

PLANIFICACIÓN JERÁRQUICA CON ANÁLISIS DE CARGA/CAPACIDAD

Tulio Gerardo Motoa G.*
Francisco Sastrón**

RESUMEN

La planificación jerárquica de múltiples proyectos, surge como una opción robusta y potente, para resolver el problema de gestión del sistema global. La propuesta se basa en la construcción de una estructura de descomposición-agregación de los proyectos y los recursos, con múltiples niveles, en la cual, los niveles más altos presentan los datos más agregados, con horizontes de tiempo más largos y los niveles inferiores son más detallados y con horizontes más cortos. Cada nivel tiene asociado un modelo conformado por

* Msc. Profesor Titular de la Universidad del Valle. Director de la Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística.

** Ph.D. Profesor Universidad Politécnica de Madrid - España.

entidades y sus atributos y un problema de toma de decisiones. A diferencia de la arquitectura de un solo nivel, en este caso los niveles permanecen y se emplean continuamente tanto para revisar las decisiones propias a cada uno de ellos, como las heredadas de niveles superiores, generando un ambiente de continua retroalimentación. Dentro del ámbito de la planificación jerárquica, el análisis de carga/capacidad pretende fundamentalmente mejorar la relación entre la oferta y demanda de recursos en los procesos de planificación de proyectos, de tal manera que se garantice el cumplimiento de las fechas ya establecidas. Este análisis, se implementa midiendo algunos indicadores que reflejan el estado de la relación entre la carga y la capacidad y ejecutando un procedimiento de nivelación que avanza en el equilibrio de tal estado. El procedimiento de análisis se ha experimentado mediante un conjunto de proyectos generados aleatoriamente y los resultados son bastante buenos.

ABSTRACT

Multiple-project hierarchical planning is a powerful and robust approach to solve the global system planning problem. This proposal is based on a decomposition-aggregation structure of projects and resources having multiple levels, where the higher levels contain more aggregated data with longer time horizons, while the lower levels contain more detailed data and shorter time horizons. Each level has a model composed by entities and attributes, and a decision making problem. The difference between this approach and the single-level architecture is that in the former not only are all levels used for making decisions within the same level, but they are also used for making inherited decisions from higher levels, generating a continuous feedback process. Additionally, under the hierarchical planning approach, the load-capacity analysis looks for improving the offer and demand of resources

so that the specified due dates can be satisfied. This analysis is implemented by measuring some indicators that reflect the state of the load/capacity relationships, and by executing a leveling procedure to achieve the load/capacity balance. We have performed several experiments using a set of randomly-generated projects and obtained good results.

INTRODUCCIÓN

El problema de planificación de múltiples proyectos se ha tratado en general, implantando los modelos de planificación para un solo proyecto (mononivel y monolíticos), caracterizados por un nivel único de toma de decisiones y estado de los datos. En los modelos de un solo nivel, las etapas de planificación (presupuestación, preparación y programación y encaje), y las fases de ejecución y control, se suceden una a la otra reemplazándose sucesivamente e incrementándose tanto el número de variables y parámetros como el refinamiento de los datos. Una etapa genera parámetros que luego son considerados en la siguiente etapa, pero no se regresa a la etapa anterior en cuanto se detectan conflictos entre los parámetros heredados y los criterios, intereses y datos de la etapa actual. Estos conflictos suelen resolverse en la etapa activa, desconociendo los objetivos y modelo de toma de decisiones que motivaron los parámetros del conflicto. De esta manera se pierde mucho de la visión y criterios propios a cada etapa, empobreciéndose el sistema total. Por otra parte, cada modelo de toma de decisiones para cada una de las etapas se trabaja monolíticamente, es decir, considerando todas las variables, parámetros y restricciones. Ello genera una complejidad tal, que finalmente obliga a la formulación de modelos que suelen resultar muy limitados, ya sea por los resultados obtenidos o por la demanda en recursos de computación para su solución.

En la práctica, las organizaciones que trabajan

con ambientes de múltiples proyectos, han optado por estructurar la planificación en dos niveles [Yang y Sum, 1997]. En particular, el nivel superior está asociado a la presupuestación, encaje y control del avance de los proyectos (administración del proyecto), y el nivel inferior se ocupa básicamente de la preparación, programación y ejecución de los mismos (más orientado a la administración de los recursos). Sin embargo, suele darse muy poca integración entre estos niveles, no sólo en cuanto a los criterios de valoración de los planes sino también en lo relacionado con los datos de las entidades y atributos del sistema (proyectos y recursos), y otras variables y restricciones tales como el tiempo y la capacidad. En consecuencia, suelen generarse muchos conflictos entre los dos niveles que limitan el éxito de la planificación de cada uno de los proyectos en particular y del sistema en general.

Sobre la base de los elementos anteriores, se propone un *sistema de planificación jerárquico de múltiples proyectos*, caracterizado por una estructura de descomposición-agregación de los proyectos y los recursos, con múltiples niveles, en la cual los niveles más altos presentan los datos más agregados, con horizontes de tiempo más largos y consecuentemente, los niveles inferiores son más detallados y con horizontes más cortos. Cada nivel tiene un modelo conformado por entidades y sus atributos y un problema de toma de decisiones. A diferencia de la arquitectura de un solo nivel, en este caso los niveles permanecen y se emplean continuamente para revisar las decisiones propias a cada uno de ellos. Cada nivel refleja el estado del sistema de acuerdo con unas condiciones de descomposición-agregación, incluyendo todos los proyectos que se encuentran circulando en el mismo. El modelo identifica un sistema global de planificación y subsistemas individuales de planificación para cada uno de los proyectos.

A continuación se presenta una definición del Proyecto, posteriormente se plantea el modelo de planificación propuesto, enseguida se resume la experimentación llevada a cabo para su valoración y se establecen unas conclusiones.

EL PROBLEMA

En la idea de plantear un modelo generalizado para el PROBLEMA DE PLANIFICACIÓN DE MÚLTIPLES PROYECTOS (PPMP), se reconocen en el sistema un conjunto de proyectos P y un conjunto de recursos R . El conjunto P , está conformado por un grupo de proyectos PR_j ($j=1, \dots, L$), en fases diferentes de su ciclo de vida. El conjunto R , que comprende la base de recursos del sistema, está a su vez constituido por los recursos renovables RE_k ($k=1, \dots, M$). En el nivel superior los proyectos y los recursos tienen un grado de tratamiento agregado en correspondencia con el manejo agregado del tiempo, expresado como un horizonte T_H , tratado en forma de P períodos ($P=1, \dots, S$). Cada proyecto $PR_j \in P$, tiene una duración $D_{ij} \in Z_{\geq 0}$, y un tiempo de empezar $ST_{ij} \in Z_{\geq 0}$ y los recursos tienen una disponibilidad constante por período de $CP_{kp} \in Z_{\geq 0}$.

En el nivel inferior se tienen proyectos conformados por ac_{ij} , actividades ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, L$, dado que $j=J$), más las actividades de inicio y final del proyecto (ac_{0j} y $ac_{n+1,j}$). Cada ac_{ij} , tiene asociados modos de ejecutarse, con sus correspondientes consumos uniformes de recursos $w_{kij} \in Z_{\geq 0}$, una duración $d_{ij} \in Z_{\geq 0}$, y un tiempo de empezar $st_{ij} \in Z_{\geq 0}$. El horizonte $t_h \subseteq T_H$ se trata en forma de p períodos ($p=1, \dots, s$), y los recursos re_k ($k=1, \dots, m$), tienen una disponibilidad constante por período de $cp_{kp} \in Z_{\geq 0}$. En particular, cada uno de los $RE_k \in R$ está conformado por un grupo de los re_k del nivel inferior.

Se pueden identificar cuatro grandes decisiones asociadas a los proyectos: *definición de la fecha de entrega, asignación de recursos a los proyectos, fecha de lanzamiento del proyecto y programación de las actividades del proyecto*, las cuales pueden ser tratadas con diferentes objetivos y criterios.

El proceso completo de toma de decisiones, se resuelve mediante las relaciones *objetivo-criterio-restricción*. Estas relaciones han sido trabajadas académicamente en forma muy intensa con relación al problema de programación de las actividades (nivel inferior, ([Baker, 1974], [French, 1990], [Morton y Pentico, 1993])), y muchísimo menos en la problemática asociada a los proyectos en su conjunto ([Yang y Sum, 1997]. Los objetivos pueden fijarse como objetivos operativos, asociados a la productividad, o como objetivos de mercado, asociados con el servicio al cliente. Los objetivos operativos se miden mediante criterios que señalan el tiempo en que tardan en completarse los proyectos, (F_{max} , F_{med} , C_{max} y C_{med}). También se utilizan los indicadores asociados a la cantidad de obra en curso, (N_{max} y N_{med}). Por su parte, los objetivos orientados al mercado son trabajados con criterios tales como (L_{max} , L_{med} , T_{max} , T_{med} y n_i). Todos tratados como una función de minimizar. Los criterios o indicadores, pueden ser o no regulares con respecto a los tiempos de finalización de los proyectos. Entre los criterios no-regulares se destacan los asociados al problema de nivelación y al problema del valor presente neto ([Neumann y Zimmermann, 1998]).

De acuerdo con lo que hasta ahora se ha definido con relación a los proyectos, sus actividades de nivel superior e inferior, y con los recursos tratados igualmente en ambos niveles del PPMP, se puede decir que:

$$Ac_{0j} = ST_j \quad (1)$$

Consecuencia de la decisión asociada al

lanzamiento del proyecto.

$$Ac_{n+1,j} \leq DD_j \quad (2)$$

Indica que el proyecto debe finalizar hasta el tiempo convenido como máximo para su entrega. Una secuencia $sec = (st_{0j}, st_{1j}, \dots, st_{n+1,j})$ de tiempos de empezar enteros, la cual satisface las restricciones temporales (1) y (2), es llamada un programa de factibilidad temporal (time-feasible).

Para un problema de programación de múltiples proyectos de tiempo restringido (relajando las restricciones de recursos), el programa encontrado debe ser factible con relación a las restricciones temporales impuestas, como las expresadas en (1) y (2), además de aquellas relacionadas con las ventanas de tiempo (SF, SS, FS, FF), ([Neumann y Zimmermann, 1998], [Zimmermann y Neumann, 1997]). En este tipo de programas, es usual que los requerimientos de recursos excedan las disponibilidades, por lo tanto se requiere un esfuerzo para eliminar la sobredemanda ya sea mediante un proceso de nivelación, incrementando la disponibilidad de recursos o subcontratando parte del trabajo [Harhalakis, 1989]. El otro caso es aquel en el cual se consideran tanto las restricciones temporales como las impuestas a los recursos, conformando lo que se conoce como el problema de programación de proyectos con recursos limitados o restringidos, ya bastante estudiado ([Alvares-Valdes y Tamarit, 1989], [Baker, 1974], [Boctor, 1996], [Daniels, 1989], [Davis, 1973], [Davis y Patterson, 1975], [Kolish y Hartmann, 1998], [Kurtulus y Davis, 1982], [Lawrence y Morton, 1993], entre muchos otros).

En conclusión el problema se caracteriza por:

1. Un ambiente dinámico de múltiples proyectos, en fases diferentes de desarrollo, que se sirven de una base de recursos común.
2. Un proceso completo de decisiones que comprende *definición de la fecha de entrega, asignación de recursos y fecha de*

lanzamiento de cada uno de los proyectos y programación de cada una de sus actividades, (constituyen el problema a resolver).

- 3.No se permite interrupción de las actividades de los proyectos (preempting), ni división (splitting) de las mismas. Igualmente ocurre con los proyectos como un todo.
- 4.El consumo de recursos por parte de las actividades es constante y su duración es conocida. Los recursos son renovables y se ofrecen en cantidades constantes.

EL SISTEMA JERÁRQUICO DE PLANIFICACIÓN

La propuesta de planificación jerárquica de la fabricación, (*Hierarchical Production Planning*, [Meal, 1984], es una respuesta a los modelos monolíticos. Como tal, descompone el problema global en subproblemas que corresponden a diferentes niveles jerárquicos, los cuales se resuelven secuencialmente siguiendo un orden de arriba-abajo ([Harhalakis y otros, 1992], [Mehra y otros, 1994]). La jerarquía se construye a partir del tratamiento del tiempo, estados, información y criterios de evaluación. Igualmente se establecen relaciones de interdependencia entre los niveles, expresadas como anticipación, instrucción y reacción ([Scheneeweib, 1995].

Las ideas de planificación jerarquizada no son nuevas en el mundo de la fabricación. Sin embargo, sí lo son relativamente en el mundo de la fabricación por proyectos. Son muy pocos los trabajos que explícitamente refieren un modelo de planificación jerárquica para los ambientes de múltiples proyectos ([Dean y otros, 1992], [Kurtulus y Davis, 1982], [Martínez y otros, 1997], [Serafini y Speranza, 1994], [Speranza y Vercellis, 1993], [Yang y Sum, 1997]). La investigación en este tipo de fabricación ha estado muy circunscrita a los ambientes de un solo proyecto y en estos ambientes la necesidad de una jerarquización de la planificación no es tan evidente.

Planificación Integrada con Niveles de Refinamiento

El sistema jerárquico propuesto considera diferentes niveles de decisión asociados a la problemática general de la planificación. La jerarquía se estructura a partir de tres niveles, cada uno de ellos con estados de tiempo e información y objetivos diferentes. Un primer nivel de planificación asociado a decidir cuándo ubicar el proyecto de acuerdo con el estado de los recursos y las condiciones pactadas con el cliente como fechas de entrega, duración y costo. Se destaca que ya en este nivel las decisiones de planificación implican presupuestar, preparar, programar y encajar los proyectos de acuerdo con el estado del sistema y las condiciones pactadas ya mencionadas. De aquí surgen instrucciones para los niveles inferiores en términos, por ejemplo, de restricciones en tiempo o reasignación de recursos. En el segundo nivel, las decisiones de planificación se toman enmarcadas dentro de las decisiones tomadas en el primer nivel y pretenden estructurar el proyecto en función de actividades que se deben ubicar en el tiempo, de acuerdo con el estado de los recursos, observados ya con mayor grado de descomposición o desagregación que en el primer nivel. Es posible que en la planificación de este nivel surjan contradicciones con decisiones tomadas en el primer nivel que lleven a revisarlas volviendo al nivel superior, y si es el caso modificarlas (reacciones al primer nivel). Pueden surgir también en este nivel de planificación, aspectos no considerados en la planificación del primer nivel y que valga la pena observarlos desde la perspectiva del nivel superior (anticipación). El tercer nivel lleva a tratar las operaciones de los proyectos, ubicándolas en el tiempo, de acuerdo con las decisiones ya tomadas en los niveles superiores y obviamente considerando el estado de los recursos, mirados al nivel de puesto de trabajo. Igual que en el nivel anterior, es posible que aparezcan situaciones

no previstas consideradas en los niveles superiores y que obliguen a volver a los mismos para reintentar ajustar decisiones ya tomadas (figura 1)

Esta propuesta jerárquica considera las diferentes restricciones potenciales (tecnológicas y temporales) y acumulativas (de recursos), en cada uno de los niveles de planificación. Así, se construye un plan para todo el sistema (que incluye los programas respectivos sin considerar las restricciones en los recursos) y entonces se revisan las restricciones acumulativas mediante un análisis de carga/capacidad, que hace parte del modelo de toma de decisiones de cada nivel. Poder considerar todas las restricciones sin que ello implique ambientes de decisión muy complejos, es una gran diferencia con los enfoques de planificación monolíticos.

Descomposición - Agregación por Niveles

Los proyectos y los recursos se agregan y descomponen generando una integración vertical mediante la cual se pueden anticipar los efectos de las decisiones del nivel superior sobre el nivel inferior [Schneeweß, 1995]. De esta manera se manejan los proyectos en el primer nivel de la manera más agregada (proyectos), en el segundo nivel como actividades (conjuntos de operaciones) y en el tercer nivel como operaciones. Por otra parte, los recursos se manejan como talleres (conjuntos de gremios o centros de trabajo) en el primer nivel, gremios (conjuntos de puestos de trabajo) en el segundo nivel, y puestos de trabajo en nivel inferior. La gran dificultad en este planteamiento es definir los criterios de descomposición-agregación de los proyectos y las actividades. Previa a la tarea de estimar la duración de un proyecto o actividad, está la definición de la estructura misma de agregación y desagregación. Debe establecerse cuántas actividades y cuáles componen un proyecto, y a su vez cuántas y

cuáles operaciones integran una actividad. Existe una herramienta válida al respecto consistente en la técnica de desagregación del trabajo (Work Breakdown Structure, [Decrko y otros, 1992]), utilizada en este modelo.

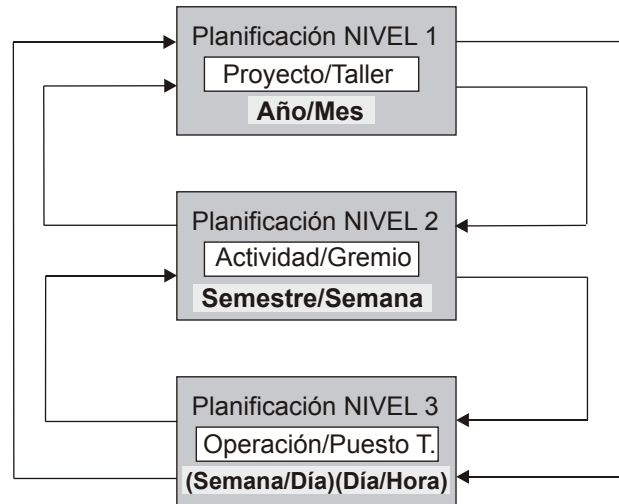


Figura 1. Sistema Gerárquico de Planificación en tres niveles

En definitiva, el nivel 1, pretende desarrollar una planificación agregada del ambiente de múltiples proyectos. Los proyectos se presentan en su máximo nivel de agregación, demandando recursos que se expresan como talleres. Un análisis del estado de carga/capacidad en este nivel, se elabora con un horizonte anual y períodos de revisión (cubos de tiempo) mensual. El criterio propio a este nivel se propone asociado al perfil de la oferta y demanda de recursos (carga/capacidad) y con él se busca poder valorar el lanzamiento de los proyectos a los talleres, considerando no sólo las fechas de entrega sino además el estado de ocupación o desocupación de los recursos.

En el nivel 2, la planificación aproximada parte de presentar los proyectos mediante actividades y los recursos en forma de gremios. Se puede trabajar con horizontes anuales o semestrales, de revisión semanal. El criterio de evaluación también está asociado al perfil de

la relación carga/capacidad y con él se pretende soportar decisiones que permitan determinar las fechas de empezar y terminar de las actividades, mediante decisiones que mejoren la distribución de la carga a lo largo del tiempo y resolver estados de no-factibilidad de los planes y programas (mayor demanda que oferta de recursos en un período).

En el nivel 3, la planificación detallada busca tomar decisiones de fecha de empezar de las operaciones, a partir de la asignación de recursos y de secuenciar las operaciones en los mismos, sobre la base de criterios asociados al tiempo y al costo. Los proyectos se muestran a nivel operaciones y los recursos, como puestos de trabajo. Se trabaja con un horizonte semanal (o quincenal inclusive) y períodos de revisión diarios.

En sí misma, una estructura jerárquica de planificación tiene una evidente relación con los niveles en los que usualmente se toman las decisiones en proyectos de relativa envergadura. Los niveles más altos de dirección requieren usualmente sólo información agregada para la planificación y el control estratégico, mientras que los niveles operativos necesitan información detallada para el trabajo del día a día. Los sistemas de planificación de un solo nivel no pueden atender simultáneamente los requerimientos de información de los diferentes estratos de toma de decisiones; lo que claramente se constituye en una de sus grandes limitaciones. Si se mantiene un nivel alto de agregación, se corre un enorme riesgo de pérdida de información importante. Si el nivel de detalle es considerable, se podría fácilmente llegar a tal congestión de datos, que los proyectos terminan asfixiando a los planificadores, perdiéndose el control de los mismos.

En la planificación jerárquica se buscan soluciones estratégicas a problemas

estratégicos, soluciones tácticas a problemas tácticos y soluciones operativas a problemas operativos. Lo otro es intentar resolver toda la problemática de planificación cuando se tiene el nivel de detalle operativo y consecuentemente buscar soluciones operativas para todo el problema. Esto quiere decir que, si por ejemplo, el problema de limitación de recursos se trata desde un principio, tomando todas aquellas decisiones que sean necesarias para resolver aquellos conflictos de carga/capacidad que se vayan detectando en los diferentes niveles de descomposición-agregación de los proyectos y sus recursos, en los también diferentes horizontes de tiempo, entonces al final se tendrán problemas de programación al nivel operativo (el mayor nivel de detalle), factibles de ser resueltos con decisiones operativas (utilización de equipos o máquinas alternativas, horas extras, etc.). Lo contrario significa que al final en lo operativo, se tienen tal cantidad de conflictos entre la demanda de recursos y la oferta de los mismos en un período específico, que las armas operativas disponibles en ese nivel no serán útiles para resolverlos y por lo tanto la consecuencia lógica es un mayor retraso en los proyectos con relación a la fecha de finalización originalmente propuesta ([Elmaghraby, 1977], [Elmaghraby, 1995]).

De acuerdo con lo anterior, el modelo se caracteriza por tener como punto de partida los cálculos CPM, una función objetivo no-regular y seguir un tratamiento jerárquico de la planificación. El algoritmo general para implementar la propuesta es:

1. Ubicar el proyecto de acuerdo con su importancia (peso o prioridad), fecha de entrega y estado de los recursos (análisis de carga/capacidad para el nivel 1). Se usan datos al nivel de fase conceptual o inclusive comercial, en el ciclo de vida del proyecto. Es decir, datos todavía muy poco elaborados.

2. Descomponer el proyecto a nivel 2 (actividades). Ubicar las actividades en el tiempo, a partir de sus tiempos más tempranos, calculados mediante CPM. Ejecutar el análisis de carga/capacidad para el nivel 2 y resolver todos aquellos conflictos de carga/capacidad que sea posible. Volver al nivel 1 y revisar de nuevo el nivel con los datos ya conseguidos en el nivel 2, expresados de manera agregada.
3. Descomponer el proyecto a nivel 3 (operaciones). Ubicar las operaciones en los tiempos derivados de los cálculos del nivel 2. Ejecutar un análisis de carga/capacidad para el nivel 3 y resolver todos aquellos conflictos de carga/capacidad que sea posible. Volver al nivel 2 y revisar de nuevo el nivel con los datos ya conseguidos en el nivel 3, expresados de manera agregada.
4. Mantener el ciclo de descomposición-agregación en los tres niveles, hasta encontrar un plan factible para todo el sistema o hasta encontrar programas no factibles para el nivel 3, de una relativa fácil solución, mediante medidas operativas (horas extras, reasignación de recursos, etc.), o inclusive mediante la utilización de algoritmos de programación con recursos limitados, pero ya con una seria expectativa de que los resultados finales presentarán retrasos menores frente a los cálculos CPM, comparados contra los retrasos que se podrían dar sin la implementación de un sistema de planificación jerárquica con análisis de carga/capacidad por nivel.

El Análisis de Carga/Capacidad

El análisis de carga/capacidad se fundamenta en la definición de un ESTADO DE LA CARGA/CAPACIDAD (ECC) y en un algoritmo de implementación. El ECC es definido mediante tres indicadores: el Indicador de Estados de No-Factibilidad (INF), el Indicador de Recurso Ocioso (IRO) y el Factor de Utilización Promedio de los recursos (AUF).

El *indicador de no-factibilidad* para cada recurso k (INF_k), podría de una manera inmediata ser definido como la suma de los indicadores de no-factibilidad para cada período p (INF_{kp}), el cual, a su vez, es igual a la sumatoria desde el momento inicial del período p (ti), hasta el momento final del mismo, (tf), de las cantidades en que la carga (cg_{kpt}) supera a la capacidad (cp_{kpt}), en cada uno de los momentos t del período p ($p=1,2,\dots,s$), para el recurso k ($k=1,2,\dots,m$).

$$INF_k = \sum_{p=1}^s INF_{kp} = \sum_{p=1}^s \sum_{t=ti}^{tf} (cg_{kpt} - cp_{kpt})^+ \quad (3)$$

El INF para todo el sistema es igual a la sumatoria de los INF_k para todo k . Evidentemente el indicador tendrá mejor significado en cuanto más se acerca a cero. Este indicador corresponde a la función objetivo propuesta en [Neumann y Zimmermann, 1998] y [Zimmermann y Neumann, 1997], relacionada con la desviación del consumo del recurso k frente a una cantidad dada del mismo, tomando en cuenta las sobredemandas, y por otros investigadores tales como [Easa, 1989] y [Harhalakis, 1989]. Su importancia es indiscutible en el PMP y es mucho el esfuerzo que se hace para llevarlo a cero.

El *Indicador de Recurso Ocioso* para el recurso k (IRO_k), es igual a la diferencia entre la capacidad y la carga a que está sometido un recurso, cuando esta diferencia es positiva. El IRO para el sistema se calcula sumando los IRO_k para todo k , y este último se define como:

$$IRO_k = \sum_{p=1}^s IRO_{kp} = \sum_{p=1}^s \sum_{t=ti}^{tf} (cp_{kpt} - cg_{kpt})^+ \quad (4)$$

Por otra parte, el *Factor de Utilización* del recurso k (UF_k), se define como la carga total a la que está sometido el recurso k durante todo el horizonte de trabajo (s períodos), (cg_k), dividido por la capacidad del recurso en idéntico horizonte (cp_k).

$$UF_k = \frac{cg_k}{cp_k} \quad (5)$$

La definición del UF_k permite introducir el *Factor de Utilización Promedio* (AUF), muy útil para observar globalmente el estado de los recursos en cuanto a su utilización, tal como se ha definido. El (AUF), se calcula para todo el sistema mediante la fórmula siguiente:

$$AUF = (\sum_{k=1}^m UF_k) / m \quad (6)$$

Con estas tres medidas, (INF, IRO, AUF), se podría fácilmente establecer el estado de la carga con relación a la capacidad y consecuentemente establecer alternativas de solución a los problemas que se puedan detectar, planteadas desde los diferentes niveles propuestos. En general un estado de carga/capacidad, puede presentar situaciones para cada uno de los niveles, que se deben reflejar en las tres medidas anteriores.

Estos indicadores tienen algún grado de relación con parámetros o, mejor aún, con características de las redes de proyectos, estudiadas por diferentes investigadores, con el ánimo de caracterizar los escenarios en los cuales las propuestas heurísticas de solución al problema de programación de proyectos con recursos limitados, se ejecutan mejor o peor ([Patterson, 1976], [Kurtulus y Davis, 1982], [Kurtulus y Narula, 1985], [Ulosoy y Özdamar, 1994]).

El algoritmo de análisis de carga/capacidad se estructura de acuerdo con los tres niveles propuestos. Para el nivel 1, el algoritmo se apoya en un ensayo y error que permita encontrar posiciones de los proyectos (determinación de sus ST_{ij}), de acuerdo con el ECC. Es decir, para proyectos nuevos aún no programados y para proyectos programados pero no comenzados, definir o redefinir el ST_{ij} de manera que el INF y el IRO para todo el sistema, se hagan iguales a cero o se reduzcan a los menores valores posibles.

Para el nivel 2, el análisis se ejecuta en dos

etapas. Primero se identifica un período y un recurso cuyo INF_{kp} sea diferente de cero, y posteriormente se ejecuta un análisis de carga y un análisis de capacidad, secuencialmente. Con el análisis de carga, se pretende estudiar para el problema en el cual $INF_{kp} \neq 0$ (no-factibilidad), soluciones basadas en el retraso de las actividades que cargan el recurso de interés en el período de interés. Este análisis se apoya en un estudio de los posibles efectos temporales sobre el proyecto, del movimiento de las actividades no-críticas en sus holguras. Las actividades se mueven siguiendo un orden establecido mediante Reglas de Prioridad (RP), en cada uno de los grupos de actividades generados por el análisis previo de efectos temporales.

Las RP son fundamentalmente reglas de despacho que permiten fijar un valor asociado a cada actividad, definido como el *Indicador de Toma de Decisión de la Actividad* ij , (ITD_{ij}). Los ITD_{ij} permiten clasificar las actividades en un orden específico al cual se ha denominado Lista de Llamada. Las RP pueden ser muy diversas y pueden proponerse ya sea con relación al tiempo (por ejemplo, duración de las actividades, holguras de las mismas, etc.), al consumo de recursos o a otros parámetros como peso/importancia, costo, etc. (ver [Alvarez-Valdés y Tamarit, 1989], [Baker, 1974], [Kolish y Hartman, 1998], [Kolish y Padman, 1997], [Lawrence y Morton, 1993], [Özdamar y Ulosoy, 1995], entre otros). En principio se proponen como reglas de prioridad a evaluar cuatro reglas miopes o locales y dos globales. Las cuatro reglas locales se apoyan en la actividad ij ($i=1,2,...,n$; $j=1,2,...,l$) directamente. Las dos reglas globales determinan la importancia de la actividad ij incluyendo sus sucesoras.

Las reglas locales son:

RP1 (cpr_{kpj} consumo del recurso k de la actividad ij en el período p ($p=1,...,s$))

RP2 (ctr_{kij} consumo total del recurso k de la actividad ij).

RP3 (CPR_{pij} consumo de todos los recursos por la actividad ij en el período p).

RP4 (CTR_{ij} consumo total de todos los recursos por la actividad ij).

En cuanto a las dos *reglas globales* de prioridad, consideran para la toma de decisión, no sólo a la actividad de interés sino, además, a todas sus sucesoras. De tal forma que es posible definir una regla RP5 ($ctr_{s_{kij}}$), que establece la prioridad a partir del consumo total del recurso k bajo análisis, por la actividad en consideración y todas sus sucesoras, y otra regla RP6 ($CTRS_{ij}$), mediante la cual la prioridad se define como el consumo total de todos los recursos, por la actividad ij y sus sucesoras.

Terminado el análisis de carga, se ejecuta el análisis de capacidad, que pretende enriquecer al usuario con más posibilidades en cuanto a resolver el estado de no-factibilidad bajo consideración. Este análisis produce información sobre la posibilidad de resolver el estado de no-factibilidad actuando directamente sobre la capacidad, ya sea incrementando la misma mediante horas extras, turnos adicionales y contratación y despido, o utilizando capacidades externas subcontratando algunas de las actividades en el período de interés. Este análisis se basa en un sencillo modelo matemático entero binario mixto, que busca encontrar la mejor combinación entre las alternativas posibles para modificar la capacidad, teniendo como función objetivo la minimización del coste de la ampliación de la capacidad necesaria para resolver el INF_{kp} en cuestión.

El análisis de carga/capacidad del nivel 3, está implícito en lo llamado académicamente Programación de Proyectos con Recursos

Limitados. Dada la gran cantidad de trabajos elaborados en este sentido no vale insistir en el mismo (referencias ya señaladas). Tal vez sí sea necesario resaltar la idea de que si en los niveles 1 y 2 se han llevado a cabo análisis de carga/capacidad válidos, ya sea suavizando el perfil de carga o fundamentalmente, resolviendo los estados de no-factibilidad, ya sea por nivelación o por un incremento en los recursos, el trabajo de asignación y secuenciación propios a este nivel en términos de fijar las fechas de empezar de las operaciones será mucho menos complejo, y sobre todo, menos causante de retrasos en los proyectos.

EXPERIMENTACIÓN

En razón de valorar adecuadamente el modelo propuesto, se desarrolló un prototipo informático. El prototipo se basa fundamentalmente en el paquete de software Microsoft Project 98 de Microsoft Corporation (MS-Project), para aquellas funciones típicas a la gestión de proyectos asistida por computador, y una aplicación adicional para el análisis de carga/capacidad. Esta última, desarrollada en Visual Basic 6.0, parte de la información capturada a través de MS-Project y de los resultados de sus cálculos de tiempos CPM, y está constituida por tableros de planificación para los niveles 1 y 2, más algunas ayudas del tipo gráfico, además de la implementación de los algoritmos de análisis de la carga y de la capacidad para el nivel 2, que permiten su ejecución automática. Para el nivel 1, permite implementar las decisiones que se hayan tomado a partir del análisis de carga/capacidad para este nivel. El nivel no se ha implementado y hace parte de los futuros desarrollos de la herramienta.

En función de explorar las bondades del sistema de planificación propuesto, se diseñó e implementó un experimento factorial completo ([Kurtulus y Davis, 1982], [Kurtulus y Narula, 1985], [Lawrence y Morton, 1993],

[Ulusoy y Özdamar, 1994]. El esfuerzo de identificar los parámetros para estudiar el comportamiento de la propuesta, lleva a escoger tres para la construcción de los experimentos. El primer parámetro es la *Complejidad (C)*, medida como la razón entre el número de arcos y el número de nodos (redes AoN). *C*, ha sido señalada como determinante en el rendimiento de muchos de los heurísticos propuestos para resolver el problema de programación de proyectos ([Kurtulus y Davis, 1982], [Kurtulus y Narula, 1985], [Demeulemeester y otros, 1993]). En este estudio se reconocen tres valores para *C* (1.3, 1.54 y 1.74). Un parámetro muy lógico para el caso que nos ocupa es el *Factor de Utilización Promedio (AUF)*. Para el experimento se trabajan como valores de AUF: (0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 y 1.6). El tercer parámetro (Estado (*E#*)) está asociado a la ubicación de los proyectos con relación a su St_j . El *E1*, corresponde a todos los proyectos ubicados en su Tiempo Más Temprano de Empezar (*EST*), el *E2* y *E3*, resultan de mover los proyectos de acuerdo con su importancia y holgura con relación a la *DD_j*.

Para la generación de las redes de actividades de los proyectos se utilizó un generador de proyectos, fuertemente aleatorio, programado en el Grupo CIM de DISAM, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid (España), a partir de un generador aleatorio de redes de actividades [Demeulemeester y otros, 1993]. Para cada proyecto se determina aleatoriamente el número de actividades en el rango [24, 60], las d_{ij} [1, 10], y el w_{kij} [0, 10], con tres recursos por actividad. Igualmente se establece su peso o importancia (*IP*), [1, 6], su EST_j y el tamaño de la holgura (*HolPro*), que aplicada a la fecha más temprana de finalizar (EFT_j), permite establecer la *DD_j*.

Para la experimentación se generaron 54 proyectos, con los cuales se construyeron

cinco grupos de 9 proyectos. Con cada grupo se formularon 54 problemas producto de la combinación exhaustiva de la *C*, el AUF y el *E#*, para un total de 270 problemas. Cada problema se resuelve con cada una de las 6 reglas de prioridad, por lo que finalmente se tienen 1.620 experimentos.

En la tabla 1, se muestran los resultados de aplicar los algoritmos de carga/capacidad para los niveles 1 y 2, en uno de los 5 grupos de problemas (los demás grupos se comportan similarmente). La tabla contiene la mejor y la peor solución para cada uno de los problemas, indicando la (*RP*), y la disminución porcentual y en horas del INF (comparando el INF del problema original (*E1*, todos los proyectos en su St_j), y el INF final después de mover los proyectos para encontrar mejores ECC (encontrar *E2* y *E3*), escoger el mejor *E#* de *E2* y *E3*, y aplicar una *RP* en el nivel 2). Los valores son para el nivel 2. De cara a la hipótesis de trabajo en la cual se espera que el sistema de planificación propuesto genere condiciones de planificación para el nivel 3 menos duras y con situaciones tratables con las posibilidades de ese nivel (por ejemplo, sobre demandas de recursos solucionables mediante horas extras, o movimiento de operarios), la tabla 1 es clara por sí misma. En todos los casos las reducciones de horas de no-factibilidad son muy destacables. Como podría esperarse los resultados están muy correlacionados con los valores del AUF. Para menores AUF, las reducciones son muy buenas; síntoma de que se logra una mejor distribución de la carga en el horizonte. No se nota ninguna incidencia de *C* en el comportamiento de la propuesta. Con relación a las *RP*, no existiendo ninguna que se destaque notablemente por encima de las demás, sí se puede reconocer el éxito en lograr mejores reducciones de INF en el nivel 2, para las *RP* 2, 6 y 1, a las que se le suma la 5, cuando se mira el conjunto de los 270 problemas.

Tabla 1. Resumen de los resultados de los experimentos

RESULTADOS EXPERIMENTOS						
Problemas						
	1.3,0.6,E#	1.3,0.8,E#	1.3,1.0,E#	1.3,1.2,E#	1.3,1.4,E#	1.3,1.6,E#
Mejor RP	2, 4, 6	1	2	6	2	2
Δ INF%	98%	79%	70%	57%	47%	20%
Δ INF	3136	6696	8504	8584	8128	7544
Peor RP	3,1	5	5	2,3,4	3	5,6
Δ INF%	95%	77%	68%	56%	46%	19%
Δ INF	3032	6576	8296	8384	8008	7432
	1.5,0.6,E#	1.5,0.8,E#	1.5,1.0,E#	1.5,1.2,E#	1.5,1.4,E#	1.5,1.6,E#
Mejor RP	1	6	6	2,4	5,6	1
Δ INF%	97%	89%	74%	69%	59%	51%
Δ INF	4720	8552	10000	11392	11089	10600
Peor RP	4	3	1	6	4	4
Δ INF%	90%	86%	68%	65%	27%	46%
Δ INF	4392	8304	9152	10776	3968	9632
	1.7,0.6,E#	1.7,0.8,E#	1.7,1.0,E#	1.7,1.2,E#	1.7,1.4,E#	1.7,1.6,E#
Mejor RP	2,3,5	6	2	1	2	3
Δ INF%	91%	81%	71%	56%	51%	39%
Δ INF	7152	11128	13104	12320	12656	10576
Peor RP	1	2	3,4	2	3	4
Δ INF%	61%	74%	63%	49%	42%	38%
Δ INF	7064	10232	11624	10640	10384	10224

CONCLUSIONES

Los resultados de los experimentos permiten ver la potencia de un sistema de planificación jerárquico de múltiples proyectos con análisis de carga/capacidad. Una propuesta de relativa antigüedad en los sistemas de fabricación repetitiva, pero totalmente novedosa en la fabricación por proyectos. Esta propuesta abre las puertas a la estructuración de un potente sistema de apoyo a la toma de decisiones que integre las más selectas y refinadas técnicas de programación de proyectos. La posibilidad de trabajar con diferentes e integrados niveles, permite adoptar y adaptar para cada nivel tales técnicas. Eso significa tener un sistema que continuamente se pueda revisar desde diferentes ópticas, de tal manera que desde cada una de ellas se aporte lo mejor para todo el sistema. Esto es mucho más que por

Ejemplo, programar sólo bajo el enfoque de recursos limitados. Mucho de lo trabajado con relación a este problema, si se considera necesario podría ser integrado por la planificación jerárquica en su tercer nivel.

Un planificador de múltiples proyectos, con la información producida por el sistema de planificación jerárquica y su análisis de carga/capacidad, estará en una posición mucho más firme para obtener programas más consistentes y robustos. Toda la información que provee el análisis es muy importante para guiar al planificador, en una tarea tan compleja como la de planificación. El análisis de carga/capacidad es la base del sistema de soporte para la toma de decisiones de planificación de múltiples proyectos, que se ha propuesto. Los resultados observados en cuanto a la reducción de la sobredemanda de recursos con relación a la oferta, son extraordinarios. El efecto del análisis de carga sobre el nivel 1 y el nivel 2 considerados de manera independiente y en forma combinada, sencillamente resultan muy prometedores, aún con herramientas de análisis relativamente simples como las experimentadas.

BIBLIOGRAFÍA

ALVAREZ-VALDÉS R. Y J.M. TAMARIT, "Heuristic Algorithms For Resource-Constrained Project Scheduling: A Review And An Empirical Analysis", Advances in Project Scheduling, Slowinski R. and Weglarz, J.(ed), Elsevier, Amsterdam. (1989).

BAKER, K.R. *Introduction to the Sequencing and Scheduling*. John Wiley & Sons. New York. (1974).

DANIELS, R.L., "Resource Allocation and Multi-Project Scheduling",

Advances in Project Scheduling, Slowinski R. and Weglarz, J. (ed), Elsevier, Amsterdam. (1989).

DAVIS, E.W., "Project Scheduling under Resource Constraints- Historical Review and Categorization of Procedures", AIIE Transactions, 5, 297-313. (1973).

DAVIS, E.W. Y J.H. PATTERSON, "A Comparison of Heuristic and Optimun Solutions in Resource-Constrained Project Scheduling", Management Science, 21, 944-955. (1975).

DEAN, B.V., D.R. DENZLER Y J.J. WATKING, "Multiproject Staff Scheduling with Variable Resource Constraints", IEEE Transactions on Engineering Management, 39, 59-72. (1992).

DECKRO, R.F., J.E. HEBERT Y W.A. VERDINI, "Project Scheduling with Work Packages", OMEGA, 20, 169-182. (1992).

DEMEULEMEESTER E, B. ODIN Y W. HERROELEN, "A Random Activity Network Generator", Operations Research, 45, 972-980. (1993).

EASA, S.M., "Resource Leveling in Construction By Optimization", Journal of Construction Engineering and Management, 115, 302-316. (1989).

ELMAGHRABY, S.E. *Activity Networks: Project Planning and Control by Network Models*. John Wiley & Sons. New York. (1977).

ELMAGHRABY, S.E., "Activity Nets: A Guided Tour Through some Recent Developments", European Journal of Operational Research, 82, 383-408. (1995).

FRENCH S., *Sequencing and Scheduling. An Introduction to the Mathematics of the Job Shop*. 4^{er} ed. Ellis Horwood Limited. London. (1990).

HARHALAKIS, G., "Evaluation of Resource Allocation in Project Scheduling", Advances in Project Scheduling, Slowinski R. and Weglarz, J. (ed), Elsevier, Amsterdam. (1989).

HARHALAKIS, G., "Evaluation of Resource Allocation in Project Scheduling", Advances in Project Scheduling, Slowinski R. And Weglarz, J. (ed), Elsevier, Amsterdam. (1989).

HARHALAKIS, G., R. NAGI Y J. M. PROTH. *Hierarchical Modeling Approach for Production Planning*. TR 92-14. College Park,

KOLISH R. Y S. HARTMANN, *Heuristic Algorithms for Solving the Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Classification and Computational Analysis*, Institut für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, Report 469. (1998).

KOLISH R. Y R. PADMAN, *An Integrated Survey of Project Scheduling*, Institut für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel. (1997).

KURTULUS, I. Y E.W. DAVIS, "Multi-Project Scheduling: Categorization of Heuristic Rules Performance", Management Science, 28, 161-172. (1982).

KURTULUS, I. Y S.C. NARULA, "Multi-Project Scheduling: Analysis of Project Performance", IIE Transactions, 17, 58-66. (1985).

LAWRENCE, S.R. Y T.E. MORTON, "Resource-constrained Multi-Project Scheduling with Tardy Costs: Comparing Myopic, Bottleneck and Resource Pricing Heuristics", European journal of Operational Research, 64, 168-187. (1993).

MARTÍNEZ E.C., D. DUJE Y G.A. PÉREZ, "On Performance Modeling of Project-Oriented Production", Computers and Industrial Engineering, 32, 509-527. (1997).

MEAL H.C., "Putting Production Decision Where They Belong", Harvard Business Review, 62, 102-111. (1984).

MEHRA, A., I. MINIS Y J. M. PROTH. *Hierarchical Production Planning for Complex Manufacturing Systems*. TR. 94-36. Institute for Systems Research. University Of Mariland. (1994).

MORTON, T.E. Y D.W. PENTICO. *Heuristics Scheduling Systems with Applications to Production Systems and Project Management*. John Wiley & Sons, Inc. New York.(1993).

NEUMANN K., Y J. ZIMMERMANN, *Methods for Resource-constrained Project Scheduling with Regular and Non-Regular Objective Functions and Schedule Dependent Time Windows*, Institut Für Wirtschaftstheorie und Operations Research, Universität Karlsruhe, Report WIOR-519.(1998).

ÖZDAMAR, L. Y G. ULUSOY, "A Survey on the Resource-Constrained Project Scheduling Problem", *IIE Transactions*,27,574-586.(1995).

PATTERSON, J.H., "Project Scheduling: The Effects of Problem Structure on Heuristic Performance",*Naval Research Logistics Quarterly*,23,95-123.(1976).

SCHNEEWEIB, C., "Hierarchical Structures in Organisations:A Conceptual Framework", *European Journal of Operational Research*,86,4-31.(1995).

SERAFINI, P. Y M.G. SPERANZA, "A Decomposition Approach in a DSS for a Resource Constrained Scheduling Problem", *European Journal of Operational Research*,79,208-219.(1994).

SPERANZA, M.G. Y C. VERCELLIS, "Hierarchical Models for Multi-Project Planning and Scheduling", *European Journal of Operational Research*,64,312-325.(1993).

ULOSoy, G. Y L. ÖZDAMAR, "A Constrained-based Perspective in Resource Constrained Project Scheduling", *International Journal of Production Research*, 32, 693-705. (1994).

YANG K-K., Y C-C SUM, "An Evaluation of Due Date, Resource Allocation, Project Release, and Activity Scheduling Rules in a Multiproject Enviroment", *European JournaOperational Research*, 103, 139-154. (1997).

ZIMMERMANN J. Y K. NEUMANN, *Heuristic Procedures for Resource Leveling Problems in Project Scheduling with Schedule Dependent Time Windows*. University of Karlsruhe. Technical Report WIOR-508. (1997).