DE UNA OPERACIÓN DISTRIBUIDA ENTRE VARIOS PERIODOS

Para un caso general en el que, durante el procesamiento de un lote de un ítem j , pueda originarse carga fraccionada al principio y al final del periodo, el inicio de un periodo p puede comenzar con la continuación de una operación que quedó sin finalizar en el periodo anterior ($n-1$), seguidamente se realizan desde la operación n a la m completamente, dejándose inconclusa la operación $m+1$. La ejecución de estas operaciones puede producirse en diferentes CT, por lo que la carga, en horas estándar, que se generará en un CT k se puede calcular como:

$$CARGA_{jkp} = f_{x_{n-1}/y_{n-1}} \times \overline{Tc_{n-1jk}} \times E_k \times U_k + \sum_{i=n}^m \overline{Tc_{ijk}} \times E_k \times U_k + f_{1/y_{m+1}} \times \overline{Tc_{m+1jk}} \times E_k \times U_k \quad (13)$$

Lógicamente, las operaciones $n-1$ y $m+1$, sólo generarán carga (aunque parcialmente), si se realizan en el CT k objeto de estudio. En otro caso, el valor de Tc_{n-1jk} y Tc_{m+1jk} será cero.

3. PROBABILIDAD DE CUMPLIMIENTO DEL PLAN DE CARGA

Tras lo visto, es obvio que para que se cumpla el Plan de Carga elaborado con la técnica CRP, es necesario que el valor de la carga asignada a un periodo sea el planificado y que, además, esté incluida en el periodo en el que la planificación lo ha colocado, en base al proceso de cálculo realizado. En los Apartados anteriores se ha reflejado la probabilidad de que se cumplan por separado estos requisitos considerando una serie de hipótesis,

pero para que el Plan de Carga sea correcto (y, por tanto, sea útil para la toma de decisiones), es preciso que se cumplan simultáneamente. Dado que el tiempo de carga forma parte del tiempo de suministro necesario para estimar el periodo al que se asigna, ambos aspectos están relacionados. Por ello, si se desea calcular la probabilidad de que se cumplan conjuntamente habrá que considerar que son dependientes. Es preciso calcular, por tanto, la probabilidad de la intersección:

$$P(\text{Cumpla carga} \cap \text{Cumpla periodo asignado}) = P(\text{Cumpla carga}) \times P(\text{cumplida la carga se cumpla también el periodo asignado}) \quad (14)$$

Según lo expresado en el Apartado anterior, la fórmula de cálculo de la probabilidad de cumplimiento de la carga puede complicarse en mayor o menor medida, en función del número de operaciones que se ejecuten en cada periodo y de si éstas quedan parcialmente realizadas o totalmente concluidas al finalizar el cubo de tiempo. Para el caso de que la carga para un lote de un ítem j que se origina en el CT k y en el periodo p , donde se han realizado totalmente desde la operación n a la m , la probabilidad de cumplimiento de la carga prevista será, basándonos en la expresión (12):

$$P(\text{Cumpla carga}_{jkp}) = P(\text{CARGA}_{jkp} = C_{jkp}) = P\left(\sum_{i=n}^m \left(\overline{te}_i \times \frac{\overline{Q}_j}{v_i} + \overline{tp}_{ik} \left(1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^I \lambda_{ik}}\right)\right)\right) = C_{jkp} \quad (15)$$

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 del tiempo de ejecución y, por tanto, de la carga incluida en un periodo determinado.

Con respecto al cumplimiento del periodo de asignación de la carga, hay que considerar que los desplazamientos de ésta se pueden originar por variación, no sólo de la carga asignada al CT que se está estudiando, sino que inciden en él todas las cargas que se producen en el periodo. En este sentido, si consideramos que se cumple la carga planificada de todos los CT, para el periodo p donde se ejecuta desde la operación n a m , estamos diciendo que:

$$\sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M Tc_{ijk} = \sum_{k=1}^M C_{jkp} \quad (16)$$

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, hay que tener en cuenta que el valor del tiempo de carga incluido en el tiempo de suministro debe venir dado en tiempo real, como el resto de los elementos que lo componen, habrá que dividir la carga incluida (en tiempo estándar) por los factores de eficiencia y utilización. Basándonos en la expresión (4), sustituyendo el valor de la carga por el indicado en la expresión (16), resulta:

$$P(\text{Una vez cumplida la carga se cumpla también el periodo asignado}) =$$

$$\begin{aligned}
 P(Tp - \overline{Td_{mj}} - \overline{Tcola_{m+1,jk}} \leq \sum_{i=n-1}^{m-1} \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} + \sum_{k=1}^M \frac{C_{jkp}}{E_k \times U_k} \leq Tp) = \\
 P(\sum_{i=n-1}^{m-1} \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} \leq Tp - \sum_{k=1}^M \frac{C_{jkp}}{E_k \times U_k}) - P(\sum_{i=n-1}^m \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=n}^{m+1} \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} \leq Tp - \sum_{k=1}^M \frac{C_{jkp}}{E_k \times U_k})
 \end{aligned} \tag{17}$$

Sustituyendo en la expresión (14) las fórmulas de cálculo indicadas en las expresiones (15) y (17), obtendremos la probabilidad de que se cumplan simultáneamente la planificación de la carga en cantidad y tiempo para el CT k y un periodo p :

$$\begin{aligned}
 P(\text{Cumpla carga} \cap \text{Cumpla periodo asignado}) = \\
 P(\sum_{i=n}^m (\overline{te_i} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_i} + \overline{tp_{ik}} (1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^I \lambda_{ik}})) = C_{jkp}) \times \\
 \times \left[P(\sum_{i=n-1}^{m-1} \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} \leq Tp - \sum_{k=1}^M \frac{C_{jkp}}{E_k \times U_k}) - P(\sum_{i=n-1}^m \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=n}^{m+1} \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} \leq Tp - \sum_{k=1}^M \frac{C_{jkp}}{E_k \times U_k}) \right]
 \end{aligned} \tag{22}$$

Se observa que la probabilidad de cumplimiento se ve afectada por variables que tienen un carácter aleatorio: el tiempo de carga de la operación (que como se vio anteriormente es resultado de la conjunción del tiempo de ejecución $[te_i]$ y preparación $[tp_{ik}]$, factor de aprovechamiento acumulado $[v_i]$, tasas de llegada $[\lambda_{ik}]$ de todas las operaciones que se ejecutan en el CT) y de los tiempos de cola $[Tcola_{ijk}]$ y desplazamiento $[Td_{ij}]$, tanto de las operaciones que generan la carga en el periodo como de la siguiente en su ruta.

Cuando se asigna a un mismo periodo la carga de operaciones total o parcialmente, el cálculo de la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga se complica, ya que inciden un mayor número de variables. Así, por ejemplo, para el caso de un periodo en el que el tiempo de carga sea la suma de:

- Tiempo necesario para la finalización de una operación $(n-1)$ comenzada en algún periodo anterior: $f_{x_{n-1}/y_{n-1}} \times \overline{Tc_{n-1,jk}} \times E_k \times U_k$
- Carga de las operaciones que se ejecutan totalmente: $\sum_{i=n}^m \overline{Tc_{ijk}} \times E_k \times U_k$
- Tiempo de carga preciso para el comienzo de una operación $(m+1)$ que será finalizada en periodos siguientes: $f_{l/y_{m+1}} \times \overline{Tc_{m+1,jk}} \times E_k \times U_k$

Basándonos en la expresión (13) y sustituyendo el valor del tiempo de carga por el indicado en la expresión (12), podemos reflejar la probabilidad de cumplimiento de la carga designada al periodo p (donde se realizan desde la operación $n-1$ a la $m+1$), en el CT k , como:

$$\begin{aligned}
 P(\text{Cumpla c arg } a_{jkp}) &= P(f_{x_{n-1}/y_{n-1}} \times \overline{Tc_{n-1jk}} \times E_k \times U_k + \sum_{i=n}^m \overline{Tc_{ijk}} \times E_k \times U_k + f_{y_{m+1}} \times \\
 &\times \overline{Tc_{m-1jk}} \times E_k \times U_k = C_{jkp}) = P(f_{x_{n-1}/y_{n-1}} \times (\overline{te_{n-1}} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_{n-1}} + \overline{tp_{n-1k}} (1 - \frac{\lambda_{n-1k}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})) + \\
 &+ \sum_{i=n}^m (\overline{te_i} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_i} + \overline{tp_{ik}} (1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})) + f_{y_{m+1}} \times (\overline{te_{m+1}} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_{m+1}} + \overline{tp_{m+1k}} (1 - \frac{\lambda_{m+1k}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})) = C_{jkp})
 \end{aligned} \quad (23)$$

Recordemos que el desplazamiento de la carga asignada aun CT puede ser originado por cargas que no se produzcan en él. Por esta razón nos interesa calcular la suma de las cargas que se producen, en un periodo p , en todos los CT:

$$\begin{aligned}
 &\sum_{k=1}^M (f_{x_{n-1}/y_{n-1}} \times \overline{Tc_{n-1jk}}) + \sum_{i=n-1}^m \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=n}^{m+1} \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} + \sum_{i=n}^m \sum_{k=1}^M \overline{Tc_{ijk}} + \\
 &+ \sum_{k=1}^M (f_{y_{m+1}} \times \overline{Tc_{m+1jk}}) = \sum_{k=1}^M C_{jkp}
 \end{aligned} \quad (24)$$

La probabilidad de que una vez cumplida la carga se cumpla también el periodo al que ha sido asignada será, basándonos en la expresión (7) y sustituyendo el valor de la carga total por la expresión (24):

$$\begin{aligned}
 &P(\text{Una vez cumplida la carga se cumpla también el periodo asignado}) = \\
 &P(\sum_{i=n-1}^m \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=n}^{m+1} \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} = Tp - \sum_{k=1}^M \frac{C_{jkp}}{E_k \times U_k})
 \end{aligned} \quad (25)$$

Por lo que la probabilidad de que se cumpla el Plan de Carga elaborado con la técnica CRP será, utilizando las expresiones (23) y (25):

$$\begin{aligned}
 &P(\text{Cumpla carga} \cap \text{Cumpla periodo asignado}) = \\
 &P(f_{x_{n-1}/y_{n-1}} \times (\overline{te_{n-1}} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_{n-1}} + \overline{tp_{n-1k}} (1 - \frac{\lambda_{n-1k}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})) + \sum_{i=n}^m (\overline{te_i} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_i} + \overline{tp_{ik}} (1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})) + f_{y_{m+1}} \times \\
 &\times (\overline{te_{m+1}} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_{m+1}} + \overline{tp_{m+1k}} (1 - \frac{\lambda_{m+1k}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})) = C_{jkp}) \times P(\sum_{i=n-1}^m \overline{Td_{ij}} + \sum_{i=n}^{m+1} \sum_{k=1}^M \overline{Tcola_{ijk}} = Tp - \sum_{k=1}^M \frac{C_{jkp}}{E_k \times U_k})
 \end{aligned} \quad (26)$$

Aun cuando con la expresión (26) ya se observa la dificultad de cumplimiento del Plan de Carga para el ítem j en el CT k para un determinado periodo, esta expresión puede desarrollarse aún más si analizamos el comportamiento de los tiempo de desplazamiento y de cola, que como ya nos hemos referido con anterioridad tienen un carácter aleatorio.

El tiempo de desplazamiento de los artículos de un CT al siguiente de su ruta o al almacén (Td_{ijk}), depende de las distancias entre centros, el tiempo necesario por unidad de distancia⁴⁹ y del número de mantenciones, siendo, estas últimas, calculadas para un tamaño medio de lote, ya que cuanto mayor sea éste, más viajes habrá que realizar para trasladarlo. Así, llamaremos m_{iQ_j} , al número de mantenciones necesarias para trasladar un lote emitido de Q_j , tras serle realizada la operación i , al CT siguiente o al almacén⁵⁰. El tiempo medio de desplazamiento de un lote de un tamaño Q_j , desde el CT k , donde se le ha ejecutado la operación i , hasta el siguiente CT en su ruta o hasta el almacén, se podrá calcular como:

$$\overline{Td_{ijk}} = \overline{td_{ijk}} \times d_i \times m_{iQ_j} \quad (27)$$

Donde:

$\overline{td_{ijk}}$ = tiempo medio de desplazamiento por unidad de distancia necesario para el traslado del ítem j desde el CT 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 CT 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.

m_{iQ_j} = el número de mantenciones necesarias para transportar un lote de tamaño Q_j , tras habersele realizado la operación i .

Para el caso de un solo canal, tasa media de llegada al CT k , distribuida según una función de Poisson⁵¹ de parámetro $\overline{\lambda}_k$ (calculado como la media del valor medio de las tasas de llegada de las operaciones) y cualquier tasa de servicio aleatoria con valor medio $\overline{\mu}_k$ (promedio de las tasas medias de salida, en horas reales, de las operaciones que se realizan en el CT k) y varianza σ_s^2 , el tiempo medio de espera en cola en un CT k , se calcula como:

⁴⁹ Dependerá de las características del ítem trasladado (peso, volumen, etc.) y del factor encargado del transporte (en configuraciones por lotes, los artículos suelen ser trasladados mediante elementos de transporte o directamente por el trabajador).

⁵⁰ El total de unidades que salen de un CT tras habersele realizado una operación, generalmente, no suelen coincidir a lo largo de su ruta (debido, por ejemplo, por el efecto del factor de defectuosas), el número de mantenciones puede variar para un mismo tamaño de lote a lo largo del proceso productivo.

⁵¹ Según 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.

$$\overline{Tcola}_{ijk} = \frac{\overline{\lambda}_k \times \sigma_s^2 + \frac{\overline{\lambda}_k}{2}}{\overline{\mu}_k} \times \frac{1}{2 \times (1 - \frac{\overline{\lambda}_k}{\overline{\mu}_k})} \quad (28)$$

El valor de $\overline{\mu}_k$ depende del tiempo de carga medio de los lotes que se procesan en el CT k , por lo que su valor en horas reales se calculará, considerando la expresión (2), de la siguiente manera:

$$\overline{\mu}_k = \frac{\sum_{i=1}^{I_k} I / Tc_{ijk}}{I_k} = \frac{E_k \times U_k \sum_{i=1}^{I_k} \frac{I}{te_i \times \frac{\overline{Q}_j}{v_i} + \overline{tp}_{ik} (1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})}}{I_k} \quad (29)$$

El tiempo de cola es el destinado a la espera para la entrada en un CT en el que se le debe realizar una operación concreta. Depende, por tanto, del CT donde se realice la operación⁵². Dado que el tiempo de cola depende únicamente del CT donde se realice la operación, para considerar el sumatorio de los tiempos de cola, definimos R_k como el conjunto de operaciones que se realizan en el CT k . Es decir:

$$\sum_{i=n}^{m+1} \sum_{k=l}^M \overline{Tcola}_{ijk} = \sum_{i=n \in R_k}^{m+1 \in R_k} \overline{Tcola}_{ijk}$$

Si sustituimos los valores del tiempo de desplazamiento (27) y del tiempo de cola [expresión (28) donde se ha sustituido el valor de $\overline{\mu}_k$ por la fórmula (29)], en la expresión (26), obtendremos que la probabilidad de cumplimiento del Plan de Carga para un ítem j será:

⁵² El tiempo que deberá esperar un lote de artículo j , que llegue al CT k , para que se le realice la operación i , dependerá de:

- El número de CT y máquinas 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 CT 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 CT con anterioridad.

$$P(f_{x_{n-1}/y_{n-1} n-1jk} \times (\overline{te_{n-1}} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_{n-1}} + \overline{tp_{n-1k}} (1 - \frac{\lambda_{n-1k}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})) + \sum_{i=n}^m (\overline{te_i} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_i} + \overline{tp_{ik}} (1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})) +$$

$$f_{l/y_{m+1} m+1jk} \times (\overline{te_{m+1}} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_{m+1}} + \overline{tp_{m+1k}} (1 - \frac{\lambda_{m+1k}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})) = C_{jkp} \times P(\sum_{i=n-1}^m (\overline{td_{ijk}} \times d_i \times m_{iQ_j})) +$$

$$\sum_{i=n \in R_k}^{m+1 \in R_k} \left[\overline{\lambda_k} \times \sigma_s^2 + \frac{\overline{\lambda_k}}{\left(E_k \times U_k \sum_{i=1}^{I_k} \frac{I}{\overline{te_i} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_i} + \overline{tp_{ik}} (1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})} \right)^2} \right] \times \left[\overline{\lambda_k} \times \sigma_s^2 + \frac{\overline{\lambda_k}}{\left(E_k \times U_k \sum_{i=1}^{I_k} \frac{I}{\overline{te_i} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_i} + \overline{tp_{ik}} (1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})} \right)^2} \right]$$

$$\times \left[2 \times I - \frac{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}}{E_k \times U_k \sum_{i=1}^{I_k} \frac{I}{\overline{te_i} \times \frac{\overline{Q_j}}{v_i} + \overline{tp_{ik}} (1 - \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{i=1}^{I_k} \lambda_{ik}})}} \right]$$

$$= Tp - \sum_{k=1}^M \frac{C_{jkp}}{E_k \times U_k}$$

Por último, cuando se consideran situaciones más complejas, ha de considerarse el cumplimiento por periodo de la carga planificada, no sólo en valor sino también en el tiempo, lo que implica la inclusión de un mayor número de variables, que hacen que la fiabilidad de la planificación sea aún menor. Además, se puede observar que una desviación, aunque sea pequeña, en algunas variables tendrá un efecto multiplicador en el resultado, ya que inciden en la probabilidad de cálculo por varias vías. En concreto éstas variables, con las que habrá que tener especial cuidado en su estimación, son las que componen el tiempo de carga de un lote: tiempo de ejecución [te_i], tiempo de preparación [tp_{ik}], tasa de llegada de cualquiera de las operaciones que se realicen en un CT [λ_{ik}], tamaño medio de lote [Q_j], factor aprovechamiento de cualquiera de las operaciones de la ruta [reflejado por v_i], así como de los factores de eficiencia [E_k] y utilización [U_k] del CT.

4. CONCLUSIONES

La escasa aplicación práctica de la técnica CRP, nos ha empujado a estudiar las causas que la provocan, yendo un poco más allá de los problemas de 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 (*Enterprise Resource Planning*). Nos hemos centrado en su utilidad para el establecimiento de un Plan de Carga que no presente excesivas desviaciones con respecto a la realidad, lo cual lo 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 (¿para qué tanto esfuerzo en poner en marcha una técnica compleja y costosa si no produce planes fiables?). Es por ello que hemos intentado formular analíticamente la probabilidad de que se cumpla el Plan de Carga generado por CRP, para lo que se han analizado por separado, las dos fuentes de variación de la capacidad necesaria planificada por esta técnica: diferencias con respecto al valor de la carga calculada y traslados de carga a periodos distintos del planificado.

Como indicador de la exactitud de este Plan de Carga, elaborado con CRP, se ha utilizado la probabilidad de cumplimiento de éste, para un lote determinado de un ítem, partiendo de la hipótesis de que para cada CT, en un periodo concreto solo se generará carga procedente de un único lote de dicho ítem. A través del cálculo teórico de esta probabilidad, hemos podido observar la gran cantidad de variables aleatorias que inciden en el resultado, cuya variabilidad es la principal causa del alto riesgo de incumplimiento del Plan de Carga calculado.

En un acercamiento inicial se ha estudiado la probabilidad de cumplimiento bajo la consideración de que todas las operaciones que originan carga en un periodo han comenzado y finalizado en él, para, posteriormente, considerar la posibilidad de que alguna operación quede inconclusa en un periodo. En este último caso las variables que inciden en la fiabilidad del Plan de Carga elaborado con CRP aumentan considerablemente y con ello el riesgo de incumplimiento de aquél. En términos generales, para un periodo intermedio, la probabilidad de cumplimiento está condicionada por las siguientes variables aleatorias:

- Tiempos de preparación y ejecución de las operaciones que se realicen en el periodo para el que se calcula la probabilidad.
- Tiempo de desplazamiento unitario de las operaciones que se ejecuten en el periodo 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 CT, para todas las operaciones que se realicen en el periodo.
- Factores de eficiencia y utilización de los CT implicados.
- Tamaño de lote medio considerado.
- Factor aprovechamiento de la operación que se realice en el periodo estudiado y de todas las operaciones posteriores, en su ruta de fabricación.
- Varianza de la tasa de salida de todos los CT que sean utilizados para la ejecución de las operaciones que originan carga en el periodo, y de la operación siguiente en su ruta.

De la fórmula de cálculo de la probabilidad se desprende además, que de todas estas variables aleatorias, aquellas que inciden en mayor medida son las que conforman el tiempo de carga, ya que afecta también al tiempo de cola.

Como ya hemos mencionado, 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 en el que fue asignada, aunque sí podría moverse dentro de él. El margen permitido depende del tiempo de desplazamiento y cola, no solo suscitados en el periodo objeto de estudio, sino también en el siguiente (puesto que no debe entrar carga de un periodo posterior). No obstante, la posibilidad de desplazamientos 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 una variable (tiempo de desplazamiento o cola), que no se vea compensado por otra, provocará un traslado de la carga a otro periodo.

No hay que olvidar que, si bien se han adoptado hipótesis simplificadoras, en las empresas de fabricación por lotes es habitual que en cada periodo, en un CT, coincidan cargas originadas por operaciones de distintos lotes de un mismo ítem o de otros ítems elaborados por la empresa. En tales casos sería necesario determinar 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 ello habrá que considerar los tres tipos de restricciones anteriormente descritas (periodo inicial, intermedio y final), para cada lote que componga el Plan de Materiales.

Por otro lado, sólo se ha analizado el cumplimiento del Plan de Carga para un periodo concreto, siendo 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. Este alto riesgo de incumplimiento complementado con la gran cantidad de datos y cálculos precisados⁵³, justifica que tantas empresas renuncien a su uso, centrándose en técnicas de Planificación de la Capacidad Aproximada, obteniendo de ellas la información sobre las sobrecargas o subcargas que se puedan generar, con objeto de prever las medidas de ajuste necesarias; información que, adecuadamente interpretada⁵⁴, 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*).

BIBLIOGRAFÍA

- ACKOFF, R. y SASIENI, M. (1971), "Fundamentos de Investigación de Operaciones", Limusa-Wiley, Mexico.
- BLACKSTONE, J. H., JR y (1989): "Capacity Management", South-Western Publishing, Cincinnati.
- 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. 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.
- COMPANYNS 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.
- DAVIS, M. , AQUILANO, N. y CHASE, R. (2001): "Fundamentos de dirección de operaciones", McGraw-Hill, Madrid.
- 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 (1990): "El Subsistema Productivo de la Empresa", Pirámide, Madrid.

⁵³ Proporcionales a la variedad de ítems que fabrique la empresa, número de CT que posea, número de operaciones distintas que se realicen y variabilidad de tamaño de lote para cada ítem.

⁵⁴ Ver Domínguez y otros (1995, pp. 107-114).

- DOMÍNGUEZ MACHUCA, J.A., y otros (1995): "Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios", McGraw-Hill, Madrid.
- EPPEN, G.D. y otros (2000): "Investigación de Operaciones en la ciencia administrativa", Pearson, México.
- 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*, vol. , nº 186 y 187, pp.111-120 y pp. 201-209.
- LANKFORD, R. (1990): "Capacity Management in Complex Production Environments", *Production & Inventory Management Review & Apics News*, Vol. 10, No. 5, pp. 40 - 43.
- 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.
- 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.
- WALLACE, T. y KREMZAR, M. (2001): "ERP: Making it Happen", John Wiley & Sons, New York.
- WEMMERLÖV, U. (1984): "Capacity Management Techniques. For Manufacturing Companies with MRP Systems", APICS, Cincinnati, Ohio.