

# PANORAMICA GENERAL SOBRE SISTEMAS DE MODELIZACIÓN INTEGRADA EN PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN FABRICACIÓN FLEXIBLE

L. F. ESCUDERO

IBM GMTC SINDEL FINGEN (ALEMANIA) y CENTRO DE INVESTIGACION UAM-IBM MADRID

*En este trabajo se efectúa una panorámica general de la situación actual de los sistemas de modelización para el diseño, fabricación y control de la producción en fabricación flexible; se describen los elementos que son necesarios para efectuar dicha modelización, así como los resultados que deben proporcionar un conjunto de subsistemas que, al utilizarse de una forma integrada, pueden ayudar a resolver parte de los problemas que se presentan, en líneas generales, en toda planificación de la producción en sistemas de fabricación flexible. Los sistemas de modelización que se describen en este trabajo, y que pueden utilizarse bien de una forma independiente o bien de una forma integrada, se clasifican en los dos siguientes tipos: subsistemas generativos y subsistemas evaluativos. Los subsistemas generativos (típicamente, basados en programación matemática) proporcionan diversas alternativas de producción, dados los objetivos a conseguir y las restricciones más importantes del problema, y utilizando solo elementos determinísticos. Los subsistemas evaluativos (típicamente, simulación) no proporcionan ninguna solución sino que analizan las implicaciones en el sistema productivo de las soluciones que pueden ser propuestas bien directamente por el planificador, bien por los propios subsistemas generativos.*

*En este trabajo también se describen las líneas generales del sistema informático que soporta la utilización de los modelos de planificación; básicamente, consiste en una base de datos, un sistema gráfico-interactivo, y los instrumentos algorítmicos que para su ejecución precisen las diversas modelizaciones.*

Keywords: FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS, PRODUCTION PLANNING, OPERATIONS EXECUTION SEQUENCING, MATHEMATICAL PROGRAMMING, SIMULATION.

## 1. INTRODUCCION.

El proceso de fabricación en USA supone 1/3 de su PNB; en Europa, y concretamente en España, esta participación, aunque inferior, tiene una tendencia creciente.

Un estudio reciente sobre las fábricas cerradas en los años setenta por las 500 compañías americanas con mayor volumen de facturación revela que una de las causas principales de dicho cierre consistió en la utilización deficiente (debido a mala planificación) de los medios de producción. En un informe elaborado recientemente /17/ se analiza estadísticamente la importancia de la planificación de la utilización de los medios de producción: cientos de robots y costosos equipos de producción pueden estar infrautilizados si su utilización no se basa en un nivel aceptable de planificación.

Existe un consenso bastante generalizado en el sentido de que la filosofía CIM ('Computer Integrated Manufacturing'), Fabricación

Controlada por Ordenador, constituye la base sobre la que han de operar las fábricas del futuro; ver /40/. La filosofía CIM representa la integración de sistemas de información con la utilización de la informática en el diseño de productos (filosofía CAD, 'Computer Integrated Design'), en la planificación de su producción y en la producción misma (filosofía CAM, 'Computer Aided Manufacturing'). Es preciso destacar que los sistemas de fabricación flexible (FMS, 'Flexible Manufacturing Systems') tienen una gran relevancia en esta integración; ver /4, 7-10, 14, 15, 18, 20, 21, 23, 42-45, 47, 49, 67-69, 70, 72, 74, 81, 87, 91/.

Los elementos básicos de un FMS son los siguientes:

1. Un conjunto de módulos flexibles de fabricación. Son estaciones de trabajo con diversas capacidades de proceso que requieren un tiempo/costo de adaptación relativamente pequeño. Ejemplos típicos son los

robots, las máquinas de control numérico, etc.

2. Un sistema automático de transporte de materiales que conecta los módulos de producción.
3. Los sistemas productivos y de transporte forman un conjunto integrado que está controlado por medios informáticos.

La complejidad de la estructura y dinámica de los sistemas modernos de fabricación, excede normalmente la capacidad de comprensión del ser humano. Básicamente, las causas son las siguientes:

1. Los sistemas productivos (humanos y automáticos) y los sistemas de proceso de datos son hoy día tan diversos e interaccionan de forma tan continuada que una utilización eficiente de los mismos es prácticamente imposible, excepto si se utilizan sistemas informáticos que coordinen los diversos recursos de producción y analicen 'a priori' las implicaciones de cualquier modificación tanto en el sistema productivo como en el sistema de proceso de la información.
2. La asimilación del funcionamiento de un sistema productivo es lenta y costosa. Dado el ritmo con el que se sustituyen los sistemas productivos, la experiencia obtenida con el sistema anticuado no es demasiado útil en los sistemas nuevos y, en ocasiones, esa experiencia no ha podido adquirirse, simplemente, por falta de tiempo.
3. La creciente automatización de la producción provoca a su vez que, ante un problema dado, el decisor no tenga la experiencia directa que necesitaría para fundamentar la decisión a tomar ante una emergencia en el proceso productivo.
4. La tendencia a reducir el ciclo de vida de los productos, siendo éstos sustituidos por productos con diferentes características exige cambios en el sistema productivo sin que exista la experiencia previa en que fundamentar las decisiones a tomar.

Ante la complejidad de los sistemas de produc

ción, se hace imprescindible la utilización de sistemas informáticos que, mediante la modelización de las inter-relaciones de los elementos productivos, proporcionen la información necesaria para tomar las decisiones más adecuadas en la realidad cambiante de un proceso de fabricación.

Un sistema informático para la modelización de la planificación de la producción en fabricación flexible debe permitir, interactivamente, el diseño, la comprobación y la experimentación con modelos alternativos de producción. El sistema debe permitir la descripción gráfica del sistema de producción, la utilización de bases de datos, la modelización de la operativa del sistema productivo, la entrada y salida gráficas de información, y el análisis de los resultados de la simulación del proceso productivo. El sistema debe combinar las ventajas que ofrece la ejecución de algoritmos determinísticos y de simulación de aplicabilidad general con las ventajas que ofrece el diseño de un sistema informático específico para la planificación de la producción en un FMS dado. El resultado final de la simulación, basado en el análisis de las magnitudes cuantitativas del problema, constituye un instrumento muy útil para una mejor planificación y un control más riguroso del proceso productivo.

Este trabajo está organizado como sigue: La Sección 2 describe los componentes tradicionales de un FMS, así como el tipo de información requerida. La Sección 3 recoge los objetivos a alcanzar con la informatización de un FMS. La Sección 4 describe la arquitectura de un típico sistema gráfico-interactivo, así como los módulos que integran el sistema y sus modelizaciones correspondientes. Y, finalmente, la Sección 5 está dedicada a la descripción de los instrumentos informáticos requeridos.

## 2. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE FABRICACION FLEXIBLE.

En esta Sección se describen los componentes de un FMS, recogiendo solamente aquellos elementos que son estrictamente necesarios para describir un típico sistema gráfico-interactivo para la planificación de la producción en fabricación flexible.

## 2.1. PROCESOS, ORDENES Y OPERACIONES.

Un proceso consiste en la transformación o ensamblaje de un material que requiere recursos humanos, tiempo de máquina, otros materiales y energía. Sea  $F$  el conjunto de procesos que se pueden efectuar en un FMS, dadas las capacidades de los módulos de proceso -- que lo integran.

Una orden es un conjunto de operaciones a -- efectuar en las piezas de un pedido determinado. Sea  $I$  el conjunto de órdenes a ejecutar simultáneamente en el FMS en el período dado de planificación (e.g., una semana).

Una operación consiste en los requisitos técnicos que debe tener la ejecución de un determinado proceso en una orden dada. Sea  $N(i)$  el conjunto de operaciones a efectuar en la orden  $i$  del conjunto  $I$  de órdenes.

La información requerida para cada capacidad de proceso  $f$  del conjunto  $F$  es la siguiente: Conjunto, sea  $M(f)$  de módulos de proceso que tengan la capacidad de proceso dada; y tipo y número, sea  $u(f)$  de unidades o instrumentos requeridos para la ejecución del proceso dado en aquellos módulos de proceso que tengan dicha capacidad.

La información requerida para cada operación, sea  $n$  del conjunto de operaciones  $N(i)$  que integran una orden dada, sea  $i$  es la siguiente: Tipo de proceso requerido sea  $p(n)$  tal que este forma parte del conjunto  $F$  de procesos; y tiempo de proceso, sea  $t(i,n)$  requerido por la operación  $n$  si se ejecuta en el módulo de proceso más eficiente en la capacidad del proceso asociado  $p(n)$ .

La información requerida para cada orden, sea  $i$  del conjunto  $I$  de órdenes a ejecutar en el período dado de planificación es la siguiente: producción requerida, sea  $a(i)$  (e.g., número de piezas a producir); producción máxima, sea  $amax(i)$  y producción mínima, sea  $amin(i)$  permitida en cada subperíodo (e.g., un día) del período de planificación si en dicho subperíodo ha de producirse la orden  $i$ ; número máximo, sea  $b(i)$  de pallets disponibles para transportar las piezas de la orden  $i$  (i.e., número máximo de piezas de la orden  $i$  que si simultáneamente pueden estar en el FMS); subperíodo mínimo, sea  $rd(i)$  y subperíodo máximo,

sea  $dd(i)$  del conjunto de subperíodos en los que se permite la ejecución del volumen de producción en la orden  $i$ ; y grafo de precedencias, sea  $G(i)=(N(i),A(i))$ .

## 2.2. GRAFO DE PRECEDENCIAS.

El grafo de precedencias (o más concretamente, grafo de precedencias directas en la ejecución de las operaciones) de la orden  $i$  se representa algebraicamente con la notación  $G(i)=(N(i),A(i))$ , donde  $N(i)$  recoge el conjunto de nudos (en nuestro caso, operaciones) de la orden  $i$ , y  $A(i)$  representa el conjunto de arcos (por definición, todos ellos dirigidos) del grafo  $G(i)$ , tal que el arco  $(j,k)$  significa que la operación  $j$  y  $k$  del conjunto  $N(i)$  tienen una relación de precedencia directa. La relación de precedencia directa  $(j,k)$  más frecuente consiste en que la operación  $k$  no puede comenzar su ejecución antes de que termine la ejecución de la operación  $j$ . La Figura 1 ilustra el grafo de precedencias para diversas órdenes; ver /13/.

Sea  $P(i,k)$  el conjunto de operaciones directamente precedentes a la operación  $k$ . Este conjunto está implícitamente definido en el conjunto  $A(i)$ . Es preciso notar que si la operación  $j$  en la orden  $i$  pertenece al conjunto  $P(i,k)$  sólo significa que la operación  $k$  no puede comenzar antes de que termine la ejecución de la operación  $j$  y no significa que la ejecución de la operación  $j$  sea inmediatamente precedente a la ejecución de la operación  $k$ ; puede, y de hecho ocurre muy frecuentemente, que se ejecuten otras operaciones después de ejecutar la operación  $j$  y antes de ejecutar la operación  $k$ .

Ahora bien, es frecuente que haya una relación de precedencia inmediata entre dos operaciones dadas. Sea  $r(i,k)$  la operación inmediatamente precedente a la operación  $k$  en la orden  $i$ ; e.g., la secuencia  $(j,k)$  es obligatoria en la orden  $i$  para  $j=r(j,k)>0$ ; sea  $R(i)$  el vector que recoge el conjunto de precedencias inmediatas en la orden  $i$ .

### Conjuntos paralelos de operaciones.

El grafo  $G(i)$  y el vector  $R(i)$  recogen las relaciones de precedencia para el caso en el que el conjunto  $N(i)$  de operaciones debe eje

cutarse en forma secuencial. Ahora bien, es muy frecuente el caso en el que hay subconjuntos de operaciones que se puedan ejecutar en paralelo (e.g. ejecución independiente de componentes de una orden que, posteriormente, han de ensamblarse). De forma análoga a la definición del grafo  $G(i)$  y del conjunto  $P(i,k)$ , sea  $GN(i)$  el conjunto de subgrafos de operaciones de la orden  $i$ , tal que  $GG(i)=(GN(i),GA(i))$  define el grafo de precedencias de los subgrafos de la orden  $i$ ; donde  $GA(i)$  representa el conjunto de arcos del grafo  $GG(i)$ , tal que el arco  $(j,g)$  significa que los subgrafos  $j$  y  $g$  del conjunto  $GN(i)$  tienen una relación de precedencia. El conjunto  $GP(i,g)$  será el conjunto de subgrafos cuya ejecución ha de ser precedente a la ejecución del subgrafo  $g$  para  $g$  en  $GN(i)$ ; la ejecución de los subgrafos en  $GP(i,g)$  puede efectuarse en paralelo.

En este contexto, el concepto de relación de precedencia inmediata entre subgrafos de modo similar al caso de operaciones con ejecución secuencial, sólo tiene utilidad a efectos de representación jerárquica del conjunto  $GG(i)$ .

Sea  $NG(i,g)$  el conjunto de operaciones del subgrafo  $g$  para  $g$  en  $GN(i)$ , tal que  $N(i) = \cup NG(i,g) \forall g \in GN(i)$ . La notación del caso secuencial  $G(i)$ ,  $A(i)$ ,  $P(i,k)$  y  $r(i,k)$  debe sustituirse en el caso de ejecución paralela de operaciones, por la notación  $G(i,g)$ ,  $A(i,g)$ ,  $P(i,g,k)$  y  $r(i,g,k)$ , respectivamente. La topología del grafo  $GG(i)$  está definida por las siguientes características:

- Un subgrafo puede tener varios subgrafos precedentes o no tener ninguno; a su vez, puede ser precedente de varios subgrafos o no ser precedente de ninguno.
- $j \in GP(i,g) \mid |GP(i,g)| > 1$  implica que  $j \notin GP(i,l) \mid \forall l \in GN(i) \mid g \neq l$ ; i.e., un subgrafo que es precedente de otro subgrafo que, a su vez tiene otros subgrafos precedentes, no puede ser precedente de ningún otro subgrafo.
- $NG(i,g) \cap NG(i,j) = \{\emptyset\} \quad \forall j, g \in GN(i) \mid j \neq g$ ; i.e., una operación solo puede pertenecer a un subgrafo.
- En cada subgrafo solo hay una operación,

sea  $n_1$  tal que  $P(i,g,n_1) = \{\emptyset\}$ , y solo una operación, sea  $n_2$  tal que  $\nexists n_3 \in NG(i,g) \mid n_2 \in P(i,g,n_3)$ ; i.e., cada subgrafo, además del conjunto de operaciones internas, solo tiene una operación de entrada y una operación de salida; si es preciso, pueden ser operaciones ficticias.

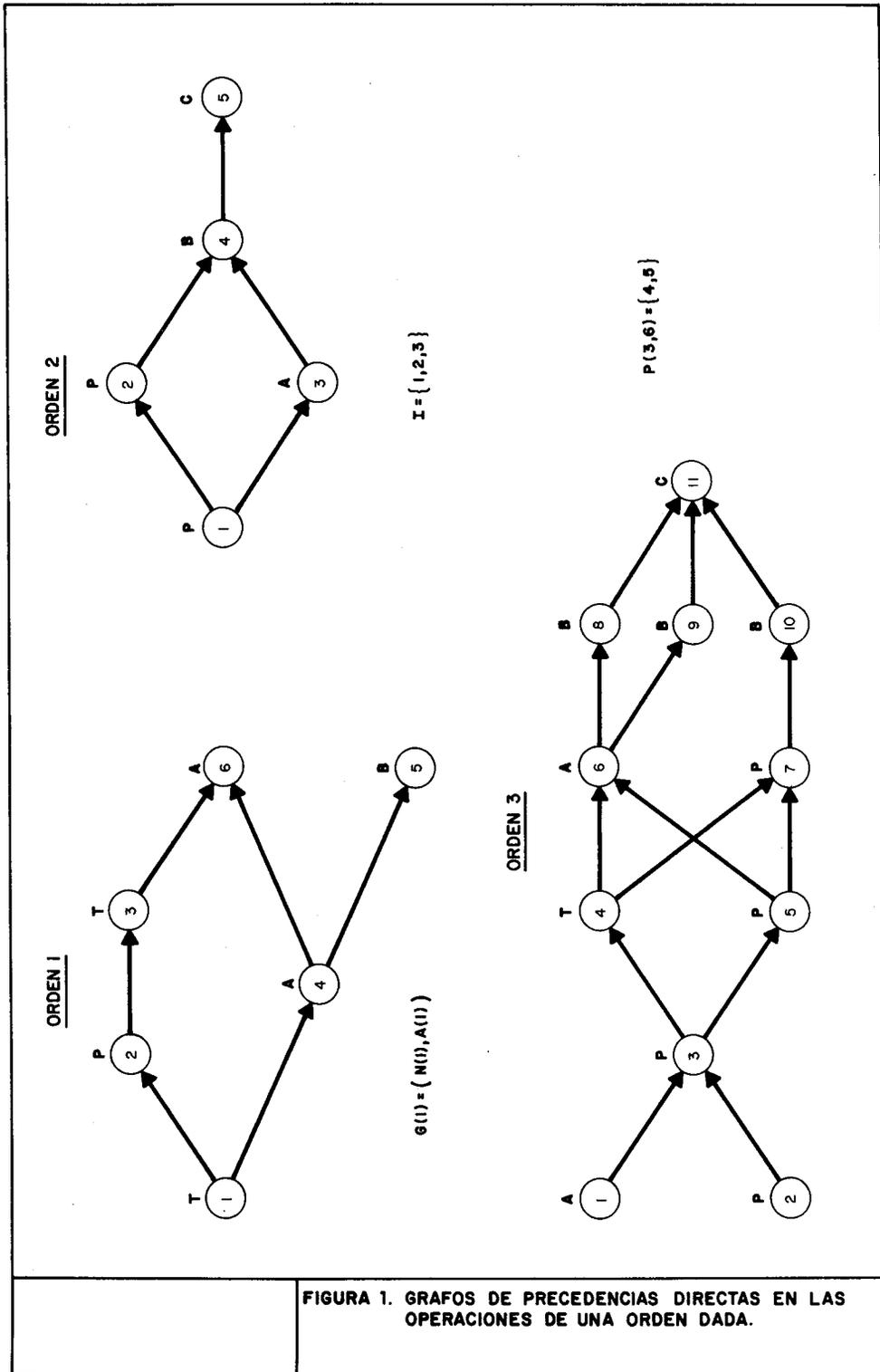
- $\nexists (n_1 \in P(i,g,k) \mid k \in NG(i,g) \wedge n_1 \in NG(i,j) \quad \forall j, g \in GN(i) \mid j \neq g)$ , y  $r(i,g,k) > 0$  para  $k \in NG(i,g)$  implica que  $n \in NG(i,g)$  para  $n = r(i,g,k)$ ; i.e., las operaciones que pertenecen a subgrafos diferentes no pueden tener relación de precedencia si no es a través de sus respectivos subgrafos.

El caso más sobresaliente de aplicación del grafo  $GG(i)$  es la orden que consiste en sucesivos ensamblajes de sub-órdenes tal que un ensamblaje puede, posteriormente, descomponerse en sub-órdenes; el conjunto de sub-órdenes forma el grafo  $GG(i)=(GN(i),GA(i))$ , y cada sub-orden forma el grafo  $G(i,g)=(NG(i,g),A(i,g))$  para  $g$  en  $GN(i)$ .

### 2.3. MODULOS DE PROCESO.

Concepto. Un módulo de proceso (o estación de trabajo) consiste en un grupo de producción que recibe material de un almacén intermedio ('input buffer'), tiene la capacidad de efectuar procesos alternativos en el material recibido con un tiempo/costo de adaptación relativamente pequeño, y coloca el resultado en un almacén de salida ('output buffer'). Existen muy diversos tipos de módulos de proceso; pueden ser instrumentos unitarios o con funciones múltiples, pueden tener sólo capacidades de carga-descarga o funciones de procesos, su proceso puede ser manual o automatizado, pueden estar formados por grupos humanos o ser totalmente mecánicos, etc. Ejemplos típicos son grupos humanos, máquinas de control numérico controladas o no por ordenador, robots, etc.

Sea la siguiente formalización de la información requerida por los módulos de proceso.  $M$  será el conjunto de tipos diferentes de módulos de proceso. La matriz binaria  $X$  recoge las capacidades de los módulos de proceso, tal que el elemento  $x(m,f)$  para  $x(m,f) = 1$  -- significa que el tipo de módulo  $m$  tiene la capacidad de proceso  $f$  para los conjuntos  $M$



y  $F$ ; en caso contrario,  $x(m, f) = 0$ . Sea  $S(m)$  el número de módulos de proceso de tipo  $m$ . Sea  $T(m)$  el número máximo de instrumentos que pueden utilizarse en el tipo de módulo  $m$ . La Figura 2 ilustra la matriz  $X$  para los casos recogidos en la Figura 1.

La matriz  $E$  recoge el coeficiente de eficacia de los módulos de proceso, tal que el elemento  $e(m, f)$  será  $e(m, f) = 0$  si  $x(m, f) = 0$  (i.e., el tipo de módulo  $m$  no tiene la capacidad de proceso  $f$ ) y  $e(m, f) = 1$  si el tipo de módulo  $m$  es el módulo más eficiente en la ejecución del proceso  $f$ ; en caso contrario,  $0 < e(m, f) < 1$  recoge el correspondiente coeficiente de eficacia. Es preciso notar que  $t(i, n)$  recoge el tiempo requerido por la operación  $n$  de la orden  $i$  si la capacidad de proceso asociada  $p(n)$  se utiliza en el módulo más eficiente en dicho proceso (i.e., módulo con  $e(m, p(n)) = 1$ ). Por tanto,  $t(i, n) / e(m, p(n))$  será el tiempo requerido por la operación  $n$  de la orden  $i$  cuando utiliza el tipo de módulo  $m$ .

Sea  $B(m)$  la capacidad de almacenamiento del tipo de módulo  $m$  (i.e., número máximo de piezas a almacenar en su almacén intermedio).

Sea  $DISPL(m)$  el tipo de disciplina en la ejecución de operaciones en el tipo de módulo  $m$ .  $DISPL(m) = FCFS$  significa que la orden que haya llegado en primer lugar al módulo  $m$  (para ejecutar el proceso  $p(n)$  relativo a la correspondiente operación  $n$ ) se ejecuta en primer lugar (i.e., 'first-come, first-service').  $DISPL(m) = PRTY$  significa que la disciplina se basa en un criterio de prioridad dado y distinto al criterio  $FCFS$ ; un caso típico consiste en que la prioridad de cada orden 'en espera' viene dada por la duración de la ejecución de la correspondiente operación,  $t(i, n) / e(m, p(n))$ , tal que se ejecutan prioritariamente los órdenes con menor duración en su proceso.

La matriz  $D$  recoge el tipo de distribución probabilística seguida por la duración de los procesos en cada módulo, tal que  $d(m, f) = 1$  si la distribución probabilística es la Normal; en caso contrario (i.e., distribución 'standard'),  $d(m, f) = 0$  (ver más adelante). Es preciso notar que por convención  $d(m, f) = 1$  si  $x(m, f) = 0$ .

La matriz  $VA$  recoge el coeficiente de variación en la duración de los procesos en cada módulo, tal que  $va(m, f)$  recoge la ratio de la desviación típica con respecto a la duración promedio de la ejecución del proceso  $f$  en el módulo  $m$ . La distribución standard -- (caso  $d(m, f) = 0$ ) será la distribución constante, la distribución uniforme, la distribución de Erlang- $k$ , la distribución exponencial o la distribución hiperexponencial dependiendo del valor de  $va(m, f)$ . Los parámetros de las diversas distribuciones también dependen de  $va(m, f)$ ; ver /64, 75, 77/ para una descripción detallada de la distribución standard. Es preciso notar que, si el módulo de proceso  $m$  no está integrado por un equipo humano, entonces la distribución más frecuente será  $d(m, f) = 0$  con  $va(m, f) = 0$  (i.e., distribución constante).

La información necesaria para el análisis de las averías en los módulos de proceso puede formalizarse en la forma siguiente: Sea  $f(m)$  un coeficiente tal que  $f(m) = 0$  indica que la simulación del funcionamiento del tipo de módulo  $m$  no considera esta circunstancia; en caso contrario,  $f(m) = 1$ . Sean las matrices  $W1$ ,  $W2$  y  $W3$  tal que los elementos  $w1(m, j)$ ,  $w2(m, j)$  y  $w3(m, j)$  recogen respectivamente, el promedio, distribución probabilística y coeficiente de variación del intervalo entre averías del módulo  $j$  del tipo de módulo  $m$  para  $j = 1, 2, \dots, S(m)$  y  $m$  en  $M$ . De forma análoga, sean las matrices  $F1$ ,  $F2$  y  $F3$  tal que los elementos  $f1(m, j)$ ,  $f2(m, j)$  y  $f3(m, j)$  recogen respectivamente, el promedio, la distribución probabilística, y el coeficiente de variación de la duración de una avería en el módulo  $j$  del tipo  $m$ .

## 2.4. SISTEMA DE TRANSPORTE.

La capacidad del sistema de transporte está definida por la localización física de los módulos de proceso y los arcos que los conectan, además de las características técnicas de los medios de transporte.

Sea  $Carts$  el número de medios de transporte unitario; representa el número máximo de piezas que simultáneamente pueden estar en movimiento en el FMS.

La posibilidad de utilización del sistema de

transporte puede representarse por la matriz binaria  $H$ , tal que el elemento  $h(m_1, m_2)$  será  $h(m_1, m_2)=1$  si una pieza puede transportarse desde el módulo  $m_1$  al módulo  $m_2$  (en este caso,  $q(m_1, m_2)$  recoge el tiempo/costo de transporte); en caso contrario,  $h(m_1, m_2)=0$ . Por tanto, la matriz  $H$  puede ser universal (caso en que  $h(m_1, m_2)=1$  para todo  $m_1$  y  $m_2$  en  $M$ , i.e. se puede enviar material desde un módulo a cualquier otro), unidireccional (caso en que si  $h(m_1, m_2)=1$  entonces  $h(m_2, m_1)=0$ ), o tener una complejidad arbitraria. Es preciso notar que  $h(m_1, m_1)=1$  está permitido; en nuestro contexto, el transporte de una pieza de un módulo a sí mismo es muy frecuente, dado que la ejecución consecutiva en el mismo módulo de dos o más operaciones de una orden es factible, siendo en este caso  $q(m_1, m_1)=0$ . La Figura 3 ilustra la formalización del sistema de transporte con complejidad arbitraria relativo al caso recogido en las Figuras 1 y 2.

Las Figuras 4, 5 y 6 recogen el tipo de transporte serial; es preciso notar que la matriz  $H$  es universal para este tipo de transporte; ver /41/. La Figura 4 ilustra el tipo de transporte serial en el que los almacenes intermedios y los módulos de proceso están en batería, tal que una pieza debe esperar en un almacén intermedio si su correspondiente módulo de proceso está ocupado, aunque la operación a ejecutarse en dicha pieza no utilice ninguna de las capacidades de proceso de dicho módulo; este tipo de transporte es fácil de modelizar y no es costoso de instalar o operar, pero incrementa el número de piezas inacabadas y reduce la productividad. La Figura 5 ilustra el tipo de transporte serial recirculante único, ya que un almacén intermedio sólo será utilizado por aquellas piezas cuya operación requiera la capacidad de proceso del correspondiente módulo y éste esté ocupado; se denomina único ya que sólo hay una ruta entre cada par de módulos. La Figura 6 ilustra el tipo de transporte serial recirculante múltiple, ya que puede haber más de una ruta entre cada par de módulos; uno de los problemas a resolver en la planificación de la utilización de un FMS consiste en determinar cual es la ruta óptima entre cada par de módulos.

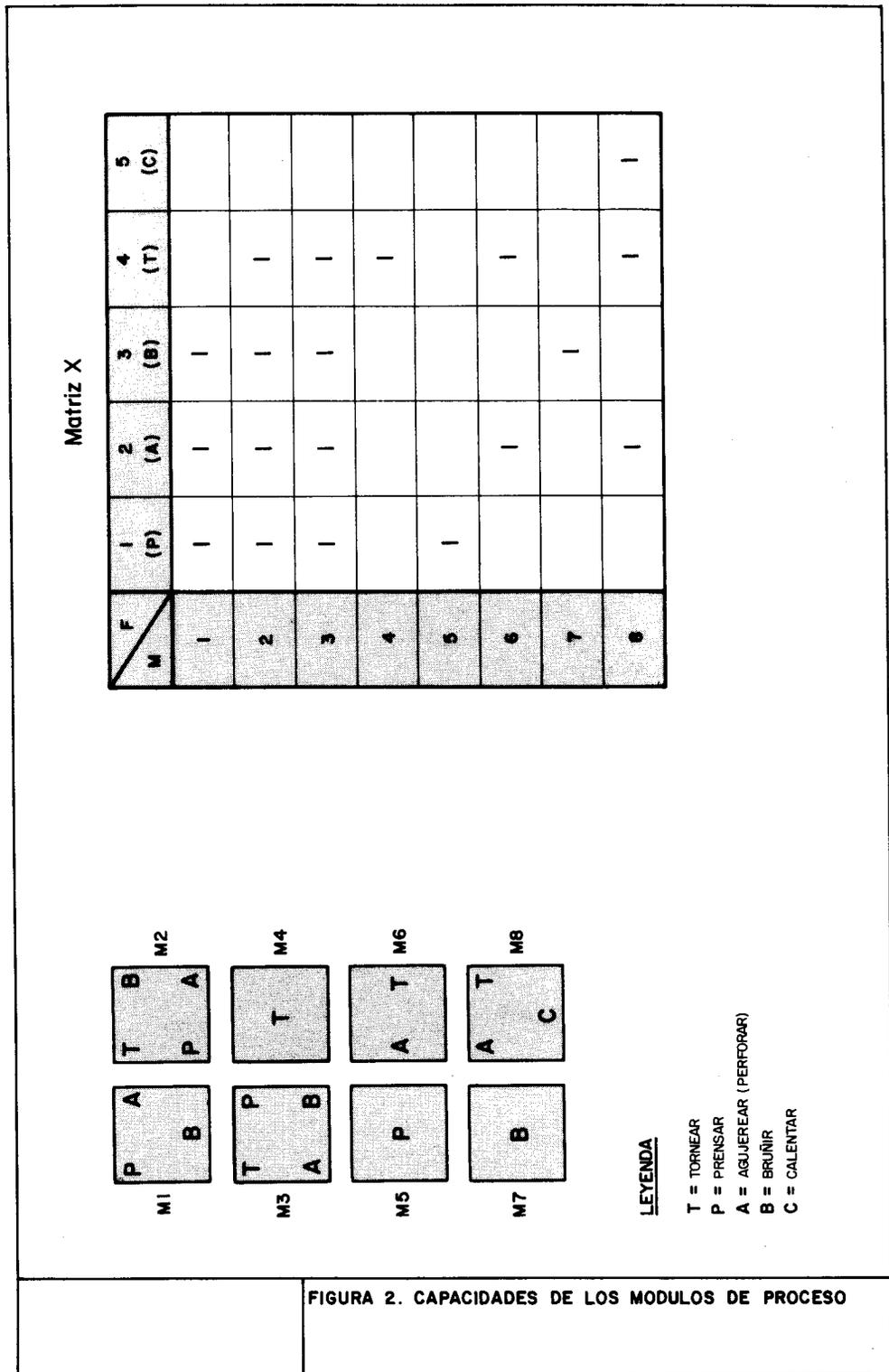
## 2.5. TIPOS DE INFORMACION.

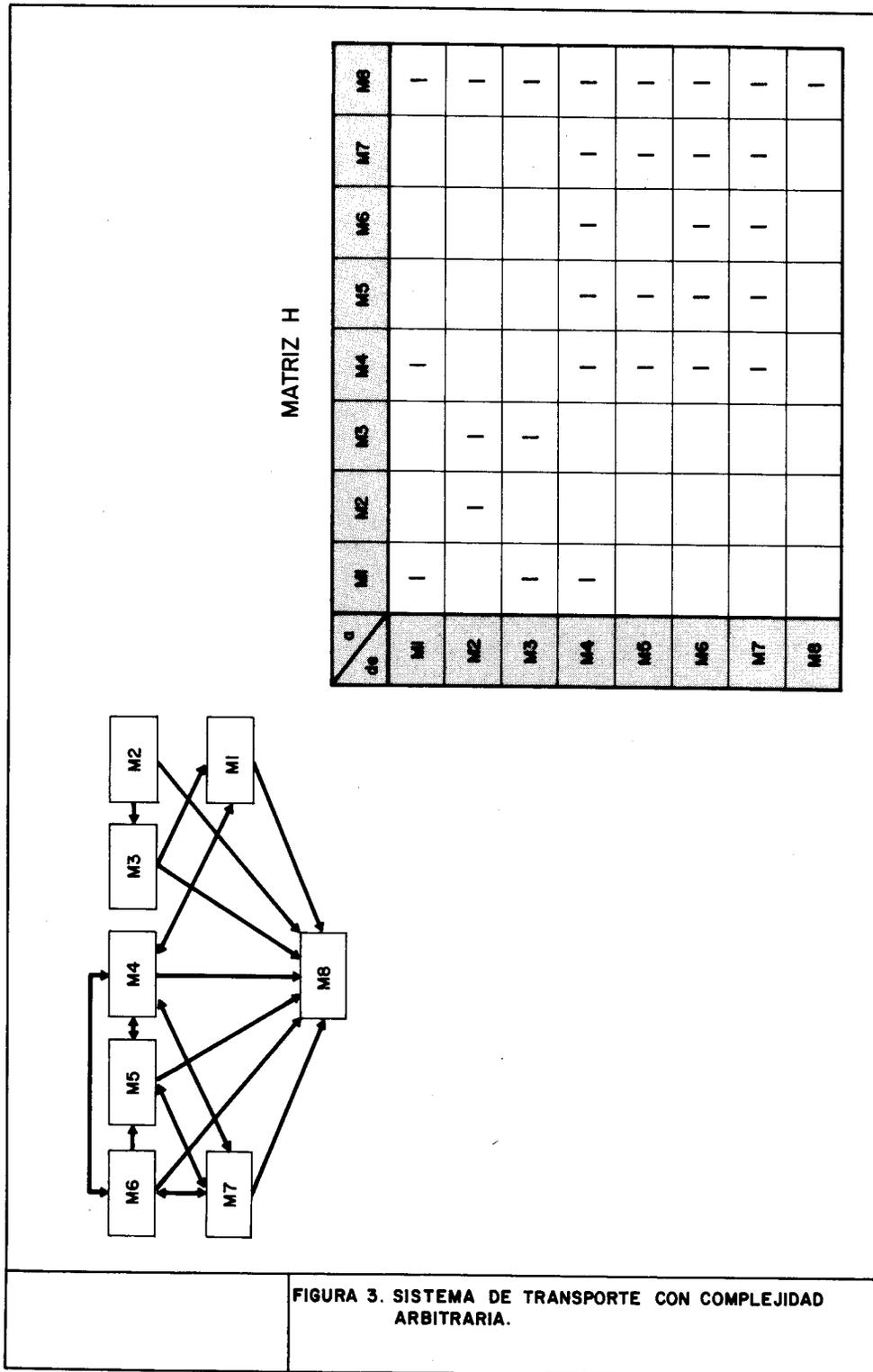
La información requerida para efectuar la planificación de la utilización de un típico FMS, en un período dado, se puede clasificar en los siguientes cuatro tipos:

Información permanente. Es la información referida a los módulos de proceso y sistema de transporte; ésta será descripción y número de instrumentos  $u(f)$  para cada capacidad de proceso  $f$  del conjunto de capacidades  $F$  en el FMS dado; descripción, número de módulos  $S(m)$ , capacidad de almacenamiento de instrumentos  $T(m)$ , capacidad del almacén intermedio  $B(m)$  y disciplina en la ejecución de cada proceso  $DISPL(m)$  para cada tipo de módulo  $m$  en el conjunto  $M$  de módulos del FMS dado; matrices  $X$ ,  $E$ ,  $D$  y  $VA$  de capacidades de proceso, eficacia, distribución probabilística de la duración del proceso y coeficiente de variación del mismo; matrices  $H$  y  $Q$  del sistema de transporte y descripción y número de medios (Carts) de transporte unitario.

Información semi-permanente. Esta información se refiere fundamentalmente a las averías de los módulos de proceso, tales como el indicador  $f(m)$  que recoge la posibilidad de utilizar o no este tipo de información para el tipo de módulo  $m$ ; las matrices  $W_1$ ,  $W_2$  y  $W_3$  por lo que respecta al intervalo entre averías, y las matrices  $F_1$ ,  $F_2$  y  $F_3$  por lo que respecta a la duración de una avería. Otro tipo de información que se puede considerar semi-permanente consiste en el número máximo,  $p_{max}$  de módulos a los que se puede asignar un proceso en un subperíodo dado de planificación, así como la proporción mínima,  $c_{min}$  de carga de trabajo de un módulo que puede ser asignada a un proceso en dicho subperíodo (si es que se decide asignar dicho proceso al tipo de módulo considerado); ver sección 4.5. Información semi-permanente es, también, el número de unidades de tiempo disponibles, sea  $T_t(t)$  en el subperíodo  $t$  para  $t$  en  $T$ , donde  $T$  es el conjunto de subperíodos del período de planificación considerado.

Información variable. Esta información se refiere a las características de las órdenes a ejecutar en el período de planificación dado, tales como descripción, cantidad a producir  $a(i)$ , máximo  $amax(i)$  y mínimo relativo  $amin(i)$  a producir en cada subperíodo de planificación,





**FIGURA 3. SISTEMA DE TRANSPORTE CON COMPLEJIDAD ARBITRARIA.**

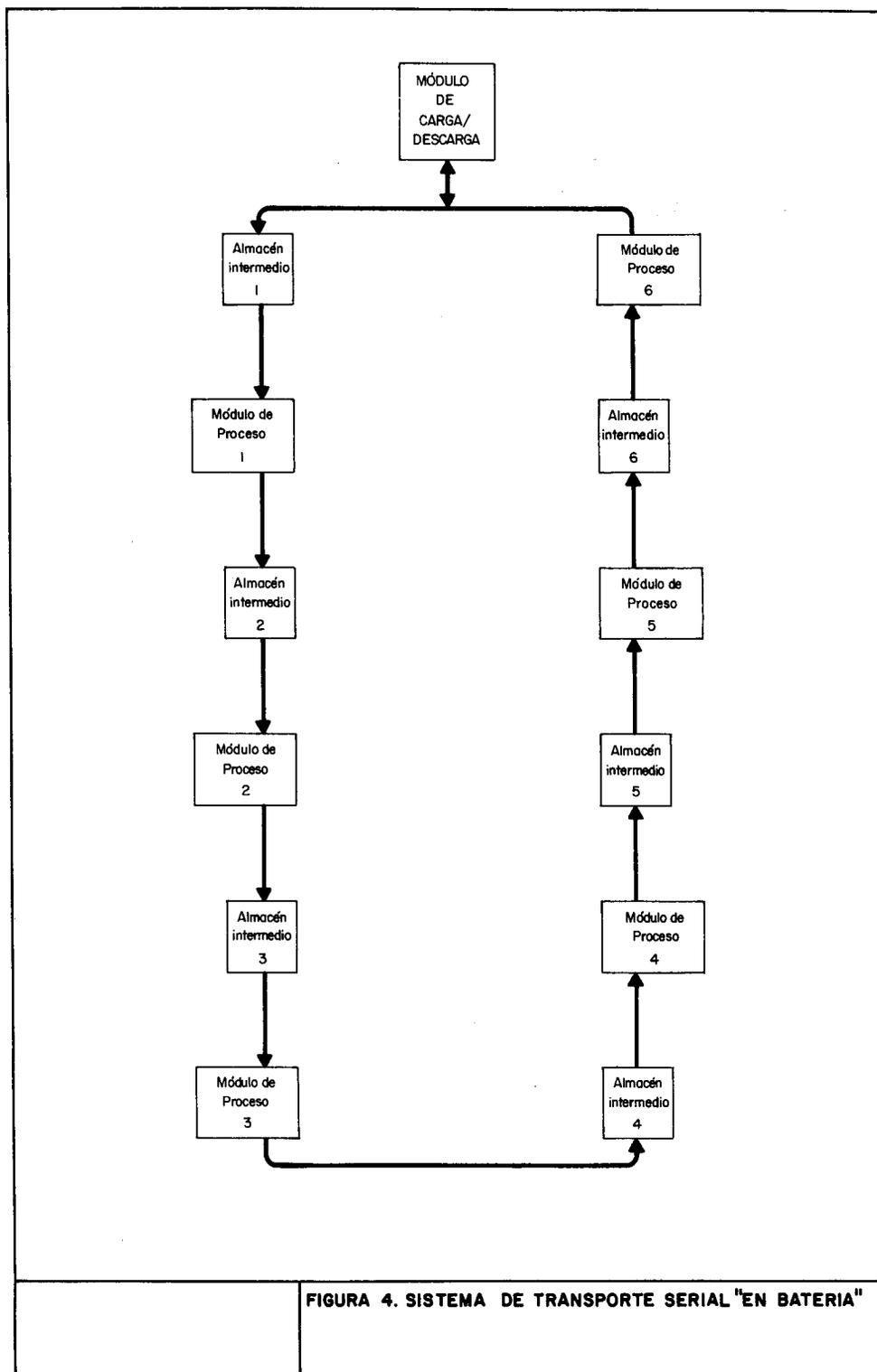
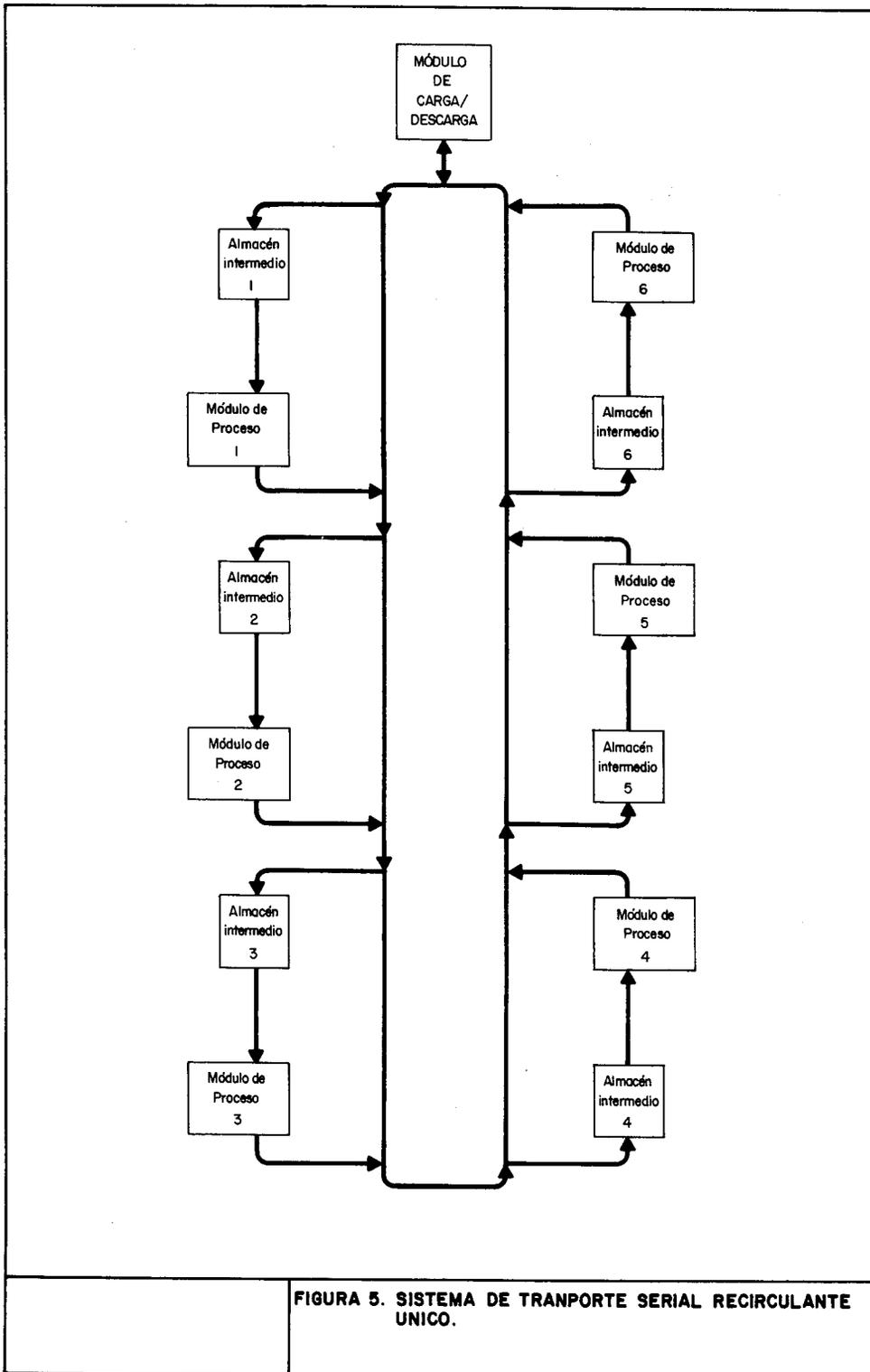
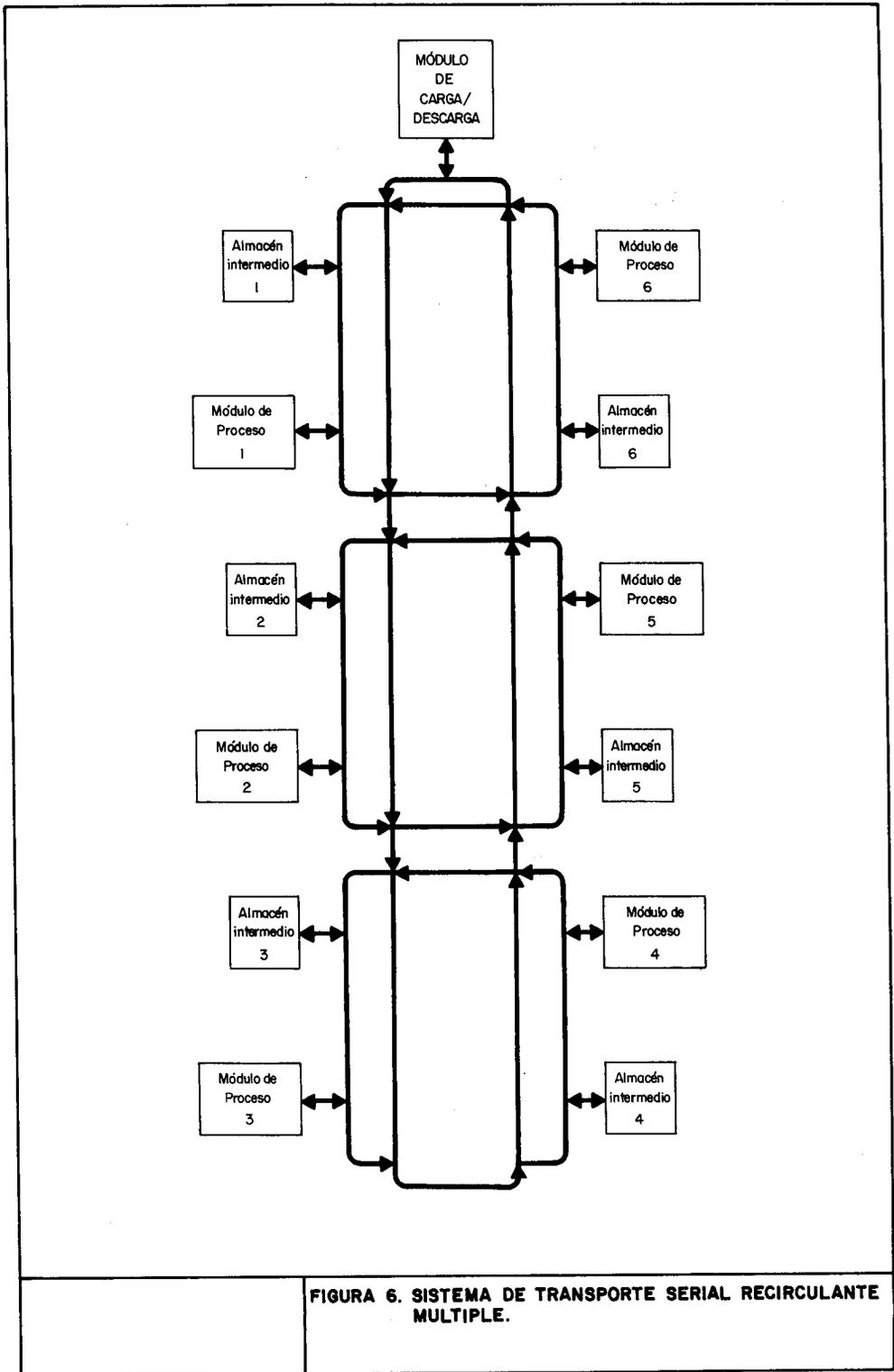


FIGURA 4. SISTEMA DE TRANSPORTE SERIAL "EN BATERIA"





número de pallets  $b(i)$ , conjunto de operaciones  $N(i)$ , duración  $t(i,n)$  de cada operación  $n$  en  $N(i)$  y su proceso asociado  $p(n)$ , los subperíodos  $rd(i)$  y  $dd(i)$  entre los que se puede ejecutar la orden, conjunto  $GN(i)$  de subgrafos en el grafo  $GG(i)$ , conjunto  $GP(i,g)$  de subgrafos precedentes al subgrafo  $g$  para  $g$  en  $GN(i)$ , conjunto  $NG(i,g)$  de operaciones en el subgrafo  $g$ , conjunto  $P(i,g,k)$  de operaciones directamente precedentes a la operación  $k$  del subgrafo  $g$  y su operación  $r(i,g,k) > 0$  inmediatamente precedente para  $k$  en  $NG(i,g)$  (y, por supuesto, en  $N(i)$ ). Otro tipo de información variable consiste en el número máximo,  $I_{max}$  de órdenes a procesar en cada subperíodo del período considerado. La información necesaria sobre los grupos de órdenes a formar (ver Sección 4.2) es la siguiente:  $K$ , número máximo de grupos a formar;  $v_{max}$  y  $v_{min}$ , volumen de producción (e.i., número de piezas) máximo y mínimo, respectivamente, en cada grupo;  $C$ , conjunto de atributos discriminantes; y matrix  $V$  que recoge los valores de los atributos discriminantes en el conjunto  $I$  de órdenes, tal que  $v(i,c)$  representa el valor del atributo  $c$  en la orden  $i$  para  $c$  en  $C$  e  $i$  en  $I$ . Es preciso notar que cuando las órdenes son representativas es interesante considerar como permanente la mayor parte de la información aquí indicada; en este caso, sólo se consideraría como información variable  $I_{max}$ ,  $K$ ,  $v_{max}$ ,  $v_{min}$ ,  $rd(i)$  y  $dd(i)$ , y  $a(i)$ ,  $amax(i)$  y  $amin(i)$  para toda orden  $i$  en  $I$ .

Información concerniente al tipo de planificación a efectuar. Esta información se refiere fundamentalmente al tipo de objetivo a alcanzar en la planificación de la utilización del FMS, así como a la decisión sobre los elementos del sistema gráfico-interactivo que se van a utilizar para efectuar la planificación. Ver Secciones 3 y 4.

## 2.6. ANALISIS DE UN SISTEMA DE FABRICACION FLEXIBLE.

Secuencia de Operaciones. Una secuencia en la ejecución de operaciones que integran la orden  $i$  consiste en el orden en que dichas operaciones deben ejecutarse; i.e., una secuencia es un ordenamiento de los nudos del grafo de precedencias directas  $G(i) = (N(i), A(i))$ , tal que incluya todos -

los nudos (i.e., operaciones) y no viole las restricciones de precedencia directa dadas por el conjunto  $A(i)$  (i.e., y, por tanto, dadas por los conjuntos  $P(i,k)$ ), ni viole las restricciones de precedencia inmediata (dadas por el vector  $R(i)$ ). Sea  $S(i)$  el vector que recoge una secuencia de operaciones dada en la orden  $i$ , tal que el elemento  $s(i,j)$  recoge la  $j$ -ésima operación a ejecutar en dicha orden. Teóricamente, el conjunto de secuencias factibles podría ser factorial de  $N(i)$  (sería el caso en que no hubiese relaciones de precedencia); el número de secuencias en un caso real es muy inferior. La Figura 8 recoge el árbol de generación de secuencias factibles del caso recogido en la Figura 7 (ver también la Figura 1); la Tabla 1 recoge las nueve secuencias factibles; se puede observar que ninguna de ellas viola las relaciones de precedencia de las operaciones; ver /13/.

Ruta de órdenes. Una ruta en la ejecución de una orden, dada una secuencia de operaciones, consiste en el conjunto de módulos de proceso en los que se ha de ejecutar dicha orden. Dado el proceso  $p(n)$  asociado a cada operación, la matriz  $X$  de capacidades de proceso, y la matriz  $H$  del sistema de transporte, es posible obtener las rutas factibles alternativas a seguir por cada orden.

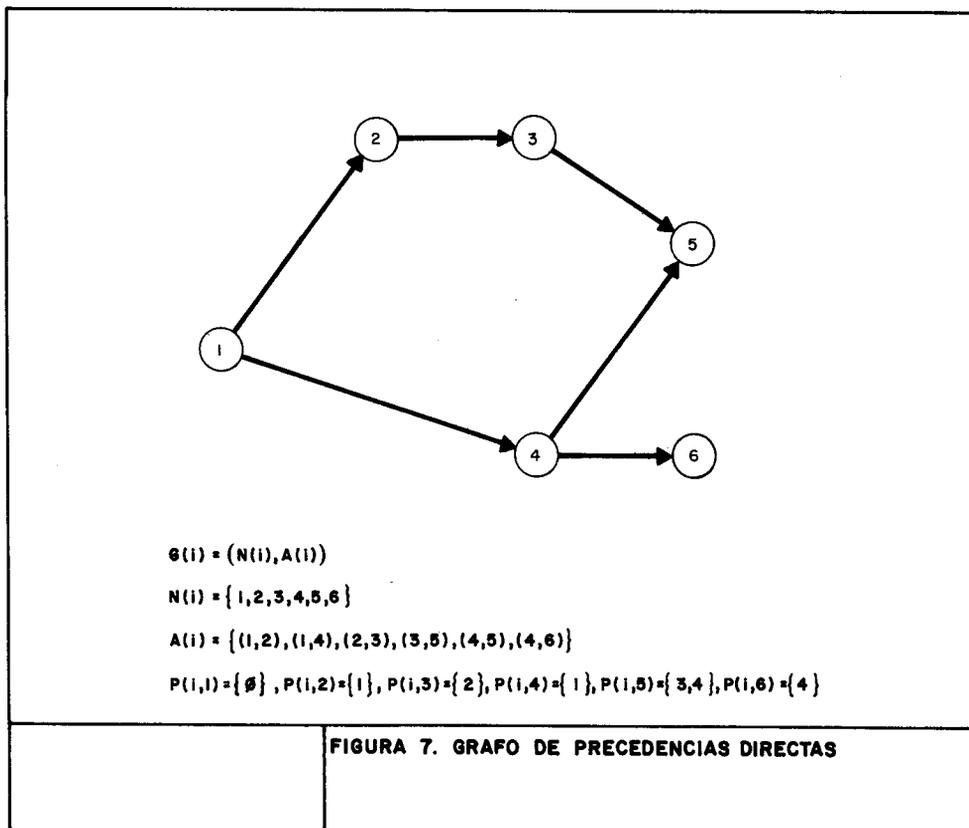
La Figura 9 recoge los módulos en los que se puede ejecutar la secuencia de operaciones  $S(i) = (1,4,6,2,3,5)$  representada en el árbol recogido en la Figura 8 para el caso recogido en las figuras anteriores. Si la matriz  $H$  de transporte fuese universal, el número de rutas factibles sería 10000. Ahora bien, dada la matriz  $H$  recogida en la Figura 3, el número de rutas es muy inferior, en concreto solo hay 42 rutas factibles; ver Figura 10. Cuál es la ruta más interesante?

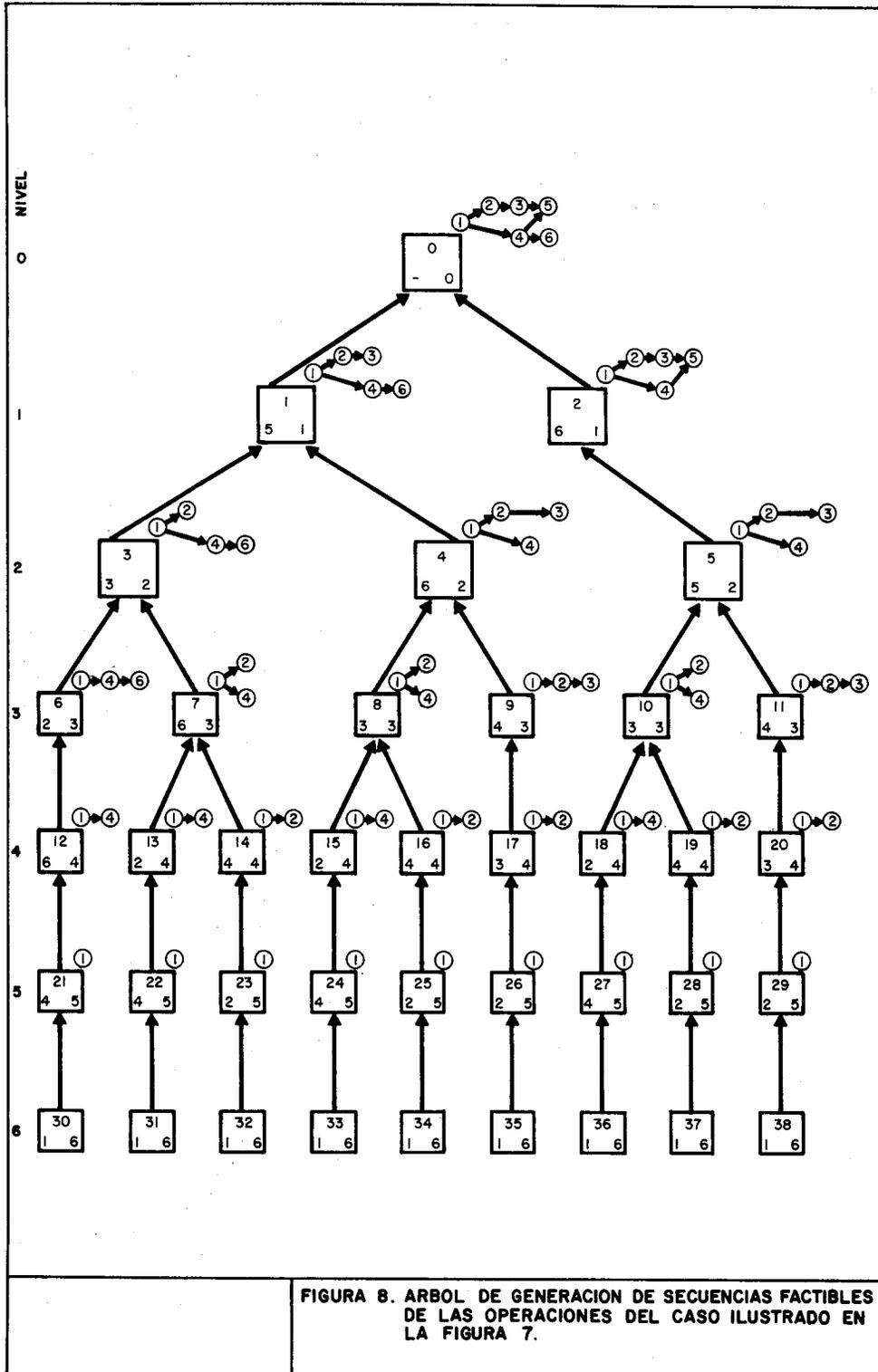
Un análisis local del problema nos indicaría que las rutas más idóneas son aquellas en las que el conjunto de operaciones se ejecuta totalmente en los módulos de tipo 2 ó 3, dado que el tiempo/costo de transporte es nulo; -- ahora bien, es posible que la eficacia de los módulos en cada proceso no sea la misma y, -- por tanto, se reduzca el volumen de piezas -- inacabadas y se eleve la productividad global si alguna operación se ejecuta en módulos distintos; por otra parte, si se considera que

TABLA 1

SECUENCIAS FACTIBLES DE LAS OPERACIONES DEL CASO  
ILUSTRADO EN LA FIGURA 7

Secuencia Número	Composición de la secuencia
1	{ 1, 4, 6, 2, 3, 5 }
2	{ 1, 4, 2, 6, 3, 5 }
3	{ 1, 2, 4, 6, 3, 5 }
4	{ 1, 2, 4, 3, 6, 5 }
5	{ 1, 4, 2, 3, 6, 5 }
6	{ 1, 2, 3, 4, 6, 5 }
7	{ 1, 4, 2, 3, 5, 6 }
8	{ 1, 2, 4, 3, 5, 6 }
9	{ 1, 2, 3, 4, 5, 6 }





OPERACION	1(T)	4(A)	6(B)	2(P)	3(T)	5(A)
PROCESO	4	2	3	1	4	2
MODULO 1		•	•	•		•
2	•	•	•	•	•	•
3	•	•	•	•	•	•
4	•				•	
5				•		
6	•	•			•	•
7			•			
8	•	•			•	•

FIGURA 9. RUTAS DE LA ORDEN CUYO GRAFO DE PRECEDENCIAS SE RECOGE EN LA FIGURA 7. SECUENCIA Nº 1 (VER FIGURA 8 Y TABLA 1) Y MATRIZ H DE TRANSPORTE UNIVERSAL.

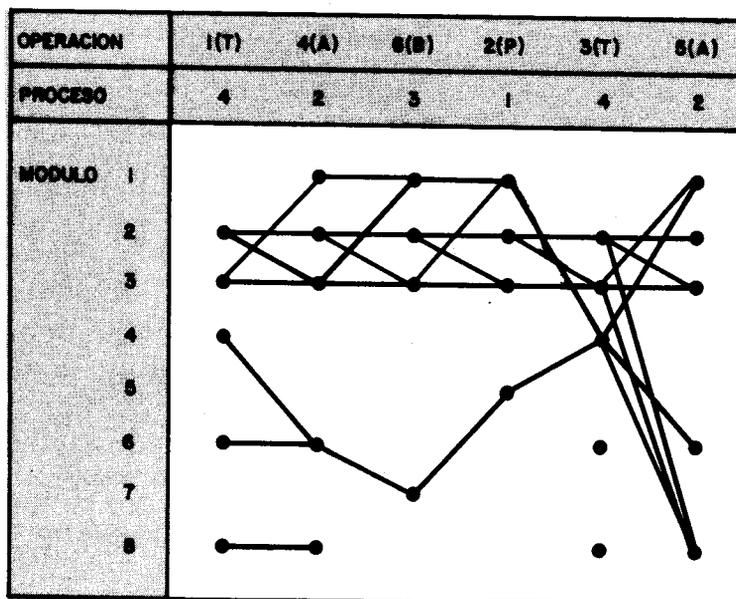


FIGURA 10. RUTAS DE LA ORDEN CUYO GRAFO DE PRECEDENCIAS SE RECOGE EN LA FIGURA 7. SECUENCIA Nº 1 (VER FIGURA 8 Y TABLA 1) Y MATRIZ H DE TRANSPORTE RECOGIDA EN LA FIGURA 3.

la planificación de la ruta de cada orden se ha de efectuar considerando que hay también otras órdenes (conjunto I) que han de ejecutarse simultáneamente en el FMS, entonces la decisión sobre la elección del binomio secuencia de operaciones y ruta de órdenes a utilizar no es una decisión fácil de tomar. Es preciso, pues, analizar conjuntamente todas las órdenes, así como contemplar el tipo de objetivo a conseguir en una planificación dada (ver Sección 3) para así determinar el binomio más interesante en cada caso.

### 3. MOTIVACION PARA LA INFORMATIZACION DE LA PLANIFICACION DE LA PRODUCCION EN FMS.

#### 3.1. OBJETIVOS EN LA PLANIFICACION DE LA PRODUCCION EN FMS.

Dada la estructura físico/tecnológica de los módulos de proceso y sistema de transporte y dado el volumen a producir de cada orden, el problema a resolver en la planificación (manual o informatizada) de la producción en un FMS, en un período dado (e.g., una semana) consiste, al menos, en determinar:

1. Las órdenes que han de procesarse simultáneamente en el FMS.
2. El volumen (i.e., número de piezas) de cada orden que ha de producirse en cada subperíodo (e.g., un día) del período de planificación dado.
3. La carga de los módulos de proceso; i.e., los procesos a utilizar en cada módulo (y, por tanto, los instrumentos a utilizar) para cada subperíodo.
4. La secuencia en la ejecución de las operaciones en cada orden para cada subperíodo, - así como las rutas inter-módulos (y su proporción) a seguir por cada orden.
5. La secuencia en la que se introducirán en el FMS las piezas a producir en cada orden para cada subperíodo.
6. El número de piezas de cada orden (i.e., número de pallets a utilizar) que han de procesarse simultáneamente en cada subperíodo.

7. La utilización del sistema de transporte.

Es interesante destacar que es absolutamente necesario resolver, al menos, estos siete tipos de problemas antes de comenzar la producción en el período dado; de una forma más o menos implícita y más o menos informatizada, la producción de un período debe planificarse a base de resolver los problemas arriba indicados.

#### 3.2. MAGNITUDES A "OPTIMIZAR"

El objetivo final de una planificación de la producción consiste en la minimización del costo; ahora bien, esta magnitud no es fácilmente cuantificable. Por tanto, se utilizan normalmente otras magnitudes cuya cuantificación es más fácil y que de una forma más o menos implícita están relacionadas con el costo de la producción. Estas magnitudes son las siguientes /79/:

1. Equilibrar la carga de trabajo de los módulos.
2. Minimizar las transferencias entre los módulos; i.e., minimizar la utilización del sistema de transporte, tal que se maximice el número de órdenes a procesar en el menor número posible de módulos.
3. Maximizar el número ponderado de órdenes a procesar simultáneamente en el FMS.
4. Minimizar el volumen de piezas semi-acabadas.
5. Maximizar el número ponderado de piezas a producir por unidad de tiempo.

Se puede observar que alguno de los objetivos son muy parecidos, pero hay otros que son totalmente opuestos; e.g., el equilibrio en la carga de trabajo de los módulos y la minimización del número de transferencias son dos objetivos contrapuestos. No es muy eficaz seleccionar la optimización de un objetivo, sin balancear al mismo tiempo los demás objetivos. Por tanto, una planificación aceptable sería aquella que obtuviese un valor equilibrado en cada uno de ellos; ver /2/.

### 3.3. COMPLEJIDAD DE LA PLANIFICACION DE LA PRODUCCION EN UN FMS.

La complejidad de la planificación de la producción es debida fundamentalmente a la necesidad de obtener una solución que equilibre la consecución de los objetivos anteriormente indicados. En el caso de FMS esta complejidad se incrementa debido a los siguientes elementos:

1. Componentes fuertemente relacionados.
2. Gran número de decisiones posibles.
3. Recursos con utilización muy flexible, pero también con una disponibilidad muy limitada.
4. Necesidad de visualización del proceso -- productivo.
5. Posibilidad de utilizar el sistema prácticamente sin tiempos inhábiles.
6. Necesidad de una respuesta rápida ante -- cambios inesperados en el sistema productivo, tales como congestiones inesperadas en el sistema debido a averías en el sistema de transporte y módulos de proceso, nuevas órdenes a producir adicionalmente a las órdenes ya planificadas, desviación en la eficacia prevista en el proceso de las operaciones a efectuar en los diversos módulos (principalmente si estos tienen una fuerte componente de recursos humanos), etc.

La complejidad en el diseño, planificación y control de un FMS exige la modelización e informatización del proceso de decisión correspondiente.

### 3.4. TIPIFICACION DE LOS SISTEMAS DE SOPORTE A LA DECISION.

Los sistemas informáticos de soporte a la decisión en planificación de la producción en FMS se pueden clasificar en los dos siguientes grupos: Sistemas generativos con los que se obtiene un conjunto de decisiones aparentemente aceptables sobre la planificación a efectuar; estos sistemas utilizan elementos determinísticos y modelos aproximativos del

problema. Y sistemas evaluativos que evalúan el conjunto de decisiones candidatas obtenidas bien por los sistemas generativos, bien proporcionadas directamente al sistema por el decisor, o bien producidas por el decisor a base de utilizar combinaciones de las decisiones propuestas por los sistemas generativos; estos sistemas utilizan elementos determinísticos y aleatorios y modelos muy aproximados del problema. Los elementos aleatorios más frecuentes son la duración del proceso en la ejecución de las operaciones (principalmente, si en el módulo de proceso hay intervención humana), y la posibilidad de averías y su duración en los módulos de proceso y el sistema de transporte. Se puede observar que los sistemas evaluativos no producen ninguna solución al problema; meramente, pero es fundamental, analizan las repercusiones de una solución propuesta. Por otra parte, los sistemas generativos no pueden garantizar que las soluciones propuestas sean óptimas pero, al menos, seleccionan el conjunto de decisiones que pueden ser óptimas y que deben ser evaluadas por los sistemas evaluativos.

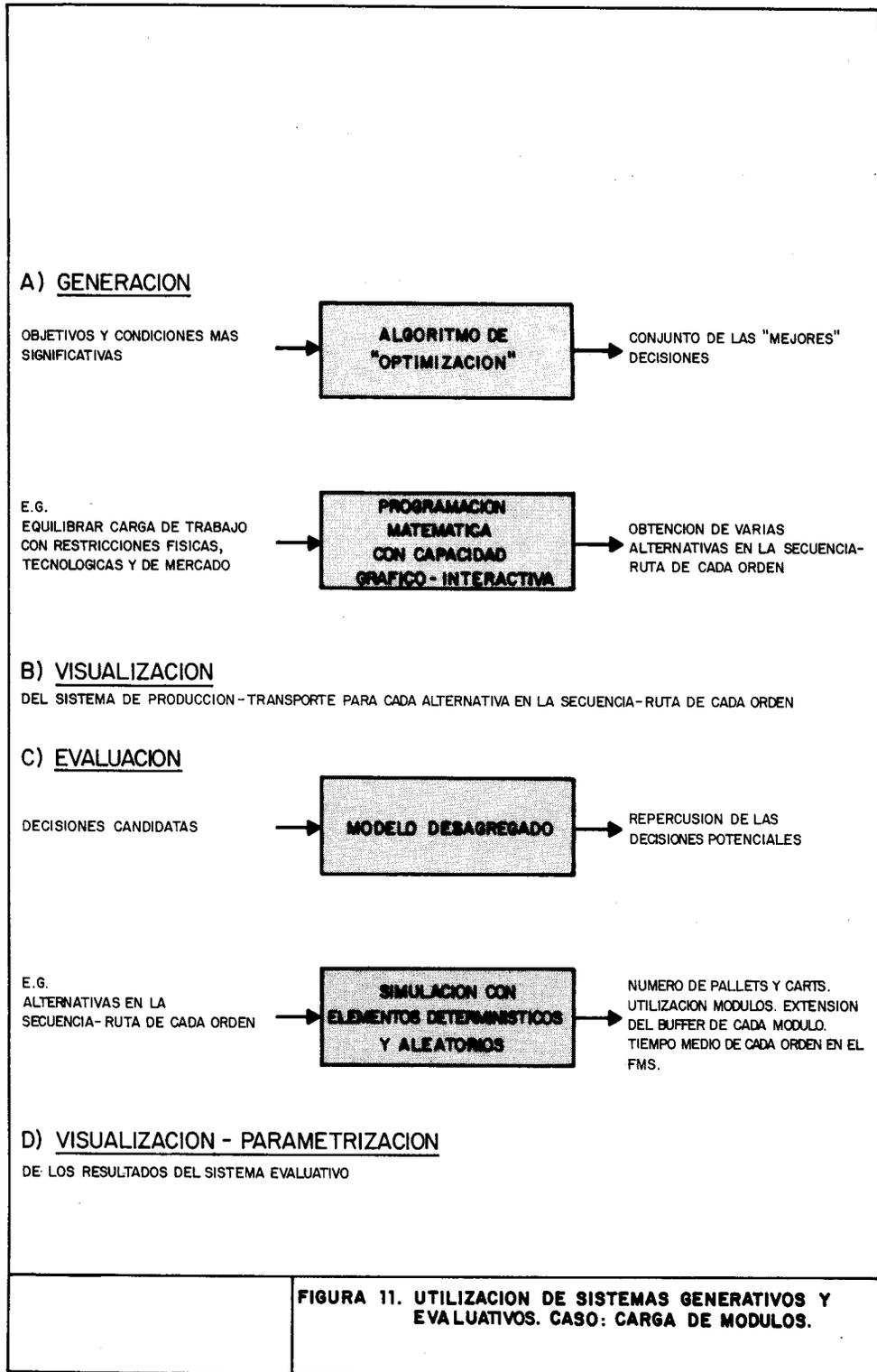
Un sistema de planificación de la producción en FMS debería utilizar los sistemas generativos y evaluativos basándose en la metodología recogida en la Figura 11. Se ha seleccionado el problema del equilibrio de la carga de trabajo meramente a título ilustrativo.

## 4. ARQUITECTURA DE UN SISTEMA TIPICO DE PLANIFICACION DE LA PRODUCCION EN FMS.

### 4.1. ESQUEMA GENERAL.

El sistema típico de planificación de la producción en FMS tiene básicamente los cuatro siguientes componentes: una base de datos con la información descrita en la Sección 2 así como la información generada por el propio -- sistema, una metodología gráfico-interactiva para la comunicación con el decisor (no necesitando este ningún tipo de especialización informática para su utilización), un sistema generativo de decisiones candidatas, y un sistema evaluativo de decisiones propuestas por el anterior sistema o propuestas por el mismo decisor.

Las siguientes secciones recogen el esquema general de un típico sistema generativo-evaluativo.



luativo; el sistema está integrado por los siguientes subsistemas:

1. Subsistema Agrupación de órdenes. Tiene como objetivo la selección de las órdenes que simultaneamente han de procesarse en el FMS, en el período dado de planificación. Ver Sección 4.2.
2. Subsistema Asignación de la producción. Tiene como objetivo la distribución de la producción entre los diversos subperíodos en que se descompone el período considerado; e.g., días laborables de la semana. Ver Sección 4.3.
3. Subsistema Asignación de la ruta intermódulos. Tiene como objetivo la determinación de la ruta a seguir por una pieza desde un módulo a cualquier otro módulo, en el caso de rutas alternativas. Ver Sección 4.4.
4. Subsistema Carga de módulos. Tiene como objetivo la determinación de las capacidades de proceso a utilizar en cada módulo del FMS en cada subperíodo, así como la carga de trabajo asignada en cada módulo a cada proceso. Ver Sección 4.5.
5. Subsistema Secuenciación de operaciones y ruta de órdenes. Tiene como objetivo la obtención de la secuencia de operaciones a ejecutar y la determinación de las diversas rutas intermódulos (y su proporción) a seguir por las piezas de cada orden, en cada subperíodo. Ver Sección 4.6.
6. Subsistema Secuenciación de órdenes. Tiene como objetivo la obtención de la secuencia de carga en el FMS de las piezas que integran la producción en cada subperíodo. Ver Sección 4.7.
7. Subsistema Evaluación simulada de decisiones. Tiene como objetivo el análisis de las alternativas seleccionadas bien por los subsistemas anteriores, bien por el decisor para la utilización del FMS en cada subperíodo. Ver Sección 4.8.

Es preciso dejar constancia de las siguientes consideraciones:

1. El subsistema Evaluación simulada de deci-

siones es imprescindible en una planificación eficiente de la utilización de un FMS.

2. Es muy eficaz utilizar el sistema integrado (1)-(7), tal que los datos que necesita un subsistema se obtienen de la información inicial recogida en la base de datos así como de los resultados obtenidos por los subsistemas ejecutados en el orden (1) a (7) indicado anteriormente. No obstante, su utilización global depende de cada situación; es razonable considerar situaciones en las que el decisor sustituye el resultado de ciertos subsistemas por alternativas que directamente somete al sistema integrado.
3. Cada subsistema generativo (1) a (6) puede estar constituido por dos tipos alternativos de algoritmos: (1) Un algoritmo puramente analítico cuyo resultado se visualiza en pantalla; y (2) Un algoritmo gráfico-interactivo que requiere del decisor ciertas alternativas y que, previo análisis informático de su factibilidad, visualiza en pantalla los resultados intermedios y sugiere nuevas alternativas hasta que, finalmente, la interacción decisor-ordenador produce el resultado del subsistema que se está considerando. El decisor deberá indicar, en cada caso a planificar, cual de los dos tipos de algoritmos desea utilizar en cada subsistema.

#### 4.2. SUBSISTEMA AGRUPACION DE ORDENES.

Objetivo. Distribuir en diversos grupos las órdenes a producir en el período dado de planificación, tal que las órdenes que pertenecen a un mismo grupo serán procesadas simultaneamente en el FMS. Esta distribución implica que los módulos de proceso asignados a un grupo de órdenes no podrán ser utilizados por ningún otro grupo hasta que no se haya procesado totalmente el primer grupo. Por otro lado, si dos grupos de órdenes, además de ser disjuntos, utilizan grupos de módulos que a su vez son disjuntos, entonces los grupos de órdenes pueden procesarse simultaneamente pero en forma independiente; tal como está utilizado en este trabajo, el concepto de simultaneidad no incluye este caso, ya --

que, a estos efectos, se considera que son planificaciones de subsistemas independientes de fabricación flexible.

Ventajas. Con la agrupación de órdenes se logra simplificar la complejidad de la planificación, se reduce el tiempo/costo, si existe de adaptación de los módulos de proceso en la ejecución de las operaciones y, probablemente, se incrementa el grado de utilización de los módulos.

Atributos discriminantes de cada orden. Son los atributos a utilizar en la medida de similitud entre dos órdenes, tales como volumen de producción, dimensiones y características técnicas de las piezas, tipo de proceso y tiempo requerido por cada operación, fechas lo más pronto y más tarde para cumplir el orden, etc.

Elementos:

- K: Número máximo de grupos de órdenes a formar.
- v<sub>max</sub> y v<sub>min</sub>: volumen de producción (i.e., número de piezas) máximo y mínimo, respectivamente, en cada grupo.
- C: Conjunto de atributos discriminantes del conjunto I.
- V: Matriz que recoge los valores de los atributos discriminantes en I.

Sea d(k) la distancia de las órdenes que forman el grupo k al 'centro' del propio grupo. Sean Z(k) y S(k) los vectores de promedios y desviación típica, respectivamente, de los valores de los atributos de las órdenes que formen el grupo k. Sea S̄(k) la matriz de covarianzas de los atributos en el grupo k. La expresión de la distancia d(k) depende de la definición de 'centro' de un grupo; las expresiones más utilizadas son las siguientes:

- Distancia euclídea

$$d(k) = \sum_{i \in I} a(i) \sum_{c \in C} (v(i,c) - z(k,c))^2 \cdot y(i,k) \quad (1)$$

- Distancia euclídea normalizada

$$d(k) = \sum_{i \in I} a(i) \sum_{c \in C} \left( \frac{v(i,c) - z(k,c)}{\underline{s}(k,c)} \right)^2 \cdot y(i,k) \quad (2)$$

- Distancia de Mahalanobis

$$d(k) = \sum_{i \in I} a(i) (V(i) - Z(k))^t \bar{S}(k)^{-1} (V(i) - Z(k)) \cdot y(i,k) \quad (3)$$

donde z(k,c) y s̄(k,c) recogen el promedio y la desviación típica, respectivamente, del atributo c en el grupo k, y V(i) es el vector de los atributos en la orden i; y(i,k) es una variable binaria tal que y(i,k)=1 significa que la orden i se incluye en el grupo k, y será 0 en el caso contrario.

Sea d(i,j) la distancia entre las órdenes i y j, tal que d(i,j)=d(j,i) ≥ 0, d(i,i)=0. La expresión más común es la distancia euclídea,

$$d(i,j) = a(i) \cdot a(j) \cdot \sum_{c \in C} \left( \frac{v(i,c) - v(j,c)}{\underline{s}(c)} \right)^2 \quad (4)$$

donde s̄(c)=1 si la distancia euclídea no está normalizada; caso contrario, s̄(c) recoge la desviación típica del atributo c en el conjunto I de órdenes. Dados los inconvenientes de la distancia euclídea no normalizada /29/, recomendamos la normalización de dicha distancia.

Criterio. El criterio más idóneo para formar los grupos de órdenes consiste en agrupar estas tal que se logre la mayor homogeneización interna en cada grupo y, por tanto, la mayor diversidad posible inter-grupos. ¿Cual es la medida de similitud o de divergencia a utilizar?; es una interrogante cuya respuesta depende de cada FMS. Por tanto, el problema consiste en distribuir las órdenes entre los diversos grupos, tal que el número de grupos -- formado no sea superior al máximo permitido k, cada orden forme parte de un solo grupo, el volumen de producción de cada grupo satisfaga los límites admisibles v<sub>max</sub> y v<sub>min</sub> y se logre alternativamente, optimizar uno de los siguientes objetivos:

1. Minimizar la distancia total al 'centro' de los grupos (i.e., suma de d(k) para todo k en K).
2. Minimizar la distancia total intra-grupos; i.e., la distancia de las órdenes que pertenecen a cada grupo (i.e., suma de d(i,j) pa

ra  $i$  y  $j$  en  $I$ , tal que  $i$  y  $j$  pertenezcan al mismo grupo).

Pretensión. Con la agrupación de órdenes se pretende una utilización equilibrada de los módulos de proceso  $y$ , por tanto, una reducción del volumen de piezas inacabadas y un incremento en el ritmo de producción.

Soporte informático. Hay tres tipos de metodologías que pueden ayudar a resolver el problema. Una de ellas se basa en algoritmos -- analíticos de reconocimiento de patrones y análisis de conglomerados (ver e.g./29/); -- otro grupo se basa en algoritmos de programación matemática (ver /52,55,59,60/); en ambos el decisor sólo es responsable de la decisión sobre la medida de similitud a utilizar; ver más abajo el apartado 'Modelización'. El otro tipo de metodología se basa en un análisis gráfico-interactivo entre el decisor y el ordenador, tal que sus líneas básicas son las siguientes:

1. El decisor decide el tipo de medida de similitud a utilizar.
2. El sistema produce una tabla de doble entrada en la que cada elemento recoge el valor de la medida de similitud entre dos órdenes; la expresión de este valor no se efectúa numericamente sino que se 'colorea' con el color correspondiente al rango (máxima desviación) que el decisor estima como aceptable para incluir dos órdenes en el mismo grupo.
3. El decisor, utilizando un lápiz electrónico desde su pantalla, indica que permutaciones de filas y columnas de la tabla -- han de efectuarse hasta que la aglomeración de colores (i.e., órdenes) es de su conformidad.

Modelización

Sea  $y(k)$  una variable binaria, tal que  $y(k)=1$  significa que el modelo decide crear el grupo  $k$ , y será 0 en caso contrario. El modelo matemático consiste en optimizar, alternativamente,

$$\min \sum_{k \in K} d(k) \tag{5}$$

(minimizar la distancia total de las órdenes al 'centro' de los grupos; la distancia  $d(k)$  está definida por las expresiones (1), (2) ó (3)), ó

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in I} d(i, j) \cdot y(i, k) \cdot y(j, k) \tag{6}$$

(minimizar la distancia total intra-grupos; la distancia  $d(k)$  está definida por (4)) sujeto a

$$\sum_{k \in K} y(i, k) = 1 \quad \forall i \in I \tag{7}$$

tal que una orden sólo puede y debe pertenecer a un grupo.

$$\sum_{k \in K} y(k) \leq K \tag{8}$$

$$y(i, k) \leq y(k) \quad \forall i \in I, k \in K \tag{9}$$

tal que no haya un número de grupos mayor que el permitido.

$$\forall k \in K \quad \min_{i \in I} y(i, k) \leq \sum_{i \in I} a(i) \cdot y(i, k) \leq \max_{i \in I} y(i, k) \tag{10}$$

tal que el volumen de producción de cada grupo, caso de formarse, satisfaga los límites de acotación. Y, finalmente,

$$y(i, k), y(k) \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, k \in K \tag{11}$$

El modelo (5), (7) - (11) es un problema de programación no-lineal binaria; el modelo -- (6) - (11) es un problema de programación -- cuadrática binaria. Dadas las dimensiones -- del problema de Agrupación de órdenes y el corto tiempo de resolución que se requiere, no existen hoy día algoritmos de estos tipos que puedan proporcionar la solución buscada.

Es preciso notar que la expresión cuadrática (6) puede sustituirse por la expresión lineal (ver /36/)

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i, j \in I} d(i, j) \cdot g(i, j, k) \tag{12}$$

tal que se cumpla

$$y(i, k) + y(j, k) \leq 1 + g(i, j, k), \\ g(i, j, k) \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in I, k \in K \tag{13}$$

El modelo entonces se convierte en un proble

ma de programación lineal binaria en gran escala; es preciso notar que se ha eliminado una expresión cuadrática al precio de  $|I| \cdot (|I|-1)/2$  nuevas condiciones e idéntico número de variables binarias. Los sistemas generales de programación lineal entera (e.g. MPSX/MIP, ver /47/) no pueden proporcionar la solución en el tiempo requerido por el decisor; este debe ser muy pequeño, dado que la utilización del subsistema de Agrupación de órdenes se ha de efectuar conjuntamente con los otros subsistemas del sistema gráfico-interactivo (ver Sección 4.1). Existen en cambio, algoritmos especialmente diseñados para abordar el problema de programación lineal binaria; ver /39,30,31,19,50/.

En /29/ se describen los algoritmos denominados J1 y J5 que, con un tiempo de resolución satisfactorio y necesidades de memoria reducidas, resuelven el problema (5)-(9), (11) -- aunque satisfaciendo con carácter de igualdad la condición (8); en este caso, el problema consiste en distribuir las órdenes en un predeterminado número de grupos tal que se optimice (5) ó (6); los algoritmos J1 y J5 se basan en la metodología de intercambios parciales de órdenes entre grupos y pertenecen al campo denominado Análisis de Conglomerados.

En /55-57/ se plantea el problema de minimizar la distancia intra-grupos (6) tal que, predeterminados el número de grupos a formar, sea K y el tamaño de cada grupo, sea v(k) se satisfaga la condición (7) (i.e., no más de un grupo para cada orden), la condición de integridad binaria (11), y la condición del volumen de producción en cada grupo i.e.,

$$\sum_{i \in I} a(i) \cdot y(i,k) = v(k) \quad \forall k \in K \quad (14)$$

Considerando que  $U(1), U(2), \dots, U(K)$  son los autovectores correspondientes a los K mayores valores propios de la matriz de distancias definida por  $\{-d(i,j)$  para todo  $i$  y  $j$  en  $I\}$ . se demuestra /5/ que este problema puede aproximarse por el problema de transporte lineal

$$\max \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (u(k,i) / \sqrt{v(k)}) \cdot y(i,k) \quad (15)$$

sujeto a las condiciones (7), (14) e  $y(i,k) \geq 0$  para  $i$  en  $I$  y  $k=1,2,\dots,K$

Los algoritmos J1, J5 y el algoritmo de transporte lineal (ver e.g. /27/) pueden formar parte de un algoritmo más general, tal que, de una forma gráfico-interactiva con el decisor, varíe el número de grupos a formar, así como el volumen de producción en cada uno de ellos hasta encontrar una solución satisfactoria en este punto.

### 4.3. SUBSISTEMA ASIGNACION DE LA PRODUCCION.

Objetivo. Determinar el volumen de producción (i.e., número de piezas) a procesar, sea  $a(i,t)$  en cada orden para cada subperíodo (e.g., un día) del período de planificación dado.

#### Elementos:

- T: Conjunto de subperíodos en el período de planificación dado.
- I: Conjunto de órdenes a procesar simultáneamente en el FMS. Puede ser el resultado del subsistema Agrupación de órdenes; ver Sección 4.2.
- F: Conjunto de capacidades de proceso a utilizar por el conjunto I.
- M: Conjunto de módulos de proceso con capacidad para ejecutar, al menos, alguno de los procesos del conjunto F.
- M(f): Conjunto de módulos con capacidad para ejecutar el proceso f para f en F. Este conjunto se obtiene en base al vector correspondiente al proceso f en la matriz X.
- S(m): Número de módulos que pertenecen al tipo m del conjunto M.
- e(m,f): coeficiente de eficacia del módulo m para ejecutar el proceso f para m en M y f en F.
- a(i): Producción requerida de la orden i en el período de planificación considerado.
- Imax: Número máximo de órdenes a procesar en cada subperíodo del período considerado.
- amax(i) y amin(i): producción máxima y mínima, respectivamente, de la orden i en cada subperíodo del período considerado, si la

orden  $i$  se procesa en dicho subperíodo.

- $N(i)$ : Conjunto de operaciones en la orden  $i$  para  $i$  en  $I$ .
- $rd(i)$  y  $dd(i)$ : Subperíodos en  $T$  lo más pronto posible en que puede comenzar y lo más tarde posible en que puede terminar, respectivamente, la ejecución de la orden  $i$ .
- $p(n)$ : Proceso en  $F$  asociado a la operación  $n$ .
- $t(i,n)$ : Tiempo de proceso requerido por la operación  $n$  en la orden  $i$ , si se utiliza el módulo de proceso más eficiente en la ejecución del proceso asociado  $p(n)$ .
- $Tt(t)$ : Número de unidades de tiempo disponibles en cada subperíodo  $t$  para  $t$  en  $T$ .

Sea  $l(m,t)$  una estimación de la carga de trabajo del módulo  $m$  en el subperíodo  $t$ , y  $l_{prom}$  la estimación de la carga de trabajo promedio por módulo y subperíodo a lo largo del período de planificación; estos elementos serán calculados por el algoritmo base de este subsistema.

Criterio. La asignación de producción a cada subperíodo deberá ser tal que el volumen de producción de la orden  $i$ , sea  $a(i,t)$  en el subperíodo  $t$  no viole las restricciones máxima  $a_{max}(i)$  y mínima  $a_{min}(i)$ , el número de órdenes a procesar en cada subperíodo no sea superior al máximo permitido  $I_{max}$ , se asigne todo el volumen de producción  $a(i)$  de cada orden  $i$ , la carga de trabajo de cada módulo se pueda ejecutar en el tiempo disponible del subperíodo al que ha sido asignada, y se logre, alternativamente, optimizar uno de los siguientes objetivos:

1. Minimizar la desviación absoluta total (i.e., suma de  $|l(m,t) - l_{prom}|$  para  $m$  en  $M$  y  $t$  en  $T$ ) de la carga de trabajo en los módulos de proceso a lo largo de los diversos subperíodos con respecto a la carga promedio  $l_{prom}$ .
2. Minimizar la mayor desviación absoluta (i.e.,  $\max |l(m,t) - l_{prom}|$  para  $m$  en  $M$  y  $t$  en  $T$ ) de la carga de trabajo en los módulos de proceso a lo largo de los diversos subperíodos con respecto a la carga promedio  $l_{prom}$ .

3. Minimizar la desviación mayor (i.e.,  $\max(l(m_1,t_1)) - \min(l(m_2,t_2))$  para  $m_1$  y  $m_2$  en  $M$  y  $t_1$  y  $t_2$  en  $T$ ) en la carga de trabajo en un módulo de proceso con respecto a los demás y a lo largo de los diversos subperíodos.
4. Minimizar la carga máxima de trabajo (i.e.,  $\max(l(m,t))$  para  $m$  en  $M$ ) en un módulo de proceso y un subperíodo.

Pretensión. Los criterios arriba indicados pretenden conseguir una asignación de la producción por subperíodo tal que se mantenga bajo ciertos límites el número de órdenes a procesar en cada subperíodo, el volumen de producción en cada orden tenga un mínimo eficaz y se equilibre la utilización de los módulos de proceso.

Soporte informático. El algoritmo a utilizar debe basarse en programación lineal binaria mixta (ver e.g. /48/), pero adaptado a la estructura especial que presenta la matriz de condiciones del problema.

Modelización

Sea  $\bar{e}(m,f)$  la probabilidad 'genérica' de utilizar la capacidad de proceso  $f$  en el módulo de proceso  $m$ ; sea la expresión

$$\bar{e}(m,f) = \frac{e(m,f)}{\sum_{m1 \in M} e(m1,f)} \quad \forall m \in M(f), f \in F \quad (16a)$$

Por tanto, las expresiones de  $l(m,t)$  y  $l_{prom}$  serán las siguientes:

$$l(m,t) = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{n \in N(i) | m \in p(n)} \bar{e}(m,p(n)) \cdot \frac{t(i,n)}{e(m,p(n))} \cdot a(i,t)}{S(m)} \quad (16b)$$

donde  $a(i,t) \geq 0$  recoge el volumen de producción de la orden  $i$  asignado al subperíodo  $t$ .

$$l_{prom} = \frac{\sum_{m \in M} \sum_{t \in T} l(m,t)}{|M| \cdot |T|} \quad (17)$$

Sean  $d1(m,t)^+$ ,  $d1(m,t)^- \geq 0$  el exceso y defecto, respectivamente, de la carga de trabajo  $l(m,t)$  sobre la carga promedio  $l_{prom}$ . Sea  $dm1 \geq 0$  la mayor desviación en términos absolutos de la carga de trabajo de cualquier módu

lo de proceso y subperíodo. Sean  $l_{max}, l_{min} \geq 0$  las cargas de trabajo máxima y mínima, respectivamente, en cualquier módulo de proceso y subperíodo.

Sea  $y(i,t)$  una variable binaria tal que  $y(i,t)=1$  significa que la orden  $i$  será (parcial o totalmente) producida en el subperíodo  $t$ , y será 0 en el caso contrario.

El problema consiste en

$$\min \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} d_l(m,t)^+ \quad (18)$$

(minimizar la desviación absoluta total)

o

$$\min d_{ml} \quad (19)$$

(minimizar la mayor desviación absoluta)

o

$$\min l_{max} - l_{min} \quad (20)$$

(minimizar la desviación mayor)

o

$$\min l_{max} \quad (21)$$

(minimizar la carga máxima)

sujeito a

$$l(m,t) + d_l(m,t)^- - d_l(m,t)^+ = l_{prom} \quad \forall m \in M, t \in T \quad (22)$$

tal que se define el exceso y defecto de la carga de trabajo  $l(m,t)$  sobre la carga promedio.

$$d_l(m,t)^- \leq d_{ml} \quad \forall m \in M, t \in T \quad (23)$$

$$d_l(m,t)^+ \leq d_{ml} \quad \forall m \in M, t \in T \quad (24)$$

tal que se define la mayor desviación absoluta.

$$l_{min} \leq l(m,t) \leq l_{max} \quad \forall m \in M, t \in T \quad (25)$$

tal que se definen las cargas mínimas y máxima.

$$l(m,t) \leq T_t(t) \quad \forall m \in M, t \in T \quad (26)$$

tal que la carga de trabajo en cada módulo pueda ser ejecutada en cada subperíodo al que ha sido asignada, dado el tiempo máximo concedido en cada subperíodo. Nota: La condición sería del mismo tipo, si  $T_t(t)$  se sustituye por  $T_t(m,t)$ .

$$\sum_{t \in T} a(i,t) = a(i) \quad \forall i \in I \quad (27)$$

tal que el nivel de producción en el total de subperíodos sea el requerido.

$$\sum_{t \in T} y(i,t) \leq l_{max} \quad \forall i \in I \quad (28)$$

tal que la producción de cada orden no se distribuya en un número de subperíodos superior al permitido.

$$a_{min}(i) \cdot y(i,t) \leq a(i,t) \leq a_{max}(i) \cdot y(i,t) \quad \forall i \in I, t \in T \quad (29)$$

tal que la producción de una orden en un subperíodo determinado, si es que se produce, satisfaga los límites de acotación.

$$d_l(m,t)^+, d_l(m,t)^-, d_{ml}, l_{min}, l_{max} \geq 0 \quad \forall m \in M, t \in T \quad (30)$$

tal que estas variables deben ser no-negativas.

$$a(i,t) \geq 0 \quad \forall i \in I, t \in T \quad (31)$$

tal que la producción no puede ser negativa.

$$y(i,t) \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (32)$$

tal que  $y(i,t)=0$  para  $t < rd(i)$  y  $t > dd(i) \quad \forall i \in I$ ; i.e., no se permite la ejecución de una orden antes o después de sus correspondientes subperíodos límite.

Los modelos alternativos (18), (22), (19), (22)-(24), (20), (25) y (21), (25) junto con la expresión (16a), las condiciones de definición (16b)-(17) y las condiciones de imposición (26)-(32) son problemas de programación lineal binaria mixta con una estructura muy particular en la matriz de condiciones que el algoritmo debe de explotar. Es preciso notar que  $a_{max}(i) \leq a(i)$ ; no obstante, el valor de  $a_{max}(i)$  influye fuertemente en el tiempo de resolución (e.g. ver /39,50,35/ y debería ajustarse a su valor real.

#### 4.4. SUBSISTEMA ASIGNACION DE LA RUTA INTER-MODULOS.

**Objetivo.** Obtener la ruta a seguir por una pieza cuando ha de transportarse desde un módulo dado a otro, si hay diversas rutas al-

ternativas; este subsistema sólo tiene aplicación en el caso de transporte serial recirculante múltiple (ver Sección 2.4).

Elementos. Coordenadas de cada módulo de proceso, y de los puntos inicial y final (i.e. intersecciones) de cada segmento transversal en el sistema de transporte; en base a estos datos se puede definir la distancia inter-módulos, la longitud de cada segmento transversal, y la distancia del punto inicial (res. del punto final) de cada segmento transversal a cada uno de los dos módulos cuya ruta es transversada por dicho punto inicial (res. punto final); ver Figura 6.

Criterio. Minimización de la longitud de la ruta a seguir entre dos módulos, obteniendo como resultado  $q(m1,m2)$ : penalización de la ruta  $m1-m2$  para todo binomio de módulos en el conjunto M.

Pretensión. Minimizar el tiempo de transporte de cada pieza.

Soporte informático. Un algoritmo combinatorio especialmente diseñado para este problema. Sea UL una unidad lógica; son unidades lógicas las intersecciones, los módulos de proceso y los almacenes intermedios. El algoritmo considera que se cumplen los siguientes requisitos: la ruta con distancia mínima entre dos ULs sólo pasa una vez por cada intersección, y no hay más de dos sub-rutas -- que lleguen o partan de una intersección; -- ver Figura 6. Sea  $UL\#$  el número (código) de una UL dada. Sean  $m1$  y  $m2$  los módulos de proceso origen y destino, respectivamente -- cuya ruta  $m1-m2$  con distancia mínima se pretende obtener. El algoritmo se basa en la numeración ascendente (con origen arbitrario), en la dirección del transporte, de todas las ULs del sistema; si la UL, sea A está más -- próxima al origen arbitrario en la dirección del transporte que la UL, sea B entonces  $A\# < B\#$ . Sea UCL una unidad lógica candidato a ser la unidad lógica inmediata a formar -- parte de las rutas que utilizan una UL dada; la UCL de un almacén intermedio es su intersección adyacente en la dirección del transporte, tal que  $UCL\# < UL\#$ ; la UCL de un módulo de proceso es su intersección adyacente en la dirección del transporte, tal que  $UCL\# < UL\#$ ; las UCLs de una intersección son sus dos ULs adyacentes en la dirección del

transporte, tal que  $UCL\# > UL\#$ . Sea ULD la unidad lógica de destino de una pieza que es té localizada en una UL dada. Por tanto, el problema se reduce a la elección de las ULDs que han de formar parte de la ruta  $m1-m2$ ; la ULD de una UL dada será una de sus UCLs. Si la UL es un almacén intermedio o un módulo -- de proceso, entonces  $ULD=UCL$ . Si la UL es -- una intersección, entonces su ULD será una -- de sus dos UCLs; sea  $A = \min(UCL\#)$  y  $B = \max(UCL\#)$ ; si  $m2 < A$  o  $m2 > B$  entonces  $ULD=B$ ; si  $A < m2 < B$ ,  $ULD=A$ ; si  $m2=A$ ;  $ULD=A$  si  $m2=B$ ,  $ULD=B$ . Ver /41/. La idea central de este algoritmo puede extenderse a otros casos sin gran dificultad.

#### 4.5. SUBSISTEMA CARGA DE MODULOS.

Objetivo. Seleccionar las capacidades de proceso a utilizar por cada tipo de módulo en cada subperíodo del período de planificación da do, tal que estas capacidades sean las únicas a utilizar por las órdenes a procesar simultaneamente en dicho subperíodo. Como subproducto se obtiene la carga de trabajo asignada a cada proceso en cada tipo de módulo, así como la proporción del volumen de producción -- (e.g. número de piezas) de cada orden que para cada operación se ejecutará en cada tipo de módulo.

Elementos:

- I: Conjunto de órdenes a procesar simultaneamente en el FMS en el subperíodo considerado. Puede ser el resultado del subsistema Asignación de la producción (ver Sección 4.3) o, alternativamente, del subsistema Agrupación de órdenes (ver Sección 4.2).
- F: Conjunto de capacidades de proceso a utilizar por el conjunto I.
- M: Conjunto de módulos de proceso con capacidad para ejecutar, al menos, alguno de -- los procesos en el conjunto F.
- S(m): Número de módulos que pertenecen al tipo m para m en M.
- T(m): Número máximo de instrumentos que pueden utilizarse en cada módulo del tipo m para m en M.

- $x(m,f)$ : indicador de la existencia (1) o inexistencia (0) de la capacidad de proceso  $f$  en el módulo  $m$  para  $f$  en  $F$  y  $m$  en  $M$ , tal que se obtienen  $M(f)$ , conjunto de módulos con la capacidad de proceso  $f$  y  $F(m)$  conjunto de capacidades de proceso en el tipo de módulo  $m$ .
- $e(m,f)$ : coeficiente de eficacia del módulo  $m$  para efectuar el proceso  $f$  para  $m$  en  $M$  y  $f$  en  $F$ .
- $u(f)$ : Número de instrumentos necesarios para la ejecución del proceso  $f$ .
- $a(i,t)$ : Producción requerida de la orden  $i$  en el subperíodo  $t$  considerado. Puede ser el resultado del subsistema Asignación de la producción; ver Sección 4.3.
- $N(i)$ : Conjunto de operaciones en la orden  $i$  para  $i$  en  $I$ .
- $p(n)$ : Proceso en  $F$  asociado a la operación  $n$ .
- $t(i,n)$ : Tiempo de proceso requerido por la operación  $n$  en la orden  $i$ , si se utiliza el módulo de proceso más eficiente en la ejecución del proceso asociado  $p(n)$ .
- $p_{max}$ : Número máximo de tipos de módulos a los que se puede asignar un proceso. Un caso típico,  $p_{max}=1$  (ver más abajo).
- $c_{min}$ : Proporción mínima de la carga de trabajo de un módulo que puede ser asignada a un proceso.
- $Tt(t)$ : Número de unidades de tiempo disponibles en el subperíodo  $t$  considerado.

Sea  $l(m)$  la carga de trabajo del módulo  $m$ , en el subperíodo considerado, y  $l_{prom}$  la carga promedio; estos elementos serán calculados por el algoritmo base de este subsistema.

Criterio. La asignación de capacidades de proceso a utilizar por cada módulo debe ser tal que el número total de instrumentos a utilizar por los procesos asignados a cada tipo de módulo no exceda su capacidad máxima, el número máximo de tipos de módulos asignados a cada proceso no sea superior al máximo permitido  $p_{max}$ , la proporción de carga de

trabajo de un proceso que se ha asignado a un tipo de módulo no sea inferior al mínimo permitido  $c_{min}$ , se ejecute el nivel de producción  $a(i,t)$  asignado a cada orden  $i$  para  $i$  en  $I$  en el subperíodo considerado, y se logre, alternativamente, optimizar uno de los siguientes objetivos:

1. Minimizar la desviación absoluta total (i.e., suma de  $|l(m)-l_{prom}|$  para  $m$  en  $M$ ) de la carga de trabajo en los módulos de proceso con respecto a la carga promedio.
2. Minimizar la mayor desviación absoluta (i.e.,  $\max|l(m)-l_{prom}|$  para  $m$  en  $M$ ) de la carga de trabajo en los módulos de proceso con respecto a la carga promedio.
3. Minimizar la desviación mayor (i.e.,  $\max(l(m_1))-\min(l(m_2))$  para  $m_1$  y  $m_2$  en  $M$ ) de la carga de trabajo en un módulo de proceso con respecto a los demás módulos.
4. Minimizar la carga máxima de trabajo (i.e.,  $\max(l(m))$  para  $m$  en  $M$ ) en un módulo de proceso.

Pretensión. Los criterios arriba indicados pretenden conseguir una asignación de capacidades de proceso a utilizar en cada módulo para el subperíodo de tiempo considerado tal que, cumpliendo las restricciones arriba indicadas, se obtenga un balance ponderado en la utilización de los módulos de proceso y, por tanto, se reduzca el volumen de piezas inacabadas y se incremente el ritmo de producción.

Soporte informático. Es preciso considerar dos tipos de algoritmos: Un algoritmo de tipo analítico basado en programación lineal binaria, pero adaptado a la estructura especial que presenta la matriz de condiciones del problema; ver /79,1,6,80,82-84,12,56,57/. Y un tipo de algoritmo alternativo que se basa en un análisis gráfico-interactivo entre el decisor y el ordenador, tal que sus líneas básicas son las siguientes:

1. El decisor pregunta al sistema la carga parcial de trabajo de los diversos módulos de proceso así como el grado de saturación de las condiciones.
2. En base a la información suministrada por el sistema, el decisor propone la asigna-

ción de una capacidad de proceso al módulo o módulos que considera conveniente, - así como su proporción de carga de trabajo correspondiente.

3. El sistema contesta mostrando el resultado de la asignación parcial e indicando - si la última asignación fue factible o no.
4. Una vez efectuada la asignación de todas las capacidades de proceso requeridas, se visualiza en pantalla las capacidades de proceso a utilizar por cada módulo de proceso así como su correspondiente carga de trabajo; ver un ejemplo para pmax=1 en la Tabla 2. Este tipo de sistema transfiere al decisor la responsabilidad en la obtención de la solución al problema (por tanto, no garantiza su optimalidad), pero la interacción decisor-ordenador puede proporcionar buenos resultados.

Modelización

Sea  $l(m,f)$  la carga de trabajo del módulo  $m$  en la capacidad de proceso  $f$  para el subperíodo  $t$  considerado; sea la expresión

$$l(m,f) = \sum_{i \in I} \sum_{n \in N(i) | f=p(n)} a(i,t) \frac{t(i,n)}{e(m,p(n))} \cdot cinm(i,n,m) \quad \forall m \in M(f), f \in F \quad (33)$$

donde  $0 \leq cinm(i,n,m) \leq 1$  es una variable que recoge la proporción del volumen de trabajo -- (e.g., número de piezas) de la orden  $i$  cuya operación  $n$  se ejecutará en el módulo de proceso  $m$ . Por tanto, las expresiones de  $l(m)$  y  $l_{prom}$  serán las siguientes:

$$l(m) = \frac{\sum_{f \in F(m)} l(m,f)}{S(m)} \quad m \in M \quad (34)$$

$$l_{prom} = l(m) / |M| \quad (35)$$

Sean  $d1(m)^+, d1(m)^- \geq 0$  el exceso y defecto, respectivamente, de la carga de trabajo  $l(m)$  sobre la carga promedio  $l_{prom}$ . Sea  $dm1 \geq 0$  la mayor desviación en términos absolutos de la carga de trabajo de cualquier módulo de proceso. Sean  $l_{max}, l_{min} \geq 0$  las cargas de trabajo máxima y mínima, respectivamente en cualquier módulo de proceso.

Sea  $y(m,f)$  una variable binaria tal que  $y(m,f)=1$  significa que la capacidad de proce

so será (parcial o totalmente) asignada al módulo  $m$  en el subperíodo  $t$ , y será 0 en el caso contrario.

El problema consiste en

$$\min \sum_{m \in M} d1(m)^+ \quad (36)$$

(minimizar la desviación absoluta total)

$$\min dm1 \quad (37)$$

(minimizar la mayor desviación absoluta)

$$\min l_{max} - l_{min} \quad (38)$$

(minimizar la desviación mayor)

$$\min l_{max} \quad (39)$$

(minimizar la carga máxima)

sujeto a

$$l(m) + d1(m)^- - d1(m)^+ = l_{prom} \quad \forall m \in M \quad (40)$$

tal que se define el exceso y defecto de la carga de trabajo  $l(m)$  sobre la carga promedio.

$$d1(m)^- \leq dm1 \quad \forall m \in M \quad (41)$$

$$d1(m)^+ \leq dm1 \quad \forall m \in M \quad (42)$$

tal que se define la mayor desviación absoluta.

$$l_{min} \leq l(m) \leq l_{max} \quad \forall m \in M \quad (43)$$

tal que se definen las cargas mínima y máxima.

$$\sum_{m \in M(p(n))} cinm(i,n,m) = 1 \quad \forall n \in N(i), i \in I \quad (44)$$

tal que el nivel de ejecución de la operación  $n$  en la orden  $i$  sea el requerido.

$$\sum_{m \in M(f)} y(m,f) \leq p_{max} \quad \forall f \in F \quad (45)$$

tal que no se asigne la capacidad de proceso  $f$  a un número de módulos mayor que el permitido.

$$c_{min} \cdot Tt(t) \cdot S(m) \cdot y(m,f) \leq l(m,f) \leq c_{max} \cdot Tt(t) \cdot S(m) \cdot y(m,f)$$

$$\forall m \in M(f), f \in F \quad (46)$$

tal que la carga de trabajo del proceso  $f$  en el tipo de módulo  $m$  satisfaga la proporción mínima, si se asigna el proceso  $f$  al módulo  $m$ ;

donde  $c_{max}=1$  satisface las necesidades del problema (ver más abajo).

$$l(m) \leq Tt(t) \quad \forall m \in M \quad (47)$$

tal que la carga total de trabajo en cada módulo puede ser ejecutada en el subperíodo  $t$  considerado. Nota: La condición sería del mismo tipo, si  $Tt(t)$  se distribuye por  $Tt(m, t)$ .

$$\sum_{f \in F(m)} u(f)y(m, f) \leq T(m) \quad \forall m \in M \quad (48)$$

tal que la carga asignada a un tipo de módulo no utilice más del número de instrumentos permitido.

$$d1(m)^+, d1(m)^-, dml, lmin, lmax \geq 0 \quad \forall m \in M \quad (49)$$

$$cinm(i, n, m) \geq 0 \quad \forall m \in M(p(n)), n \in N(i), i \in I \quad (50)$$

tal que la producción no puede ser negativa.

$$y(m, f) \in \{0; 1\} \quad \forall m \in M(f), f \in F \quad (51)$$

Los modelos alternativos (36), (40), (37), (40)-(42), (38), (43) y (39), (43), junto con las condiciones de definición (33)-(35) y las condiciones de imposición (44)-(51) son problemas de programación lineal binaria mixta con una estructura muy particular en la matriz de condiciones que el algoritmo debe de explotar. Es preciso notar que  $c_{max}(i) \leq 1$ ; no obstante, el valor de  $c_{max}$  influye fuertemente en el tiempo de resolución (e.g. ver /39, 50/) y debería ajustarse a su valor real. Se puede observar que estos modelos tienen una simetría total con los correspondientes modelos del subsistema Asignación de la producción (ver Sección 4.3) y, por tanto, se debe utilizar el mismo algoritmo de resolución. Ahora bien, las dimensiones del modelo pueden llegar a ser muy grandes, debido a la necesidad de utilizar la variable  $cinm(i, n, m)$  (e.g., sea el caso en el que  $|M(f)|$ ,  $|N(i)|$  son grandes y  $|I|$  no es pequeño); en esta situación, y dado el tiempo de resolución requerido, es preciso sacrificar bien la garantía de optimalidad en la solución (utilizando la metodología gráfico-interactiva), bien la aproximación del modelo al problema (ver más abajo).

Carga de módulos de proceso para  $p_{max}=1$ . Se reduce fuertemente la dimensión del modelo,

si se considera que las capacidades de proceso no pueden ser asignadas a más de un tipo de módulo (i.e.,  $p_{max}=1$ ). En este caso, si el objetivo consiste en minimizar la carga máxima de trabajo, el modelo matemático sería:  $\min l_{max}$  sujeto a las condiciones (47), (48), (51) y

$$l(m) \leq l_{max} \quad \forall m \in M \quad (52)$$

$$\sum_{m \in M(f)} y(m, f) = 1 \quad \forall f \in F \quad (53)$$

junto con las condiciones de definición (34) para  $l(m)$ , y (54) para  $l(m, f)$ .

$$l(m, f) = \sum_{i \in I} \sum_{n \in N(i)} \sum_{f=p(n)} a(i, t) \frac{t(i, n)}{e(m, p(n))} y(m, f) \quad \forall m \in M(f), f \in F \quad (54)$$

La resolución del modelo (39), (51)-(53), (47), (48) junto con las definiciones (54) y (34) requiere poco esfuerzo de ordenador. Las ideas básicas del algoritmo se describen en /6/, con las modificaciones siguientes:

1. Utilización de la metodología descrita en /76/ para obtener la primera estimación de los límites inferior y superior sean LI y LS, respectivamente, de la variable a minimizar,  $l_{max}$ . En cualquier caso,  $LS \leq Tt(t)$ .
2. Resolución iterativa de una secuencia de problemas, tal que el problema  $i$ -ésimo consiste en

$$\min \sum_{m \in M} l(m) \quad (55)$$

sujeto a las condiciones (34), (48), (51), (53), (54) y

$$l(m) \leq l_{max}(i) \quad \forall m \in M \quad (56)$$

para un valor dado de  $l_{max}(i)$  tal que  $l_{max}(i) \leq LS$  a ajustar dinámicamente. Se utiliza la metodología de enumeración implícita en la resolución de cada problema  $i$ -ésimo; dado que la condición (48) es lineal, se obtiene en cada nudo un límite inferior fuerte del valor de la función objetivo ejecutando los dos siguientes pasos:

- a. Solución del problema de Asignación Generalizada (AG) resultante de la relajación de la condición (56); se utiliza -

el algoritmo descrito en /65/ (ver -- también /73/).

- b. Reasignación de las variables  $y(m, f)$  si la solución del problema AG no satisface la condición (56); se utiliza la metodología descrita en /6/.
3. Es preciso indicar que la solución en cada nudo satisface la condición de integridad (51) y, quizá, no satisfaga la condición (56). Por tanto, en lugar de bifurcar sobre una variable  $y(m, f)$ , es más eficiente utilizar el tipo de bifurcación -- múltiple descrita en otro contexto en /66/ y aquí aplicada a la condición (56) más violada; también se puede aplicar a la condición violada con menor número de variables todavía no asignadas (ver /11/ en otro contexto).
4. Los problemas de AG a resolver en cada nudo y en sus nudos sucesores sólo difieren en las variables bifurcadas. Por tanto, la solución de uno de ellos se puede utilizar como solución inicial en los demás.
5. El límite LI de  $l_{max}$  será el valor de  $l_{prom}$  (35) correspondiente a los valores de  $l(m)$  obtenidos en la resolución del problema  $i$ -ésimo, de acuerdo con la proposición C de /6/. El límite LS se obtiene de la propia solución  $l_{max}$  del problema  $i$ -ésimo. Y el valor a analizar en el problema  $i+1$ -ésimo será  $l_{max}(i+1) = (LS+LI)/2$ , normalmente.
6. Se obtiene una solución quasi-óptima cuando el rango de variabilidad de  $l_{max}$  (i.e.  $(LS-LI)/LI$ ) es menor que una tolerancia dada.

La parte algorítmica de la metodología gráfi-co-interactiva entre el decisor y el ordenador para la resolución, alternativa al algoritmo descrito arriba, del problema de carga de módulos de proceso para  $p_{max}=1$  tiene, básicamente, los siguientes pasos (ver un ejemplo de datos y resultados en la Tabla 2):

1.  $l(m) := 0 \quad \forall m \in M$
2.  $l(m) := l(m) + l(m, f)$ , y  
 $T(m) := T(m) - u(f)$   
 para  $m \in M(f) \mid |M(f)| = 1 \quad \forall f \in F$

(Si un proceso sólo puede ser ejecutado por un tipo de módulo, se le asigna dicho proceso; en este caso, se actualizan su carga de - trabajo, y el número de unidades de tiempo e instrumentos todavía disponibles). Es preciso notar que ahora  $l(m)$  recoge la carga total en el tipo de módulo  $m$ .

3. Actualizar el conjunto  $F$  de procesos sin asignar todavía, así como el conjunto  $M(f)$  de módulos a los que todavía pueden asignarse el conjunto  $F$  de procesos, tal que

$$F = F \setminus \{f \mid |M(f)| = 1\}, \text{ y}$$

$$M(f) = M(f) \setminus \{m \mid T(m) \cdot S(m) \cdot l(m, f) \cdot T(m) \cdot u(f) \quad \forall f \in F\}$$

4. Si  $F = \{\emptyset\}$ , la carga de todos los módulos se ha efectuado. Visualizar resultados y stop.
5. Si existe un proceso tal que  $|M(f)| = 1 \quad f \in F$ , bifurcar a 2.
6.  $l_{trial}(f) := \min\{l(m) + l(m, f)\} / S(m) \quad \forall m \in M(f)$ , y  
 $m_{trial}(f) := m \quad \forall f \in F$   
 donde  $m_{trial}(f)$  recoge el módulo argumento de  $l_{trial}(f)$ .
7. Visualizar  $F$ ,  $M(f)$ ,  $S(m)$ ,  $T(m)$ ,  $T(m)$ ,  $l(m)$ ,  $l(m, f)$ ,  $l_{trial}(f)$  y  $m_{trial}(f)$  para  $m$  en  $M(f)$  y  $f$  en  $F$ , y sugerir la asignación del proceso  $f_1$  al tipo de módulo  $m_1$  tal que  $m_1 = m_{trial}(f_1)$  para  
 $l_{trial}(f_1) = \max\{l_{trial}(f) \quad \forall f \in F\}$ .  
 En cualquier caso, sean  $f_1$  y  $m_1$  el proceso y el tipo de módulo elegidos.
8. Actualizar  $M(f_1) = \{m_1\}$ , y bifurcar a 2.

#### 4.6. SUBSISTEMA SECUENCIACION DE OPERACIONES Y RUTA DE ORDENES.

Objetivo. (1) Determinar la secuencia en la que han de ejecutarse las diversas operaciones de cada orden, tal que cada operación se procese en los módulos a los que se ha asignado la correspondiente capacidad de proceso en el subperíodo considerado. (2) Determinar la proporción del volumen de producción de cada orden que ha de transportarse en cada segmento inter-módulos.

TABLA 2

EJEMPLO DE CARGA DE MÓDULOS (ASIGNACION DE CAPACIDADES DE PROCESO A MÓDULOS). NOTA:  $l(m,f)$  RECOGE LA CARGA DE TRABAJO DEL MODULO  $m$  SI LA CAPACIDAD DE PROCESO  $f$  SE ASIGNA A DICHO MODULO.

Condiciones del Problema

$l(m,f)$	$m \backslash f$	1	2	3	4	5	6	7	8	T(m)	
	1	3.0	4.0	2.5	6.0	4.0	2.0	2.4	5.0		20
	2	3.4	3.5	3.0	5.5	4.1	3.0	2.0	4.7		20
	3	2.8	4.2	2.7	6.0	5.0	2.5	2.6	5.2		20

$u(f)$	10	7	6	10	8	5	5	9
--------	----	---	---	----	---	---	---	---

Resultado de la asignación

$l(m)$	$l_{16} = 2.0$	$l_{27} = 2.0$	$l_{31} = 2.8$
	$l_{13} = 2.5$	$l_{22} = 3.5$	
	$l_{18} = 5.0$	$l_{25} = 4.1$	$l_{34} = 6.0$

$m =$                     1                    2                    3

Asignación de capacidades de proceso a módulos

$m \backslash f$	1	2	3	4	5	6	7	8	l(m)	
1			*			*		*		9.5
2		*			*		*			9.6
3	*			*						8.8

Elementos:

- I: Conjunto de órdenes a procesar simultaneamente en el FMS en el subperíodo considerado. Puede ser el resultado del subsistema Asignación de la producción (ver Sección 4.3) o, alternativamente, del subsistema Agrupación de órdenes (ver Sección 4.2).
- F: Conjunto de capacidades de proceso a utilizar por el conjunto I.
- M: Conjunto de módulos de proceso con capacidad para ejecutar, al menos, alguno de los procesos en el conjunto F.
- $a(i,t)$ : Producción requerida de la orden  $i$  en el subperíodo  $t$  considerado. Puede ser el resultado del subsistema Asignación de la producción; ver Sección 4.3.
- $M(f)$ : Conjunto de módulos de proceso en  $M$  para los que se ha seleccionado la capacidad de proceso  $f$  para  $f$  en  $F$ . Puede ser el resultado del subsistema Carga de módulos; ver Sección 4.5. Un caso típico,  $p_{max}=1$  tal que  $M(f) = 1$ .
- $N(i)$ : Conjunto de operaciones en la orden  $i$  para  $i$  en  $I$ .
- $p(n)$ : Proceso en  $F$  asociado a la operación  $n$ .
- $cinm(i,n,m)$ : Proporción del volumen de trabajo de la orden  $i$  cuya operación  $n$  se ejecutará en el módulo de proceso  $m$ ; es preciso notar que es necesario que  $m$  pertenezca al conjunto  $M(p(n))$ . Puede ser el resultado del subsistema Carga de módulos. Un caso típico,  $p_{max}=1$  tal que  $cinm(i,n,m)=1$ .
- $h(m_1,m_2)$ : indicador de la existencia (1) o inexistencia (0) de una ruta de transporte entre los módulos  $m_1$  y  $m_2$  para  $m_1$  y  $m_2$  en  $M$ .
- Q: Matriz de tiempo/costo del transporte inter-módulos; para  $h(m_1,m_2)=1$ , el elemento  $q(m_1,m_2)$  recoge dicho tiempo/costo. Puede ser el resultado del subsistema Asignación de la ruta inter-módulos; ver Sección 4.4.
- $G(i)=(N(i),A(i))$ : Grafo de precedencias directas en el conjunto  $N(i)$  de las operaciones de la orden  $i$ . En el desarrollo de la sección se supone que el conjunto  $N(i)$  no se descompone en subconjuntos de operaciones paralelas; por tanto,  $P(i,k)$  recoge el conjunto de operaciones directamente precedentes a la operación  $k$  para  $k$  en  $N(i)$ . Si la orden se representase mediante el grafo  $GG(i)=(GN(i),GA(i))$ , tal que  $G(i,g)=(NG(i,g),A(i,g))$  es la representación del subgrafo  $g$  para  $g$  en  $GN(i)$  (ver Sección 2.2), la secuenciación de operaciones y correspondiente ruta en un subgrafo tiene la misma modelización que el caso del grafo único  $G(i)$ .
- $r(i,k)$ : Operación inmediatamente precedente a la operación  $k$  en la orden  $i$ , si  $r(i,k)>0$ .

Criterio. La secuencia de operaciones seleccionada en una orden dada así como la ruta inter-módulos (y su proporción) deben ser consistentes con el grafo de precedencias directas e inmediatas, no violar las restricciones en la factibilidad de rutas inter-módulos, y deben minimizar el costo/tiempo total de transferencia (transporte) de las piezas de cada orden entre los diversos módulos de proceso requeridos para su ejecución.

Pretensión. Los subsistemas anteriores tienen como objetivo prioritario equilibrar la carga de trabajo en los módulos de proceso. La secuenciación de operaciones y ruta de órdenes tienen como objetivo la disminución del tiempo de transporte y, por tanto, influyen fuertemente en la reducción del volumen de piezas inacabadas y en el incremento del ritmo de producción.

Soporte informático. En este subsistema existen dos tipos de objetivos: secuenciación de operaciones en una orden y determinación de la ruta inter-módulos (y su proporción) para su ejecución. Para un binomio de operaciones a ejecutar consecutivamente, sean las operaciones  $n_1$  y  $n_2$  hay un conjunto de módulos de proceso, sea  $M(p(n_1))$  desde los que, una vez ejecutada la operación  $n_1$ , se ha de transportar el volumen de producción al conjunto de módulos, sea  $M(p(n_2))$ , donde se ejecutará la operación  $n_2$ ; la proporción de la

ruta inter-módulos para el binomio  $n_1$  y  $n_2$  consiste en la proporción del volumen de producción que se transporta desde cada módulo  $m_1$  a cada módulo  $m_2$  para  $m_1$  y  $m_2$  en  $M(p(n_1))$  y  $M(p(n_2))$ , respectivamente; dadas las matrices  $H$  y  $Q$  así como las proporciones  $cinm(i,n,m)$ , es el clásico problema de transporte, de fácil resolución (ver apartado 'Modelización' más abajo). En la secuenciación de operaciones se pueden considerar tres tipos de algoritmos. Por un lado, algoritmos de tipo analítico, basados en programación combinatoria o en programación lineal, cuyo objetivo consiste en obtener la secuencia óptima (dado el criterio utilizado) en la ejecución de operaciones en cada orden; ver /37, 38, 34, 58, 32, 33/. Otro tipo de algoritmos consiste en obtener el árbol de secuencias de operaciones que satisfagan las condiciones del grafo de precedencias (ver Figuras 7 y 8 /13/) y, a posteriori, seleccionar la secuencia que, sin violar las restricciones en la factibilidad de rutas inter-módulos, minimiza el costo/tiempo total de transporte; esta metodología puede ser muy eficaz para dimensiones no muy grandes en  $|N(i)|$  e  $|I|$  ya que permite seleccionar la secuencia de operaciones en base a criterios cualitativos. Y, finalmente, el otro tipo de metodología se basa en un análisis gráfico-interactivo entre el decisor y el ordenador, tal que sus líneas básicas son las siguientes para la secuenciación de operaciones en una orden dada:

1. Visualización del grafo de precedencias conjuntamente con una tabla que (en base a los resultados de los subsistemas anteriores o a iniciativa del decisor) recoja los módulos de proceso en los que se puede ejecutar cada operación así como la tabla de costo/tiempo de transporte inter-módulos, y la tabla de costo/tiempo mínimo correspondiente a cada binomio de operaciones (ver el apartado 'Modelización' más abajo).
2. Ordenación parcial por parte del decisor de una o varias operaciones; si el proceso asociado a la operación considerada se pudiera ejecutar en más de un módulo, el decisor debe indicar en que módulos ha de ejecutarse y la proporción de carga de cada uno de ellos (e.g., número de piezas de la orden dada cuya operación en estu--

dio se efectuará en los diversos módulos alternativos).

3. El sistema analiza la viabilidad de dicha ordenación. Si no es viable indica las causas. En caso de que sea viable, permite la visualización del grafo de precedencias (ahora, reducido a las operaciones todavía no asignadas) y sugiere la siguiente operación a asignar de acuerdo con el criterio de minimización del costo/tiempo de transporte.
4. Una vez que se haya obtenido una secuencia total de las operaciones, el sistema sugiere posibles modificaciones en orden a mejorar la valoración del criterio seleccionado.

De nuevo, es preciso indicar que la metodología gráfico-interactiva transfiere al decisor la responsabilidad de la obtención de la solución al problema planteado (y, por tanto, no puede garantizar la optimalidad), pero la interacción entre el decisor y el ordenador puede proporcionar soluciones eficaces. En las Figuras 12-16 se recoge la visualización de la operativa a seguir por este tipo de metodología en la secuenciación de operaciones de la orden cuyo grafo de precedencias directas se recoge en la Figura 7 (ver también -- Figura 8); en este caso se considera que sólo existen relaciones de precedencia directa entre las operaciones; la Figura 2 recoge -- las capacidades de los módulos de proceso -- del FMS; se supone que el subsistema Carga de módulos ha asignado los procesos  $f=1,2,3$  y 4 al tipo de módulo  $m_2$  entre otros. La secuencia seleccionada es  $S(1)=(1,2,4,3,6,5)$ ; dado que los procesos asociados a las operaciones de la orden  $i=1$  han sido asignados al mismo tipo de módulo, resulta que el coste total de transporte es cero (siendo éste el óptimo). Ahora bien, es preciso considerar que este análisis gráfico-interactivo puede ser meramente local, ya que no tiene en cuenta (al menos explícitamente) la eficacia en la ejecución de los procesos por los diversos módulos, ni el grafo de precedencias y volumen de producción de las demás órdenes en el conjunto  $I$ ; por otro lado, no se tiene en cuenta tampoco (al menos, explícitamente) el tiempo/costo de adaptación de los módulos a la ejecución de los diversos procesos que, aunque relativamente pequeño, puede existir.

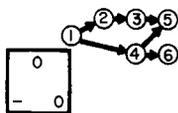


FIGURA 12

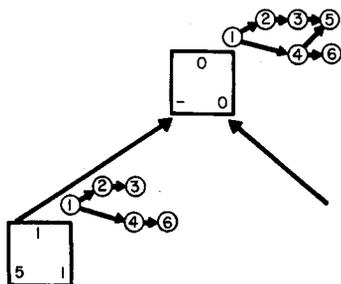


FIGURA 13

FIGURA 12. GRAFO DE PRECEDENCIAS ORIGINAL DE LA ORDEN RECOGIDA EN LA FIGURA 7.

FIGURA 13. ORDENACION DE LA OPERACION Nº 5. VER FIGURA 12.

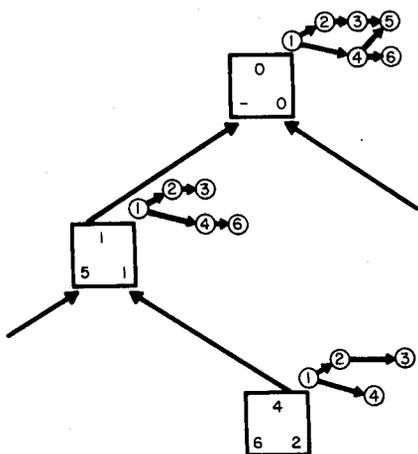


FIGURA 14. ORDENACION DE LA OPERACION Nº 6. VER FIGURAS 12 Y 13.

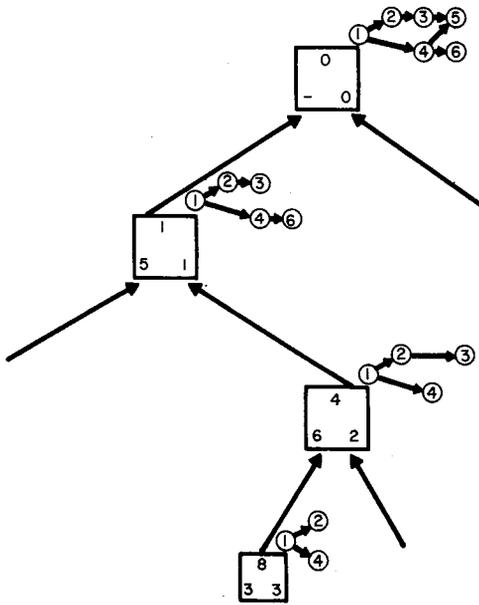


FIGURA 15. ORDENACION DE LA OPERACION N° 3. VER FIGURAS 12, 13 Y 14.

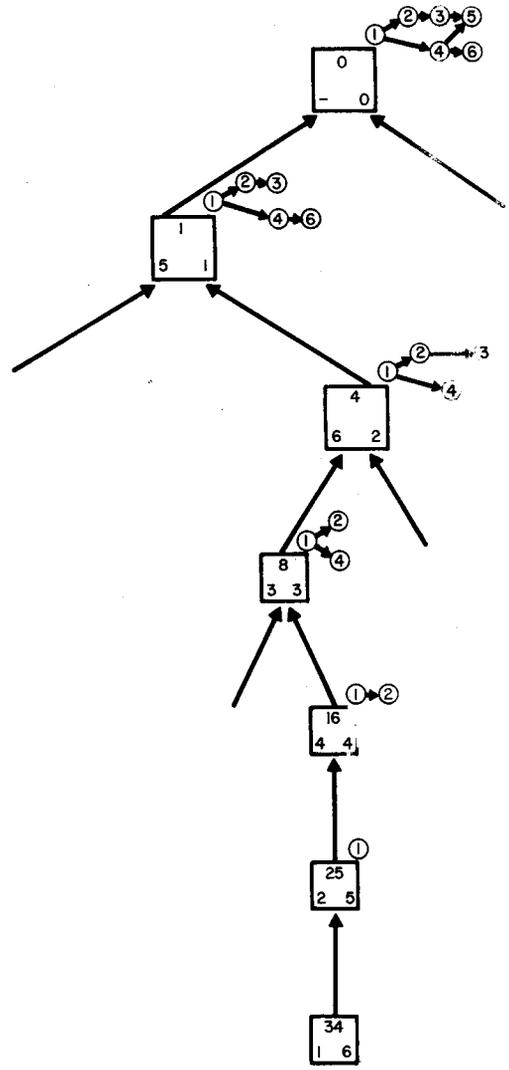


FIGURA 16. ORDENACION DE LAS OPERACIONES N° 4, 2 Y 1. VER FIGURAS 12 A 15.

Modelización:

Sea  $0 := \{0(1), 0(2), \dots, 0(j), \dots, 0(|N(i)|)\}$  una secuencia de operaciones en la orden  $i$ , donde  $0(j)$  recoge la operación  $n$  para  $n$  en  $N(i)$  a ejecutar en la  $j$ -ésima posición;  $0$  consiste, por tanto, en una permutación de los nudos (i.e., operaciones) del grafo  $G(i)$ , tal que  $0(j) = n_1$  y  $0(j+1) = n_2$  significa que en la secuencia dada las operaciones  $n_1$  y  $n_2$  -- tiene una relación de precedencia inmediata;  $n_1 \rightarrow n_2$  denotará esta ordenación. Una Secuencia Factible de Operaciones (por brevedad, SFO), será aquella tal que toda ordenación  $n_1 \rightarrow n_2$  satisface las relaciones de precedencia directa dadas por el grafo  $G(i) = (N(i), A(i))$ , las relaciones de precedencia inmediata dadas por  $r(i, k)$  para  $k$  en  $N(i)$  y, por otra parte, se satisfacen las relaciones de factibilidad del transporte inter-módulos (ver más abajo). Es preciso notar que  $n_1 \rightarrow n_2$  para  $n_1 = r(i, n_2) > 0$ .

Sea la matriz cuadrada binaria  $S$  tal que su elemento  $s(n_1, n_2)$  será  $s(n_1, n_2) = 1$  si, en base a información local proporcionada por el conjunto  $A(i)$ ,  $r(i, k)$  para  $k$  en  $N(i)$  y la matrix  $H$ , no se ha detectado la infactibilidad de  $n_1 \rightarrow n_2$  en una SFO;  $s(n_1, n_2) = 0$  en el caso contrario. Sean  $N_2(n_1)$  y  $N_1(n_2)$  los conjuntos de nudos que, en principio, pueden ser inmediatamente sucesores e inmediatamente predecesores de los nudos (i.e., operaciones)  $n_1$  y  $n_2$ , respectivamente, en una SFO.

$$N_2(n_1) = \{n_2 \in N(i) | s(n_1, n_2) = 1 \quad \forall n_1 \in N(i)\} \quad (57a)$$

$$N_1(n_2) = \{n_1 \in N(i) | s(n_1, n_2) = 1 \quad \forall n_2 \in N(i)\} \quad (57b)$$

El problema denominado Linear Ordering Problem (por brevedad LOP) consiste precisamente, en obtener la mejor SFO de acuerdo con un criterio determinado; en nuestro caso, el criterio consiste en la minimización del costo/tiempo del transporte inter-módulos recogido en la matriz  $Q$ . Por tanto, la función de penalidad de una secuencia de -- operaciones, sea  $0$  es dada por la expresión

$$C(0) = \sum_{n_1 \in N(i)} \sum_{n_2 \in N_2(n_1)} c(n_1, n_2) \cdot y(n_1, n_2) \quad (58)$$

donde  $y(n_1, n_2)$  es una variable binaria tal que  $y(n_1, n_2) = 1$  si  $n_1 \rightarrow n_2$ , y será 0 en el caso contrario, y  $c(n_1, n_2)$  es el costo de transporte de la ordenación  $n_1 \rightarrow n_2$ . Para --

$p_{max} = 1$ ,  $c(n_1, n_2) = q(m_1, m_2)$ , donde  $m_1$  y  $m_2$  son los módulos de proceso tal que  $m_1$  y  $m_2$  pertenecen a los conjuntos  $M(p(n_1))$  y  $M(p(n_2))$ , -- respectivamente, y  $|M(p(n_1))| = 1$  y  $|M(p(n_2))| = 1$ . El problema consiste, por tanto, en

$$\min \{C(0) | 0 \text{ es una SFO}\} \quad (59)$$

En /37,38/ se describe una función objetivo diferente, así como el algoritmo para su resolución; el algoritmo es de programación lineal con planos de corte.

Obtención de la ruta inter-módulos para la ordenación  $n_1 \rightarrow n_2$ ; obtención de  $c(n_1, n_2)$  para  $|M(p(n_1))| > 1$  y  $|M(p(n_2))| > 1$ . Este es el -- caso en el que la ejecución de

las dos operaciones  $n_1 \rightarrow n_2$  se distribuye entre varios módulos de proceso. Dados  $0 < c_{inm}(i, n_1, m_1) \leq 1$  y  $0 < c_{inm}(i, n_2, m_2) \leq 1$  para  $m_1$  en  $M(p(n_1))$  y  $m_2$  en  $M(p(n_2))$ , el problema consiste en obtener el costo  $c(n_1, n_2)$  tal que

$$c(n_1, n_2) = \min \sum_{m_1, m_2} q(m_1, m_2) \cdot y(m_1, m_2) \quad (60)$$

donde  $0 \leq y(m_1, m_2) \leq 1$  es una variable continua que indica la proporción de  $a(i, t)$  que, una vez ejecutada la operación  $n_1$  en el módulo de proceso  $m_1$ , se transporta desde este módulo al módulo  $m_2$  para ejecutar la operación  $n_2$ ; i.e.,  $y(m_1, m_2)$  recoge el volumen relativo de la ruta  $m_1 \rightarrow m_2$  para la ordenación  $n_1 \rightarrow n_2$ . La obtención de  $c(n_1, n_2)$  (60) (i.e., el coste total del transporte del volumen de producción  $a(i, t)$  de la orden  $i$ , en el subperíodo considerado  $t$ , para ejecutarse la operación  $n_2$  una vez ejecutada la operación  $n_1$ ), está sujeta a las siguientes condiciones:

$$\sum_{m_2 \in M(p(n_2))} h(m_1, m_2) \cdot y(m_1, m_2) = c_{inm}(i, n_1, m_1) \quad \forall m_1 \in M(p(n_1)) \quad (61)$$

$$\sum_{m_1 \in M(p(n_1))} h(m_1, m_2) \cdot y(m_1, m_2) = c_{inm}(i, n_2, m_2) \quad \forall m_2 \in M(p(n_2)) \quad (62)$$

$$y(m_1, m_2) \geq 0 \quad \forall m_1 \in M(p(n_1)), m_2 \in M(p(n_2)) \quad (63)$$

tal que del módulo  $m_1$  (res. al módulo  $m_2$ ) no se pueda enviar mayor proporción que la asignada por  $c_{inm}(i, n_1, m_1)$  (res.  $c_{inm}(i, n_2, m_2)$ ). El problema (60)-(63) es el clásico problema del transporte con pequeñas dimensiones, cuya resolución no ofrece ninguna dificultad; ver e.g. /28/. Las dimensiones del problema son  $|M(p(n_1))| \cdot |M(p(n_2))|$ ; el cardinal de

$\{s(n1,n2)=1\}$  indica el número de problemas a resolver para cada orden en el conjunto I. Si el problema no tuviese solución, entonces se actualiza la matriz S (y, por tanto, automáticamente sus expresiones equivalentes  $N2$  y  $N1$ ) tal que  $s(n1,n2)=0$ .

Formulación del LOP

No hay una única formulación del LOP (58)-(59). La formulación que parece más interesante requiere convertir w.I.o.g. el problema en el clásico ATPS (asymmetric traveling salesman problem) con condiciones adicionales. En este caso. se necesita la siguiente variable adicional:  $x(n,h)$  será una variable binaria tal que vale 1 si la operación  $n$  se ejecuta en el  $h$ -ésimo nivel y, en caso contrario, será zero. La formulación matemática es la siguiente.

$$\min z = \sum_{n1,n2 \in N(i)} c(n1,n2) \cdot y(n1,n2) \quad (64)$$

sujeto a

$$\forall n1,n2 \in \{0;1\} \quad y \quad x(n,h) \in \{0;1\} \quad (65)$$

$$\sum_{n2 \in N2(n1)} y(n1,n2) = 1 \quad \forall n1 \in N(i) \quad (66)$$

$$\sum_{n1 \in N1(n2)} y(n1,n2) = 1 \quad \forall n2 \in N(i) \quad (67)$$

$$\sum_{n1,n2 \in T} y(n1,n2) \leq |T|-1 \quad T \subset N(i), \quad 2 < |T| < |N(i)| \quad (68)$$

$$\sum_{n \in N(i)} x(n,h) = 1 \quad \forall n \in N(i) \quad (69)$$

$$\sum_{n \in N(i)} x(n,h) = 1 \quad \forall h \in N(i) \quad (70)$$

$$\sum_{n1 \in N(i)} h1 \cdot x(n1,n2) + 1 \leq \sum_{n2 \in N(i)} h2 \cdot x(n2,t2) \quad \forall n1 \in P(i,n2), n2 \in N(i) \quad (71)$$

$$x(n1,h) + x(n2,h+1) \leq 1 + y(n1,n2) \quad \forall n1,n2 \in N(i) \mid s(n1,n2) = 1 \quad (72)$$

$$x(n1,h) + x(n2,h+1) \leq 1 \quad \forall n1,n2 \in N(i) \mid s(n1,n2) = 0 \quad (73)$$

$$x(r(i,k),h) = x(k,h+1) \quad \forall k \in N(i) \mid r(i,k) > 0 \quad (74)$$

Nota:  $h=1,2,\dots,|N(i)|-1$  en (72)-(74). En el modelo (64)-(74) se pueden reconocer dos bloques. Las condiciones (65-68) se refieren al ATSP, y las condiciones (69)-(74) se refieren a las relaciones de precedencia.

Por tanto, el algoritmo de resolución del LOP (58)-(59) podría ser:

1. Obtención de los conjuntos  $N2(n1)$  y  $N1(n2)$ , en base a los conjuntos  $P(i,k)$ , la información suministrada por  $r(i,k)$  para todo  $n1, n2$  y  $k$  en  $N(i)$ , y la matriz  $H$ .
2. Obtención de la ruta inter-módulos para cada ordenación potencial  $n1+n2$  (i.e.,  $s(n1,n2)$  y, por tanto, obtención de la matriz de costos  $\{c(n1,n2) \mid n1,n2 \in N(i)\}$ , resolviendo los problemas de transporte (60)-(63).
3. Conversión del LOP (58)-(59) en el problema (64)-(74).
4. Resolución del problema ATSP con condiciones adicionales (64)-(74).

Existen, hoy día, algoritmos altamente especializados en la resolución exacta del problema TSP asimétrico; ver e.g. /11,3/ entre otros. Por otro lado, se pueden utilizar algoritmos heurísticos que producen soluciones muy eficientes, aunque sin garantizar su optimalidad tales como la especialización al caso asimétrico del algoritmo descrito en /63/ entre otros; ver también /61/.

En /33/ se describe un algoritmo que explota la estructura del LOP; esta es más simple que la estructura del TSP, sobre todo para casos de grandes dimensiones en  $|N(i)|$  y matriz  $S$  poco densa. Las ideas básicas son las siguientes:

1. Preproceso del LOP. Se efectúa una caracterización fuerte de los ordenamientos  $n1+n2$  que bien son necesarios, bien no pueden existir en una SFO; i.e., se pretende una reducción fuerte de  $|N2(n1)|$  y  $|N1(n2)|$ .

2. Obtención de una SFO. Se utilizan dos estrategias diferentes:

- a) Resolución del problema AG resultante de la relajación de la condición (68) en el ATSP (64)-(68); y, a continuación, eliminación de los ciclos que hubiere, utilizando para ello la estrategia denominada 'patching operation' descrita en /51/.
  - b) Utilización de la metodología de enumeración implícita para obtener una SFO; el criterio de bifurcación utilizado - en la secuenciación parcial, (ver Figuras 12-16) consiste en minimizar 'lo menor localmente posible' la función de costos.
3. Mejora de la SFO. Se utiliza un algoritmo de 2-intercambios con minimización local de costos, de acuerdo con la metodología descrita en /71/.
4. Mejora de la cota inferior del valor óptimo de la función objetivo; la cota fue obtenida en la primera fase de 2a. Se -- utilizan las ideas básicas descritas en /3/.
5. Reducción del número de variables libres en el LOP. Se analiza la cota inferior - obtenida en 4, el valor de la función objetivo de la SFO obtenida en 3, y los costos reducidos de las variables  $y(n_1, n_2)$  - obtenidos en 4.
6. Obtención de una solución cuasi-óptima. Se utiliza la metodología branch-and-bound; en cada nudo se utiliza la estrategia de bifurcación múltiple descrita en /11/, y los algoritmos de preproceso, mejora de la cota inferior y reducción de variables utilizados en 1, 4 y 5, respectivamente.

#### 4.7. SUBSISTEMA SECUENCIACION DE ORDENES.

Objetivo. Determinar la secuencia en la cual se han de cargar en el FMS las piezas que - forman parte del volumen de producción de un subperíodo dado en el período de planificación que se está analizando.

#### Elementos:

- I: Conjunto de órdenes a procesar simultáneamente en el FMS en el subperíodo dado. Puede ser el resultado del subsistema Asignación de la producción (ver Sección 4.3) o, alternativamente, del subsistema Agrupación de órdenes (ver Sección 4.2).
- F: Conjunto de capacidades de proceso a - utilizar por el conjunto I.
- M: Conjunto de módulos de proceso con capacidad para ejecutar, al menos, alguno - de los procesos en el conjunto F.
- $e(m, f)$ : coeficiente de eficacia del módulo m para ejecutar el proceso f para m en M y f en F.
- $F(m)$ : conjunto de capacidades de proceso en el módulo m para m en M. Puede ser el resultado del subsistema Carga de módulos; ver Sección 4.5.
- $a(i, t)$ : Producción requerida (i.e., número de piezas) de la orden i en el subperíodo t dado para i en I y t en T. Puede ser el resultado del subsistema Asignación de la producción; ver Sección 4.3.
- $cinm(i, n, m)$ : proporción del volumen de trabajo de la orden i cuya operación n se ejecutará en el módulo de proceso m; es preciso notar que es necesario que m pertenezca al conjunto  $M(p(n))$ . Puede ser el resultado del subsistema Carga de módulos.
- $N(i)$ : Conjunto de operaciones en la orden i para i en I.
- $p(n)$ : Proceso en F asociado a la operación n.
- $t(i, n)$ : Tiempo de proceso requerido por la operación n en la orden i, si se utiliza el módulo de proceso más eficiente con capacidad para efectuar el proceso asociado  $p(n)$ .

Sea J el conjunto de piezas a producir en el subperíodo t, tal que  $|J| = \text{suma}(a(i, t))$  para to

do  $i$  en  $I$ ). Sea  $i(j)$  la orden  $i$  en  $I$  a la cual pertenece la pieza  $j$  para  $j$  en  $J$ .

Sea  $l_{total}(m)$ , la carga total en un módulo de tipo  $m$  en el subperíodo considerado. Sea  $l_{total}$ , la carga total en el FMS en el subperíodo considerado. Estos dos elementos son calculados por el algoritmo de secuenciación de órdenes en base a los elementos arriba indicados; ver el apartado 'Modelización' más abajo.

Sea  $J(j)$  el subconjunto de piezas en el conjunto  $J$  que ya se han cargado en el FMS en la unidad de tiempo en la que se efectúa la carga de la pieza  $j$  para todo  $j$  en  $J$ . Es preciso indicar que el conjunto  $J(j)$  incluye la pieza  $j$ .

Para la unidad de tiempo en la que se efectúa la carga en el FMS de la pieza  $j$  para todo  $j$  en  $J$ , sean los siguientes elementos calculados por el algoritmo base de este sub sistema:  $l_{real}(m, j)$ , la carga real de trabajo del módulo  $m$ ; y  $l_{real}(j)$ , la carga real de trabajo en el FMS.

Sea  $l_{teórica}(m, j)$ , la carga teórica de trabajo del módulo  $m$  en la unidad de tiempo en la que se efectúa la carga de la pieza  $j$  en el FMS, tal que  $l_{teórica}(m, j) = (l_{total}(m) / l_{total}) \cdot l_{real}(j)$ . I.e.,  $l_{teórica}(m, j)$  recoge la carga de trabajo que debería haberse efectuado en la unidad de tiempo en la que se carga la pieza  $j$ , si la producción programada equilibra, no sólo la utilización total de cada módulo, sino también la utilización de cada uno de ellos a través de las unidades de tiempo del subperíodo considerado.

Criterio. La secuencia de carga de piezas en el FMS debe ser tal que minimice la suma total de las desviaciones absolutas de las cargas de trabajo real y teórica en cada módulo y en cada unidad de tiempo en la que se efectúa la carga de una pieza en el subperíodo considerado, i.e.,  
 $\min(\text{suma}(|l_{real}(m, j) - l_{teórica}(m, j)|))$  para todo  $m$  en  $M$  y  $j$  en  $J$ .

Por tanto, el objetivo consiste en equilibrar la carga de trabajo de los módulos a través de las unidades de tiempo del subperíodo considerado. Es preciso recordar que el subsistema Carga de módulos equilibra la carga total de los módulos; el subsistema

Secuenciación de órdenes equilibra dicha carga a través del tiempo en un subperíodo dado.

Pretensión. Reducir el tiempo de estancia de una pieza en el FMS; i.e., reducir el nivel de piezas inacabadas.

Soporte informático. La secuenciación de órdenes de acuerdo con el criterio arriba indicado es un problema cuyo tiempo de resolución es una función no-polinomial del tamaño del problema. Por tanto, la metodología a utilizar no pretende satisfacer totalmente dicho criterio, sino meramente obtener una secuenciación aceptable sin garantizar su optimalidad; se basa en un análisis gráfico-interactivo entre el decisor y el ordenador, tal que sus líneas básicas son las siguientes:

1. Visualizar en pantalla las cargas de trabajo  $l_{total}(m)$  y  $l_{total}$ .
2. El algoritmo sugiere la pieza a añadir al conjunto de piezas ya secuenciadas, tal que minimice (localmente) la función objetivo elegida como criterio a considerar - en la selección de dicha pieza. I.e., el algoritmo propone la pieza, sea  $j$  con el menor valor en la suma  $(|l_{real}(m, j) - l_{teórica}(m, j)|$  para todo  $m$  en  $M$ ) entre todas las piezas todavía no seleccionadas; ver /88/. No obstante, el decisor tiene la responsabilidad de seleccionar la pieza a secuenciar.
3. Si, una vez secuenciada una pieza, se detectara que un determinado ordenamiento parcial se ha repetido un número dado de 'ciclos', el algoritmo sugiere dicho ordenamiento para las piezas todavía no secuenciadas. De nuevo, es responsabilidad del decisor la alternativa a seguir.
4. Una vez obtenida una secuencia completa de las órdenes que se están analizando, el algoritmo sugiere efectuar una nueva optimización local, esta vez, mediante intercambios parciales en la secuencia.
5. Finalmente, se visualiza en pantalla la secuencia de órdenes obtenida, así como la carga  $l_{total}(m, j)$  para cada módulo  $m$  en  $M$  y cada unidad de tiempo en la que se efectúa, a lo largo del subperíodo de tiempo

po considerado, la carga de una pieza en el FMS.

Modelización

Sean las siguientes expresiones para  $ltotal(m)$ ,  $lreal(m,j)$ ,  $lreal(j)$  y  $lteórica(m,j)$

$$ltotal(m) = \sum_{i \in I} \sum_{\substack{n \in N(i) \\ p(n) \in F(m)}} \bar{a}(i,n,m) \quad \forall m \in M \quad (75a)$$

donde  $\bar{a}(i,n,m)$  tiene la expresión

$$\bar{a}(i,n,m) = \frac{t(i,n)}{e(m,p(n))} a(i,t) \cdot cinm(i,n,m) \quad \forall n \in N(i), i \in I, m \in M(p(n)) \quad (75b)$$

$$ltotal = \sum_{m \in M} ltotal(m) \quad (76)$$

$$lreal(m,j) = \sum_{g \in J(j)} \sum_{\substack{n \in N(i(g)) \\ p(n) \in F(m)}} \frac{t(i(g),n)}{e(m,p(n))} \cdot y(g,n,m) \quad \forall j \in J, m \in M \quad (77)$$

donde  $N(i(g))$  recoge el conjunto de operaciones en la orden  $i(g)$ ;  $e(g,n,m)$  es una variable binaria tal que  $y(g,n,m)=1$  si la operación  $n$  de la pieza  $g$ -ésima se ejecutó en el módulo de proceso  $m$ , y será 0 en el caso contrario.

$$lreal(j) = \sum_{m \in M} lreal(m,j) \quad \forall j \in J \quad (78)$$

$$lteórica(m,j) = \frac{ltotal(m)}{ltotal} lreal(j) \quad \forall j \in J, m \in M \quad (79)$$

El problema consiste en obtener la secuencia de carga  $\{0(1), 0(2), \dots, 0(s), \dots, 0(|J|)\}$  de las piezas en el FMS a lo largo de las unidades de tiempo del subperíodo  $t$  considerado, tal que

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} |lreal(j,m) - lteórica(j,m)| \quad (80)$$

sujeto a

$$\sum_{g \in J(j) | i(g)=i} y(g,n,m) = cinm(i,n,m) \cdot a(i,t) \quad \forall m \in M(p(n)), n \in N(i), i \in I \quad (81a)$$

$$y(g,n,m) \in \{0;1\} \quad \forall m \in M(p(n)), n \in N(i(g)), g \in J \quad (81b)$$

Un algoritmo 'local' para la resolución del problema (80)-(81) junto con las definiciones (75)-(79) es el siguiente:

1. Obtener la secuencia de carga con minimización local de la función (80):

a. Dada una secuencia parcial de carga, sea  $0(1), 0(2), \dots, 0(s)$ , sea  $j$  la pieza a secuenciar tal que  $0(s)=j$ , donde  $s$  es el próximo nivel de la secuencia. Sea  $z(g)$  la desviación total para la pieza  $g$  de la carga real de trabajo sobre la carga teórica si  $0(k)=g$ . La selección de la pieza  $j$  deberá ser tal que

$$z(j) = \min_{m \in M} \sum |lreal(m,j) - lteórica(m,j)| \quad (82)$$

y satisfaga la condición

$$\sum_{g \in J(j) | i(g)=i} y(g,m,n) \leq cinm(i,n,m) \cdot a(i,t) \quad (83)$$

tal que  $y(j,n,m)=1$  para el módulo  $m$  en  $M(p(n))$  con el que se obtiene  $z(j)$  en (83) para  $\forall n \in N(i)$  e  $i=i(j)$  en  $I$ .

b. Fijar  $0(s):=j$

c. Si  $s < |J|$ , actualizar  $s:=s+1$  y bifurcar a la.

2. Obtención de la frecuencia de carga. Si después de secuenciar la carga de una determinada pieza en el FMS, se detectara que la secuencia, sea  $\{0(1), 0(2), \dots, 0(s)\}$  se repite en un número dado de 'ciclos', se recomienda adoptar la frecuencia del ciclo para la secuencia total de carga y, --por tanto, no se continua con el procedimiento 1. El resultado de la secuenciación de órdenes podría ser e.g.  $x_1$  piezas de la orden A,  $x_2$  piezas de B,  $x_3$  de A y  $x_4$  de C, tal que se repita esta secuencia -- hasta secuenciar las  $|J|$  piezas.

3. Mejora de la secuencia de carga. Esta mejora se efectúa en base a una nueva optimización local pero, esta vez, utilizando intercambios parciales en la secuencia. Los intercambios utilizados consisten en mover la pieza, sea  $j$  para  $j \in J$  desde el  $s$ -ésimo puesto en la secuencia al  $r$ -ésimo puesto -- para  $s < r$ , tal que se mueve hacia adelante

el conjunto de piezas secuenciadas entre ambos puestos.

El número de re-secuenciaciones es  $|J| \cdot (|J|-1)/2$  para  $|J|=|I|$ ; este es muy inferior para  $|I| \ll |J|$ . Es preciso considerar que, en cada re-secuenciación  $s$  (para  $s=1$  a  $|J|-1$ ), sólo es preciso obtener en dos -- piezas la desviación de la carga real sobre la carga teórica.

Las líneas básicas del algoritmo serían las siguientes:

Para  $s=1$  a  $|J|-1$  dada la secuencia parcial  $\{0(1), 0(2), \dots, 0(s-1)\}$ :

$$j:=0(s)$$

$$z(s, j) := \sum_{\{q\}} z(q) \quad (84)$$

donde  $\{q\} = \{0(h) \text{ para } h=s \text{ a } |J|\}$

Para  $r=s+1$  a  $|J|$ :

Si  $i(0(s))=i(0(s+1))=\dots=i(0(r))$ :  $z(0(r)) := z(0(r))$ ; en caso contrario:

Efectuar la re-secuenciación tentativa  $r$ :

$$o(h) := 0(h+1) \text{ para } h=s \text{ a } r-1$$

$$q := 0(r)$$

$$0(r) := j$$

y, por tanto, obtener  $z(q)$  y  $z(j)$  tal que

$$z(q) = \min_{m \in M} |l_{\text{real}}(q, m) - l_{\text{teorica}}(q, m)| \quad (85a)$$

y satisfaga la condición (84)

$$z(j) = \min_{m \in M} |l_{\text{real}}(j, m) - l_{\text{teorica}}(j, m)| \quad (85b)$$

y satisfaga la condición (84), donde  $q$  se sustituye por  $j$ .

Obtener  $z(r, j)$  para la re-secuenciación tentativa  $r$ , tal que

$$z(r, j) = \sum_{\{q\}} z(q) + \sum_{\{p\}} z(p) \quad (86)$$

donde  $\{q\} = \{0(h) \text{ para } h=s \text{ a } r\}$

y  $\{p\} = \{0(h) \text{ para } h=r+1 \text{ a } |J|\}$

Fin

Sea  $rr$  tal que

$$rr = \arg \min \{z(r, j) \text{ para } r=s \text{ a } |J|\} \quad (87)$$

Considerar la re-secuenciación  $rr$  como definitiva, al menos, en la iteración actual. Si  $rr \neq s$ ; en este caso,  $z(\alpha) = z(q)$  para  $q=0(h)$  y  $h=s$  a  $r$ .

Fin

#### 4.8 SUBSISTEMA EVALUACION SIMULADA DE DECISIONES.

Motivación. Uno de los aspectos más negativos en la planificación de la producción en un FMS consiste en la gran diferencia existente entre los resultados planificados y los resultados reales en la producción. Por tanto, es preciso un sistema que evalúe 'a priori' un conjunto de decisiones candidatas utilizando elementos determinísticos y aleatorios en base a una descripción (modelización) muy aproximada /62,85/.

Análisis paramétrico. Analizar la sensibilidad del sistema ante modificaciones en los elementos controlables por el planificador, tales como número de pallets para cada orden, número de carts y velocidad, rutas alternativas (y proporción) en cada orden, secuencias alternativas en la ejecución de operaciones, en la ruta de piezas a través del sistema de transporte inter-módulos, en la capacidad -- del almacén intermedio ('buffer') de cada módulo, en el número de módulos en cada tipo, en la eficacia de los módulos para la ejecución de algunos procesos, etc. Otro tipo de análisis paramétrico que es muy interesante efectuar consiste en el análisis de la influencia sobre la productividad del sistema que tienen las averías en los diversos módulos de proceso y segmentos del sistema de transporte.

Magnitudes influenciadas. El análisis paramétrico tiene por objetivo analizar la influencia de los elementos arriba indicados sobre el nivel de utilización de los diversos módulos de proceso y segmentos del sistema de transporte, el tiempo de estancia en el FMS de una pieza de cada orden, el tiempo medio de espera de las piezas en los almacenes intermedios, el número medio de piezas en espera (i.e., volumen de piezas inacabadas) y el ritmo de producción (número de piezas producidas en cada orden por unidad de tiempo).

Elementos.

Para el conjunto M de módulos de proceso a utilizar en el subperíodo dado:

- S(m): Número de módulos que pertenecen al tipo m.
- B(m): Capacidad del almacén intermedio ('buffer') del tipo de módulo m.
- DISPL(m): Tipo de prioridad en la ejecución de procesos en el tipo de módulo m.
- T(m): Número máximo de instrumentos a utilizar en el tipo de módulo m.
- f(m): código sobre la posibilidad (1) o imposibilidad (0) de averías en los módulos de tipo m.
- Matrices W1, W2 y W3 que recogen, respectivamente, el promedio, distribución probabilística y coeficiente de variación del intervalo de averías en los módulos de cada tipo de módulo.
- Matrices F1, F2 y F3 que recogen, respectivamente, el promedio, distribución probabilística y coeficiente de variación de la duración de las averías en los módulos de cada tipo de módulo.
- F: Conjunto de capacidades de proceso a utilizar por el conjunto de módulos M.
- u(f): número de instrumentos requerido por la ejecución del proceso f para f en F.
- Matrices X, E, D y VA que recogen, respectivamente, la utilización, el coeficiente de eficacia, y la distribución probabilística y el coeficiente de variación de la duración de los procesos en cada módulo.
- F(m): Conjunto de capacidades de proceso asignadas al módulo m. Puede ser el resultado del subsistema Carga de módulos; ver Sección 4.5.
- Matrices H y Q que recogen, respectivamente, la utilización y el costo/tiempo del sistema de transporte inter-módulos. La matriz Q puede ser el resultado del subsistema Asignación de la ruta inter-módulos; ver Sección 4.4.
- Carts: número máximo de piezas que simultáneamente pueden estar en movimiento en el FMS.

Para el conjunto I de órdenes a ejecutar simultáneamente en el subperíodo dado de planificación. El conjunto I puede ser el resultado del subsistema Asignación de la producción (ver Sección 4.3) o, alternativamente, del subsistema Agrupación de órdenes (ver Sección 4.2):

- a(i,t): Producción requerida de la orden i en el subperíodo t de planificación considerado. Puede ser el resultado del subsistema Asignación de la producción; ver Sección 4.3.
- N(i): Conjunto de operaciones en la orden i.
- p(n): Proceso en F asociado a la operación n.
- t(i,n): Tiempo de proceso requerido por la operación n en la orden i, si se utiliza el módulo de proceso más eficiente con capacidad para efectuar el proceso asociado p(n).
- b(i): Número de pallets disponibles para transportar la orden i (i.e., número máximo de piezas de la orden i que simultáneamente pueden estar en el FMS).
- o(i,j): j-ésima operación a ejecutar en la secuencia de operaciones dada para la orden i en I y j en N(i). Puede ser el resultado del subsistema Secuenciación de operaciones y ruta de órdenes; ver Sección 4.6. Es preciso notar que en el caso de conjuntos paralelos de operaciones (i.e., el conjunto --- N(i) tiene asociado el grafo  $GG(i) = (GN(i), GA(i))$ , donde GN(i) recoge el conjunto de subgrafos tal que G(i,σ) es la representación del subgrafo σ para g en GN(i) (ver Sección 2.2)), la operación o(i,j) debe substituirse por o(i,σ,j), donde o(i,σ,j) recoge la j-ésima operación a ejecutar en la secuencia de operaciones del subgrafo g. Es preciso notar que GP(i,g) recoge el conjunto de subgrafos cuya ejecución debe efectuarse antes que la ejecución del subgrafo σ; la ejecución de estos subgrafos puede efectuarse en paralelo.

Ruta de órdenes. Para cada operación o(i,j) es preciso suministrar la siguiente información:

- $c_{inm}(m)$ : proporció de piezas de la orden  $i$  cuya  $j$ -ésima operació se va a ejecutar en el módulo  $m$  para  $m$  en  $M(p(o(i,j)))$ . -- Puede ser el resultado del subsistema Carga de módulos.
- $ruta(m_1, m_2)$ : proporció de piezas de la orden  $i$  que, una vez ejecutada la  $j$ -ésima operació en el módulo de proceso  $m_1$ , serán transportadas al módulo  $m_2$ , donde será ejecutada la  $(j+1)$ -ésima operació; -- puede ser el resultado del subsistema Secuenciación de operaciones y ruta de órdenes. Es preciso notar que los módulos que pueden ejecutar una operació dada, sea  $n$  son, precisamente, aquellos módulos a los que el subsistema Carga de módulos les ha asignado el correspondiente proceso asociado  $p(n)$ . No obstante, el decisor puede utilizar  $c_{inm}(m)$  y  $ruta(m_1, m_2)$  para analizar las implicaciones de rutas alternativas en la operació  $o(i, j)$ .

Carga de piezas. Para cada pieza que pertenece al volumen de producción que se va a procesar en el subperíodo dado, sea  $t$ , es preciso suministrar la siguiente información. Es preciso notar que el volumen a procesar puede ser el resultado del subsistema Asignación de la producción (ver Sección 4.2):

- $i(j)$ : Orden  $i$  para  $i$  en  $I$  a la cual pertenece la pieza  $j$ .
- $c(j)$ : Lugar de carga en el FMS que ocupa la pieza  $j$ . Es preciso notar que el máximo valor del índice  $j$  puede ser suma  $\sum_i a(i, t)$  para todo  $i$  en  $I$ . Normalmente, el máximo valor corresponde al número de piezas que forman parte de un 'ciclo'; -- puede ser el resultado del subsistema Secuenciación de órdenes (ver Sección 4.7); no obstante, el decisor puede utilizar  $c(j)$  para analizar las implicaciones de cualquier secuencia que considere oportuna.

Soporte Informático. La información permanente está almacenada en la base de datos, y los elementos variables son el resultado de la ejecución de los subsistemas previos; la evaluación de las implicaciones de la -- planificación propuesta se efectúa a base de analizar los resultados de la simulación

de la operativa del FMS; ver /22,46,54,62,78/. No obstante, el decisor puede suministrar estos elementos bien en forma de menú, bien utilizando un dispositivo gráfico-interactivo. Por otra parte, es precisa una visualización de las siguientes magnitudes:

1. Localización de los módulos de proceso, su capacidad y almacenes intermedios, y sistema de transporte.
2. Secuencia de operaciones propuesta con su correspondiente proporció de ruta; proceso (y módulo) asociado a cada operació; y secuencia de órdenes.
3. Resultados de la simulación de la operativa del FMS: utilización de los módulos de proceso y sistema de transporte, número medio (e histograma) de piezas en los almacenes intermedios, número medio (e histograma) de piezas producidas en la unidad de tiempo, etc.

El lenguaje de simulación (e.g., ver /26,27/) y el sistema de generación de modelos de simulación debe tener la suficiente flexibilidad como para admitir todo tipo de combinaciones en la planificación de la producción en FMS en base a los elementos y resultados descritos en las secciones anteriores. E.G., el sistema debe ser tal que permita la generación automática de sistemas tan dispares como el sistema de transporte serial recogido en las Figuras 17 y 18 y Tabla 3 (ver ---/16/) y el sistema de transporte de complejidad arbitraria recogido en las Figuras 19-22 y en la Tabla 4 (ver /86/). Por otra parte, el modelo de simulación debe permitir una amplia gama de prioridades en la ejecución de operaciones que compiten por la utilización del mismo módulo de proceso; el requerimiento simultáneo de un módulo de proceso puede ser efectuado por operaciones que pertenecen a órdenes diferentes o a una misma orden; --- y estos subgrafos pueden tener ejecución secuencial o ejecución paralela.

Sea el caso recogido en la Tabla 4. Un análisis típico de las implicaciones en la modificación de los parámetros controlables por el decisor sería el siguiente. Se supone que el objetivo consiste en producir, respectivamente, 170, 40 y 200 piezas semanales de las órdenes 1, 2 y 3, tal que se obtenga un nivel

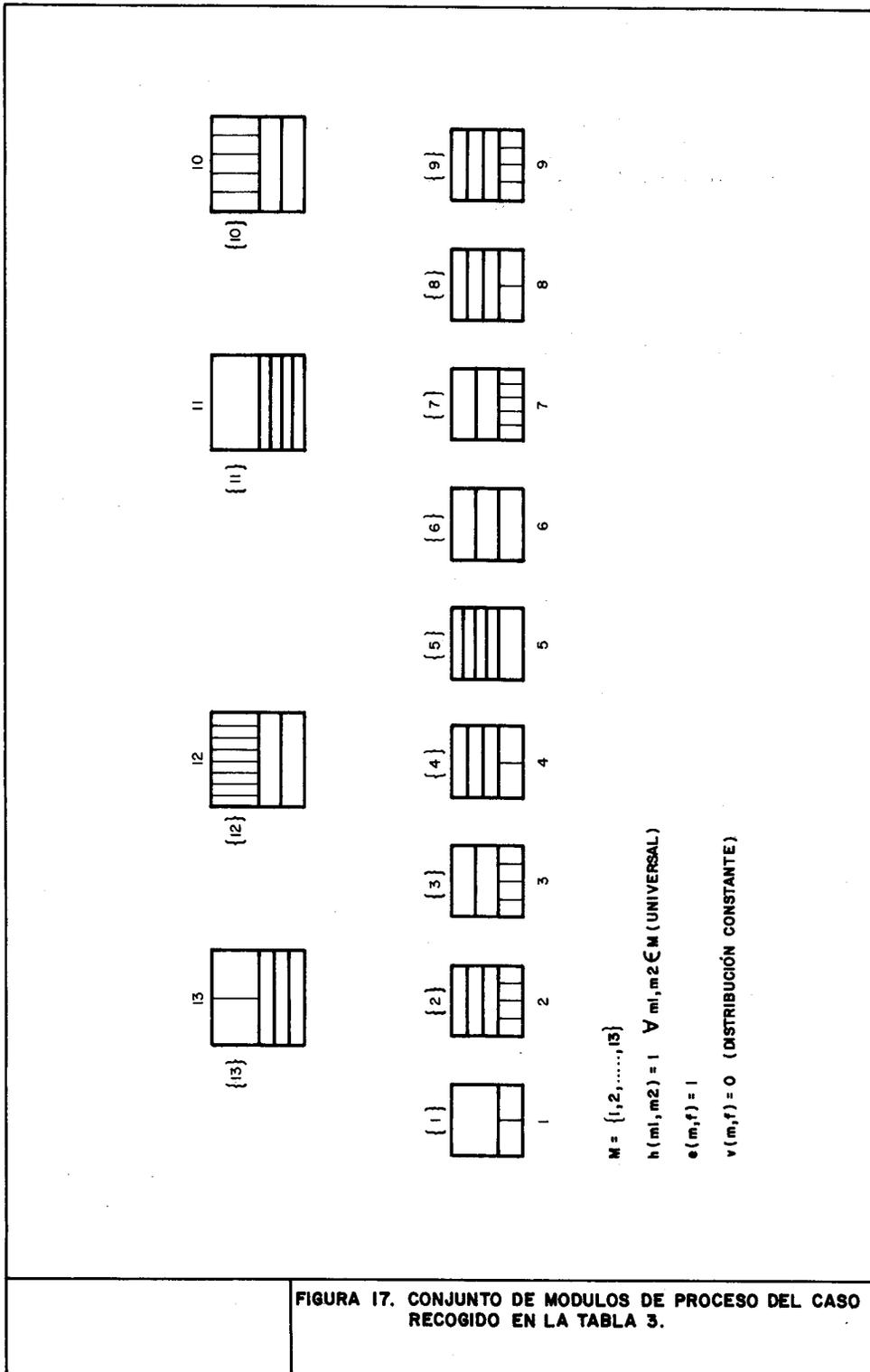


FIGURA 17. CONJUNTO DE MODULOS DE PROCESO DEL CASO RECOGIDO EN LA TABLA 3.

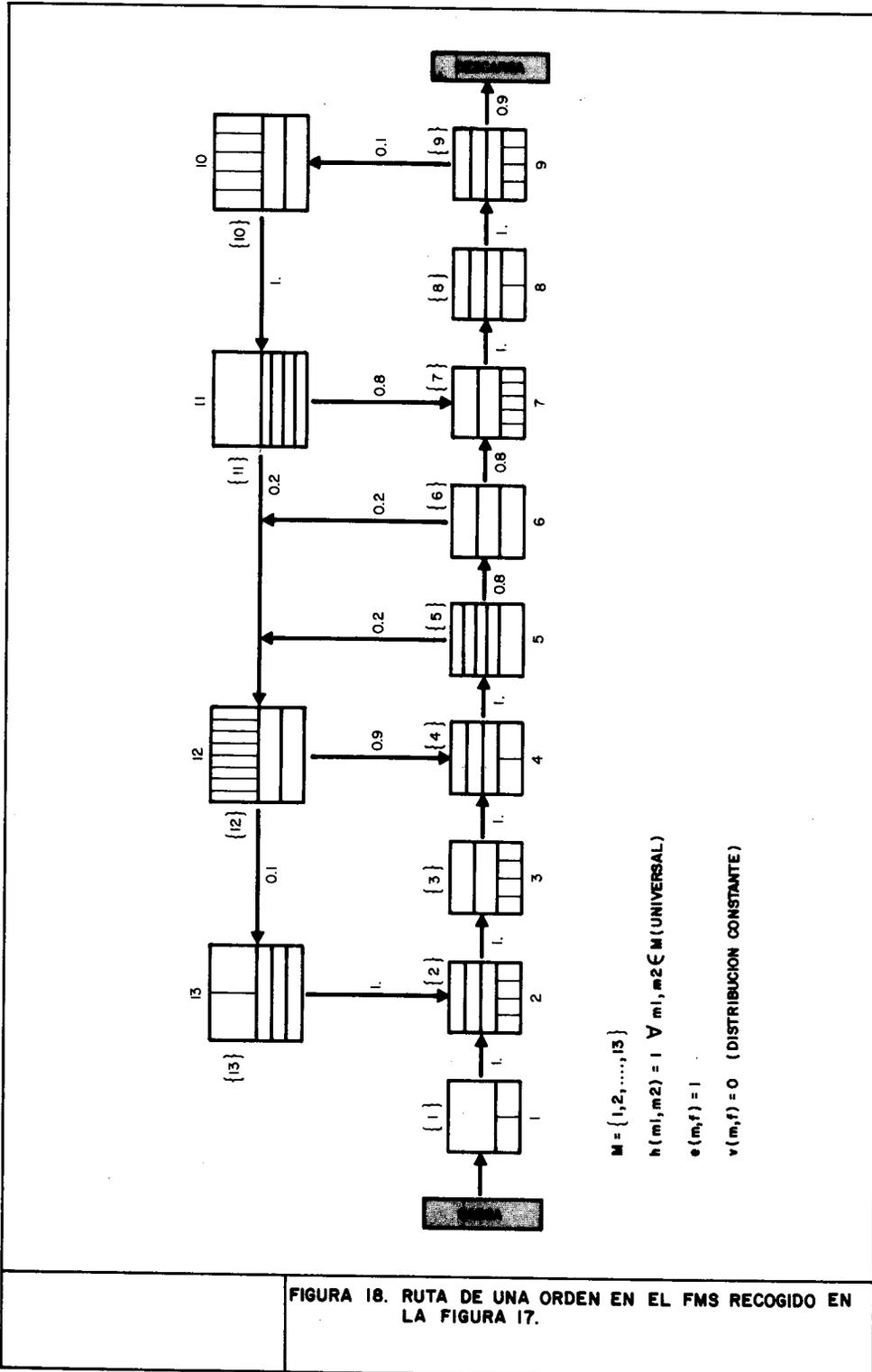


FIGURA 18. RUTA DE UNA ORDEN EN EL FMS RECOGIDO EN LA FIGURA 17.

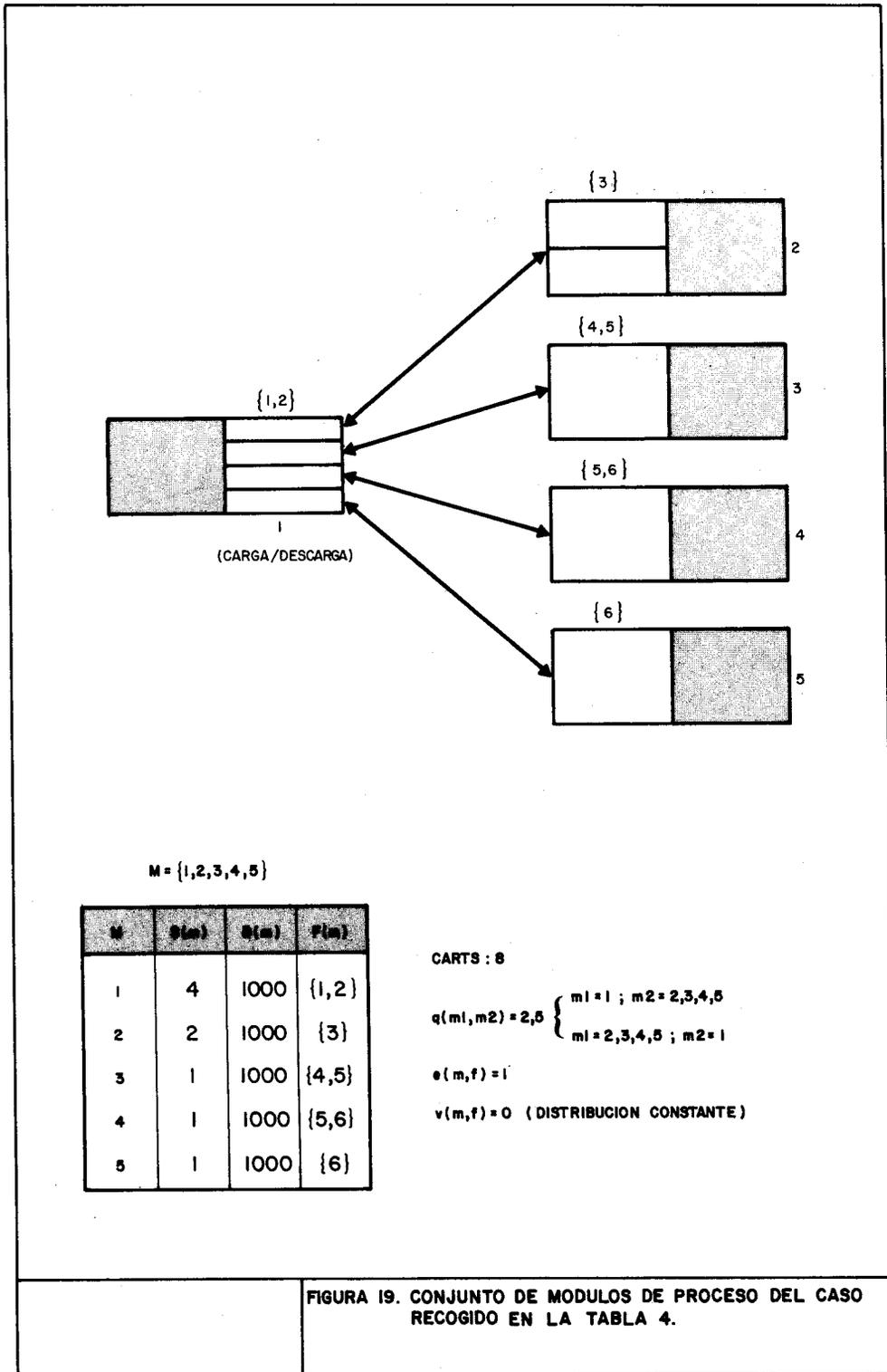
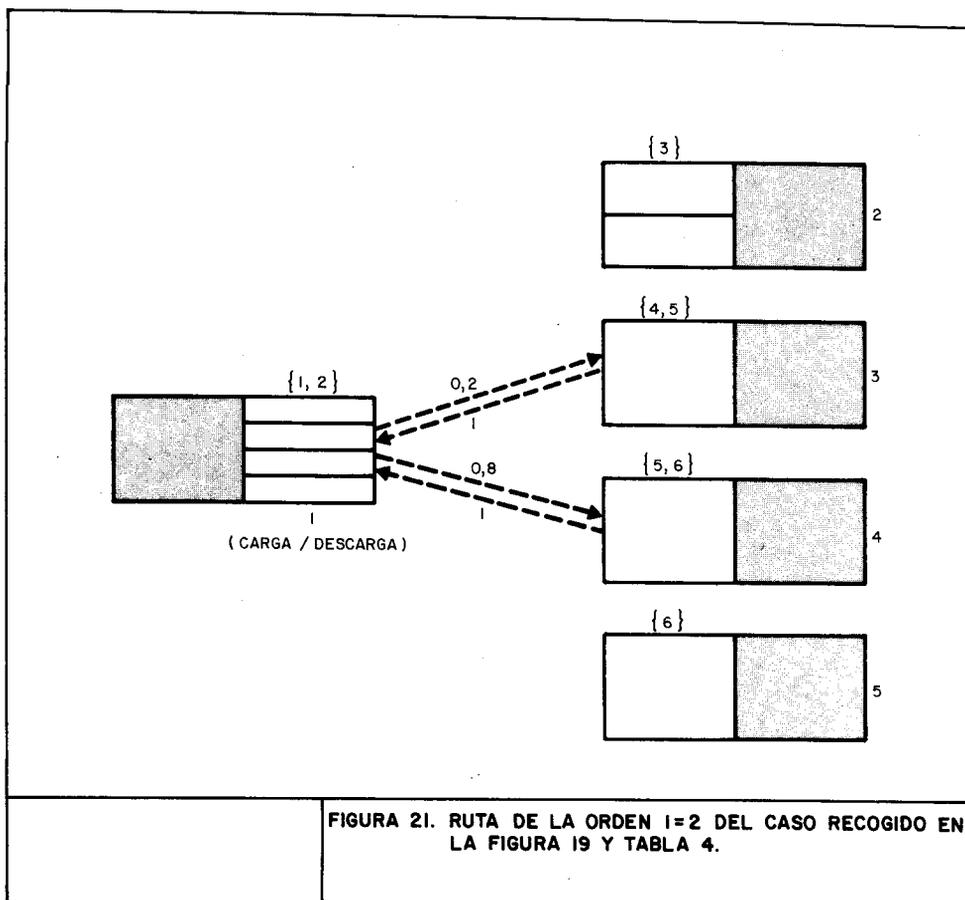
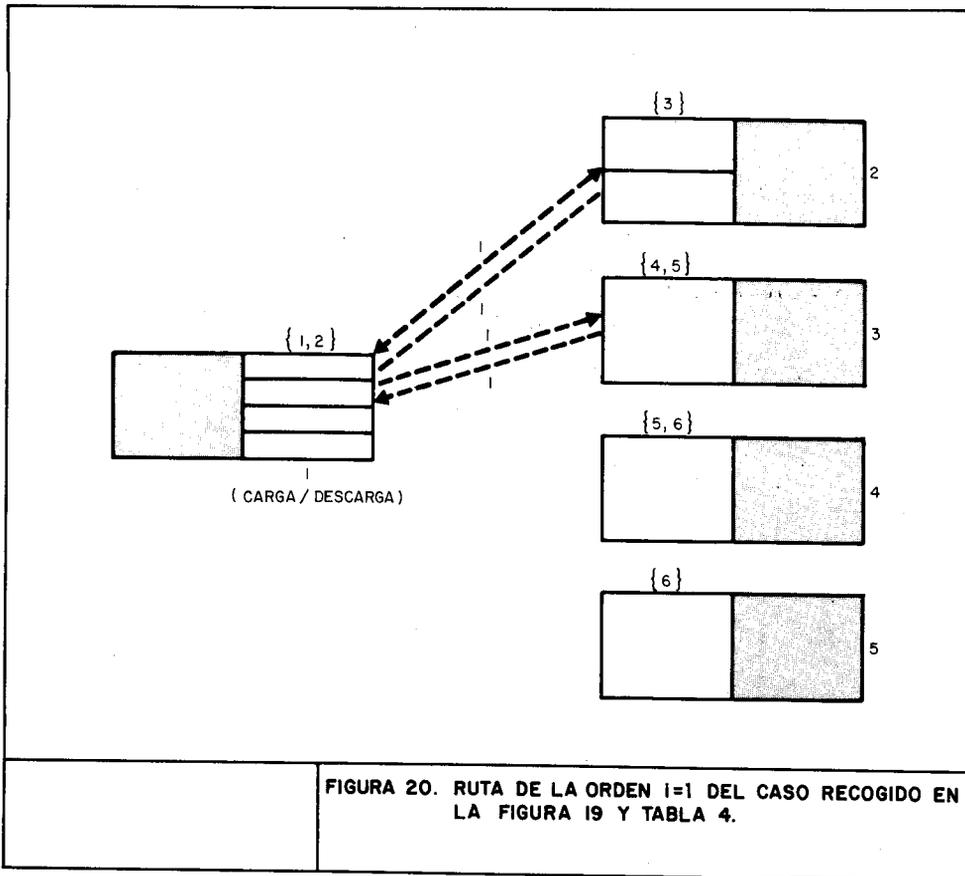


TABLA 3

DATOS PARA EL FMS RECOGIDO EN LA FIGURA 17.

M	S (m)	B (m)	F (m)
1	1	2	{1}
2	3	4	{2}
3	2	4	{3}
4	3	2	{4}
5	4	1	{5}
6	2	1	{6}
7	2	5	{7}
8	3	2	{8}
9	3	4	{9}
10	2	5	{10}
11	4	1	{11}
12	2	8	{12}
13	3	2	{13}



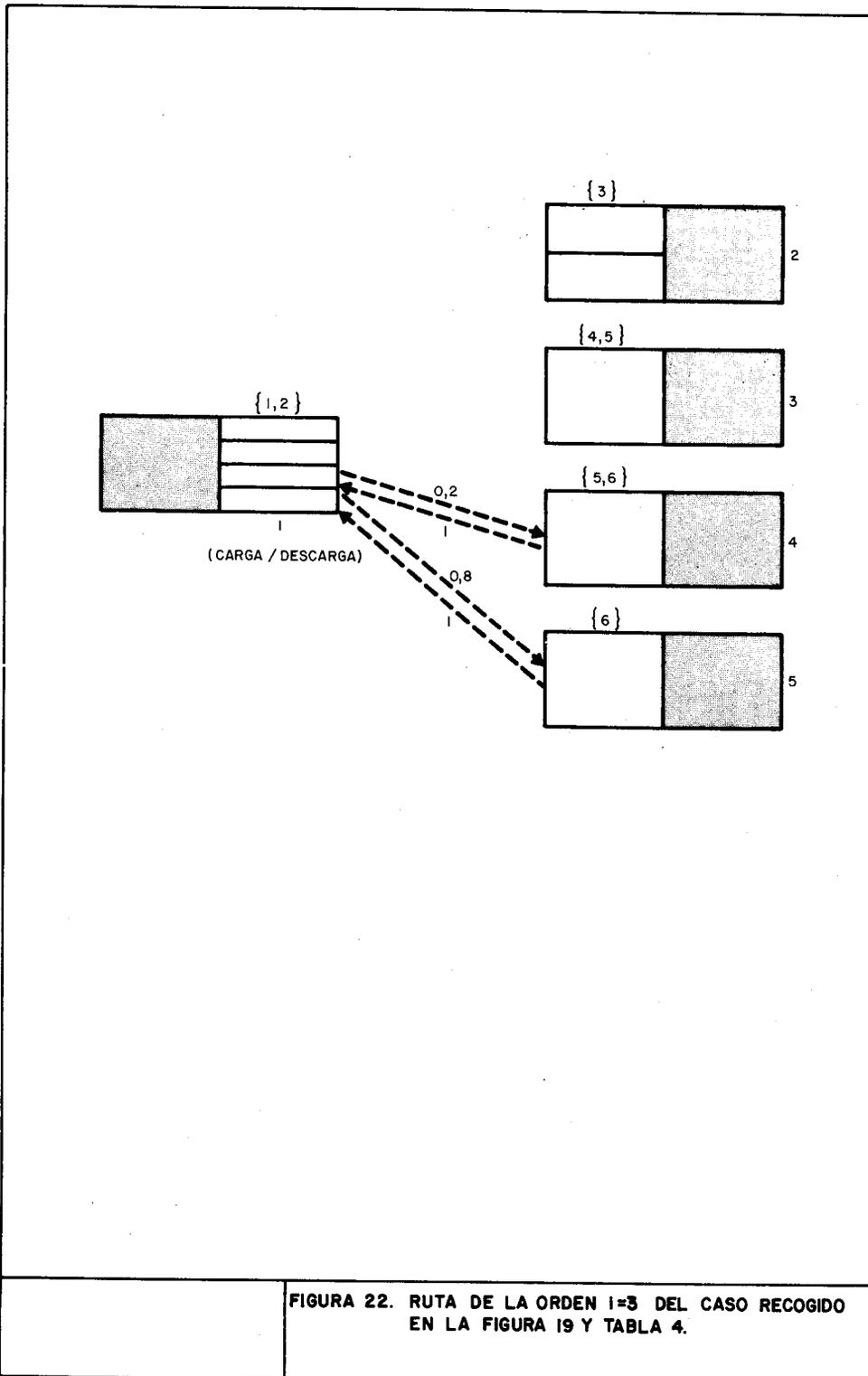


TABLA 4

DATOS PARA EL FMS RECOGIDO EN LAS FIGURAS 19 A 22

TABLA 4.1

i	b(i)	N(i)	Proceso (módulo, proporción de ruta)					
			1	2	3	4	5	6
1	4	6	1(1,1.0)	3(2,1.0)	2(1,1.0)	1(1,1.0)	4(3,1.0)	2(1,1.0)
2	1	4	1(1,1.0)	5(3,0.2)	5(4,0.8)	2(1,1.0)	-	-
3	2	4	1(1,1.0)	6(4,0.2)	6(5,0.8)	2(1,1.0)	-	-
Operación			1	2	3	4	5	6

TABLA 4.2.  $t(i,n)$

i \ n	1	2	3	4	5	6
1	10	28	5	10	12	5
2	10	30	30	5	-	-
3	10	15	15	5	-	-

TABLA 5

MODIFICACIONES AL CASO RECOGIDO EN LA TABLA 4

Modificación	1	2	3	4
Número de Pallets				
b(1)	4	4	4	8
b(2)	1	1	1	2
b(3)	2	2	2	4
Número de carts	8	8	4	4
Número de módulos				
S(1)	2	4	4	4
Proporción de ruta en la orden $i=3$ para				
m=4	0.2	0.2	0.35	0.35
m=5	0.8	0.8	0.65	0.65

alto en la utilización de los módulos y, -- por otra parte, se reduzca fuertemente el número de vehículos a utilizar en el transporte de las piezas.

La orden  $i=1$  (ver Tabla 4) tiene el siguiente binomio secuencia-ruta: carga (proceso  $f=1$ ) de las piezas en el módulo  $m=1$ , ejecución del proceso  $f=3$  en el módulo  $m=2$ , descarga (proceso  $f=2$ ) de las piezas en el módulo  $m=1$ , recarga (proceso  $f=1$ ) de las piezas en el módulo  $m=1$ , ejecución del proceso  $f=4$  en el módulo  $m=3$  y, finalmente, descarga (proceso  $f=2$ ) de las piezas en el módulo  $m=1$  (ver Figura 20); la orden  $i=2$  tiene el siguiente binomio secuencia-ruta: carga (proceso  $f=1$ ) de las piezas en el módulo  $m=1$ , ejecución del proceso  $f=5$  en los módulos  $m=3$  y  $m=4$  con una proporción de ruta del 20 y 80% respectivamente y, finalmente, descarga (proceso  $f=2$ ) de las piezas en el módulo  $m=1$  (ver Figura 21); la orden  $i=3$  tiene un binomio secuencia-ruta similar (ver Figura 22). Las características tecnológicas del FMS se recogen en la Figura 19, siendo éstas tales como los tipos de módulos de proceso, número de módulos en cada tipo, capacidad de almacenamiento en cada tipo de módulo y conjunto de capacidades de proceso para cada tipo de módulo. Así mismo, la Figura 19 recoge la matriz de costo/tiempo de transporte inter-módulos (se supone que  $q(m,m)=0$  para todo  $m$  en  $M$ ), y las matrices de los coeficientes de eficacia y variación correspondientes a cada proceso en cada tipo de módulo. La Tabla 4.1 recoge el número de pallets y operaciones en cada orden; la Tabla 4.2 recoge el tiempo de ejecución de las operaciones.

La Tabla 5 recoge las cuatro alternativas a estudiar en el sistema presentado en las Figuras 19-21 y Tabla 4. Las Figuras 23-26 recogen algunos resultados obtenidos por el subsistema Evaluación simulada de decisiones tales como el nivel de utilización de los módulos de proceso y el ritmo de producción del FMS. Se puede observar que la alternativa 4 cumple las condiciones del problema.

## 5. INSTRUMENTOS INFORMATICOS. CONCLUSION.

La tabla 6 recoge el esquema de los subsistemas (1) a (7) que componen el sistema pro--

puesto en las secciones anteriores para la planificación de la producción en fabricación flexible. Es preciso insistir en que los elementos que precisa el subsistema, sea  $i$  se extraen de la base de datos, así como de la información suministrada por los resultados obtenidos al ejecutar los subsistemas (1) al (i-1); no obstante, el decisor puede suministrar alternativas a los resultados de los subsistemas (1) al (6).

El soporte informático requerido (ver Figura 27) consiste, básicamente, en los siguientes elementos.

### (a) Base de datos relacionales.

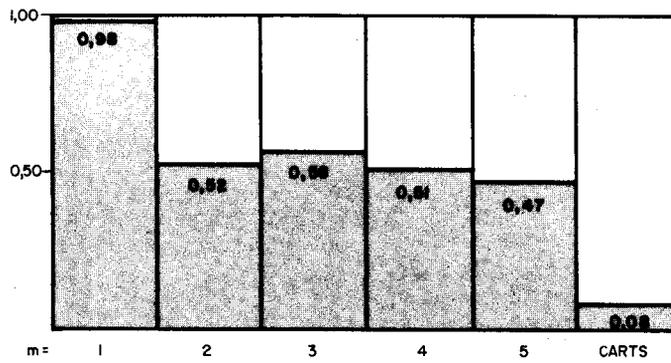
La base de datos se utilizará para almacenar y extraer los elementos permanentes del sistema, los elementos variables de cada planificación, y los resultados de la ejecución de los diversos subsistemas así como información suministrada por el decisor como alternativa a la utilización de los resultados de dichos subsistemas.

### (b) Sistema gráfico-interactivo.

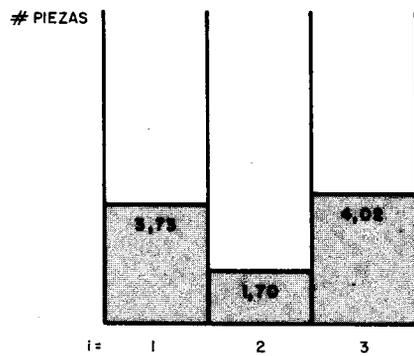
El sistema gráfico-interactivo sirve de comunicación entre el decisor y el ordenador de tal forma que se visualiza fácilmente el sistema físico/tecnológico del FMS así como las alternativas de planificación bien propuestas por los diversos subsistemas, bien impuestas por el decisor, tales como:

- La estructura del sistema de producción (módulos de proceso) y transporte.
- Los conjuntos de órdenes a procesar simultáneamente en el mismo período de planificación, así como sus correspondientes módulos de proceso.
- El volumen de las órdenes a procesar en cada subperíodo.
- La ruta inter-módulos más idónea.
- El grafo de precedencias de cada orden.
- La matriz de capacidades de proceso de cada módulo.

$b(1) = 4$   
 $b(2) = 1$   
 $b(3) = 2$   
 CARTS = 8  
 $S(1) = 2$   
 RUTA DE  $i=3$  : 0,2 PARA  $m=4$   
                   0,8 PARA  $m=5$



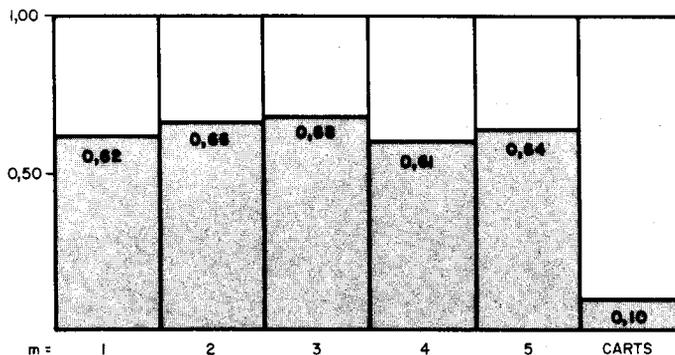
NIVEL DE UTILIZACION DE LOS MODULOS DE PROCESO Y SISTEMA DE TRANSPORTE



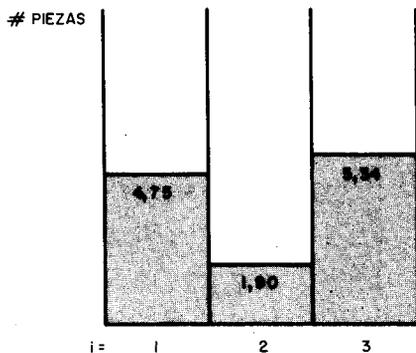
RITMO DE PRODUCCION (# PIEZAS/100 MINUTOS)

FIGURA 23. CASO RECOGIDO EN LA TABLA 5. MODIFICACION 1.

$b(1) = 4$   
 $b(2) = 1$   
 $b(3) = 2$   
 CARTS = 8  
 $S(1) = 4$   
 RUTA DE  $i = 3$  : 0,2 PARA  $m = 4$   
                   0,8 PARA  $m = 5$



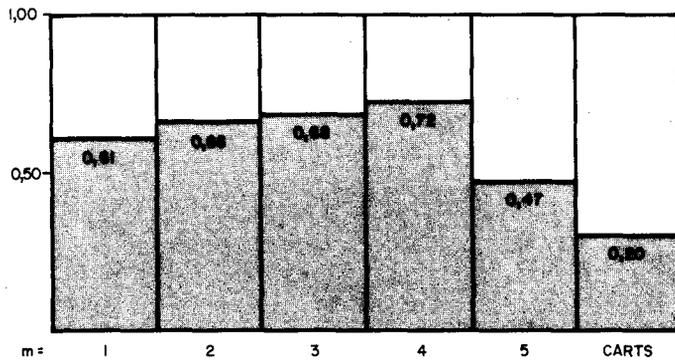
NIVEL DE UTILIZACION DE LOS MODULOS DE PROCESO Y SISTEMA DE TRANSPORTE



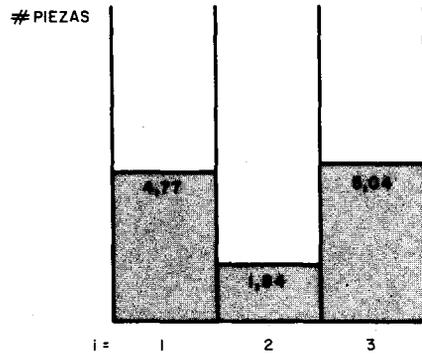
RITMO DE PRODUCCION (# PIEZAS/100 MINUTOS)

FIGURA 24. CASO RECOGIDO EN LA TABLA 5. MODIFICACION 2.

b(1) = 4  
b(2) = 1  
b(3) = 2  
CARTS = 4  
S(1) = 4  
RUTA DE i = 3 : 0,35 PARA m = 4  
0,65 PARA m = 5

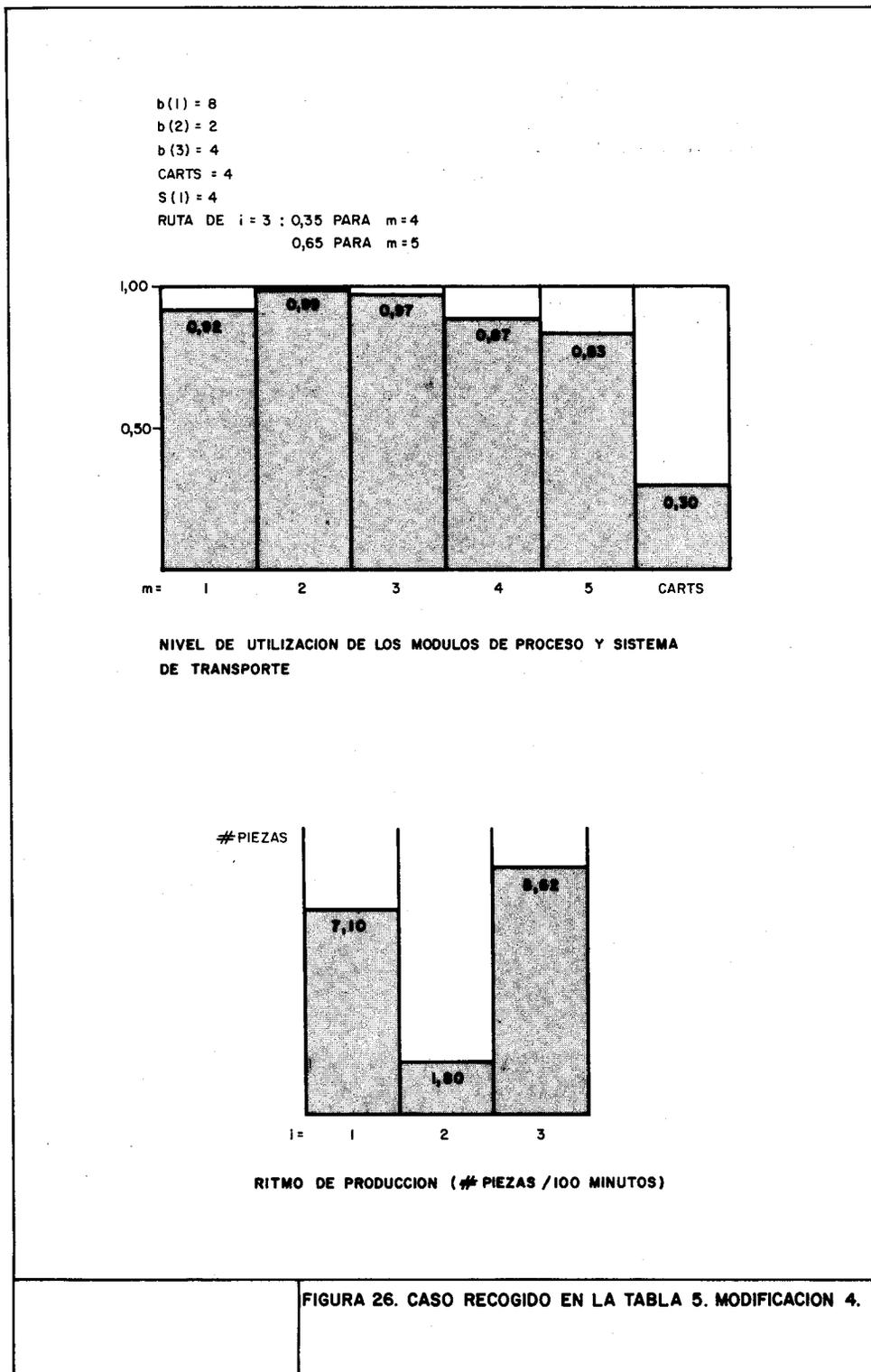


NIVEL DE UTILIZACION DE LOS MODULOS DE PROCESO Y SISTEMA DE TRANSPORTE.



RITMO DE PRODUCCION (# PIEZAS / 100 MINUTOS)

FIGURA 25. CASO RECOGIDO EN LA TABLA 5. MODIFICACION 3.



- La carga de módulos en cada subperíodo de planificación.
- La secuencia de operaciones en cada orden.
- La ruta de órdenes.
- La secuencia de carga de piezas en el FMS.
- Los resultados de la simulación de la ejecución de las alternativas propuestas, tales como nivel de utilización de los módulos de proceso y segmentos del sistema de transporte, nivel de utilización de los almacenes intermedios, nivel de producción del FMS para cada orden, número medio de piezas en el FMS, tiempo de estancia de una pieza de cada orden en el FMS, etc.

(c) Subsistemas generativos.

Son los subsistemas (1) a (6); tienen por objetivo proponer soluciones a la planificación a efectuar en la utilización del FMS. Existen dos tipos de algoritmos: algoritmos exactos y algoritmos gráfico-interactivos. Ambos tipos de algoritmos son determinísticos. El primer tipo de algoritmos garantiza la solución óptima; se utilizan en los subsistemas (1) Agrupación de órdenes (ver Sección 4.2) y (2) Asignación de la producción (ver Sección 4.3); se basan en metodología de programación matemática.

Los subsistemas (3) a (6) requieren algoritmos especiales, no tienen una única función objetivo a optimizar, sólo utilizan elementos determinísticos cuando también requieren datos aleatorios, y los correspondientes modelos son modelos de grandes dimensiones. En el caso de utilizar ordenadores de tipo mediano y pequeño, parece que tiene sentido sacrificar la optimalidad de la solución en beneficio de su operatividad tal que, aunque estos algoritmos no garanticen una solución óptima, en cambio ofrecen la posibilidad de que el decisor, interactivamente, suministre al sistema cierta información 'cualitativa' sobre los objetivos a conseguir. La construcción de estos algoritmos se basa en técnicas de enumeración implícita y en tipos especiales de sistemas de expertos; ver apartados 'Soporte informático' y 'Modelización' de cada uno de los subsistemas descritos en las secciones anteriores.

(d) Subsistema evaluativo.

Es el subsistema (7). Tiene por objetivo evaluar la operatividad de una propuesta de planificación de la producción en el FMS. Esta planificación ha podido ser propuesta por los subsistemas (1) a (6), por el decisor, o ser una propuesta elaborada interactivamente por el decisor y dichos subsistemas.

La evaluación del resultado de la planificación se efectúa simulando la ejecución de operaciones de acuerdo con dicha planificación. Por tanto, se precisan dos tipos de soporte informático:

1. Un generador de modelos de simulación que sea capaz de construir, en el lenguaje de simulación adoptado, el modelo de planificación a simular en base a la información (a extraer de la base de datos) referente a la estructura físico/tecnológica del FMS y a la planificación propuesta. Ver /24,25/.
2. Un lenguaje de simulación que sea capaz de tratar los siguientes elementos (ver /64,75,77/):
  - Datos determinísticos y datos aleatorios (éstos últimos referentes a las averías del sistema productivo y de transporte, así como a la aleatoriedad en la duración de la ejecución de operaciones en cierto tipo de módulos de proceso).
  - Fenómenos en cascada.
  - Rutas de operaciones con bifurcación probabilística a diversos módulos de proceso.
  - Estaciones de servicio múltiples y con capacidades funcionales diversas.
  - Fenómenos de espera; i.e., congestión en los diversos elementos del sistema productivo; ver /26,53,89,90/.
  - Colas activas y pasivas, escalares y vectoriales.
  - Prioridades en la ejecución de las operaciones por los módulos de proceso.

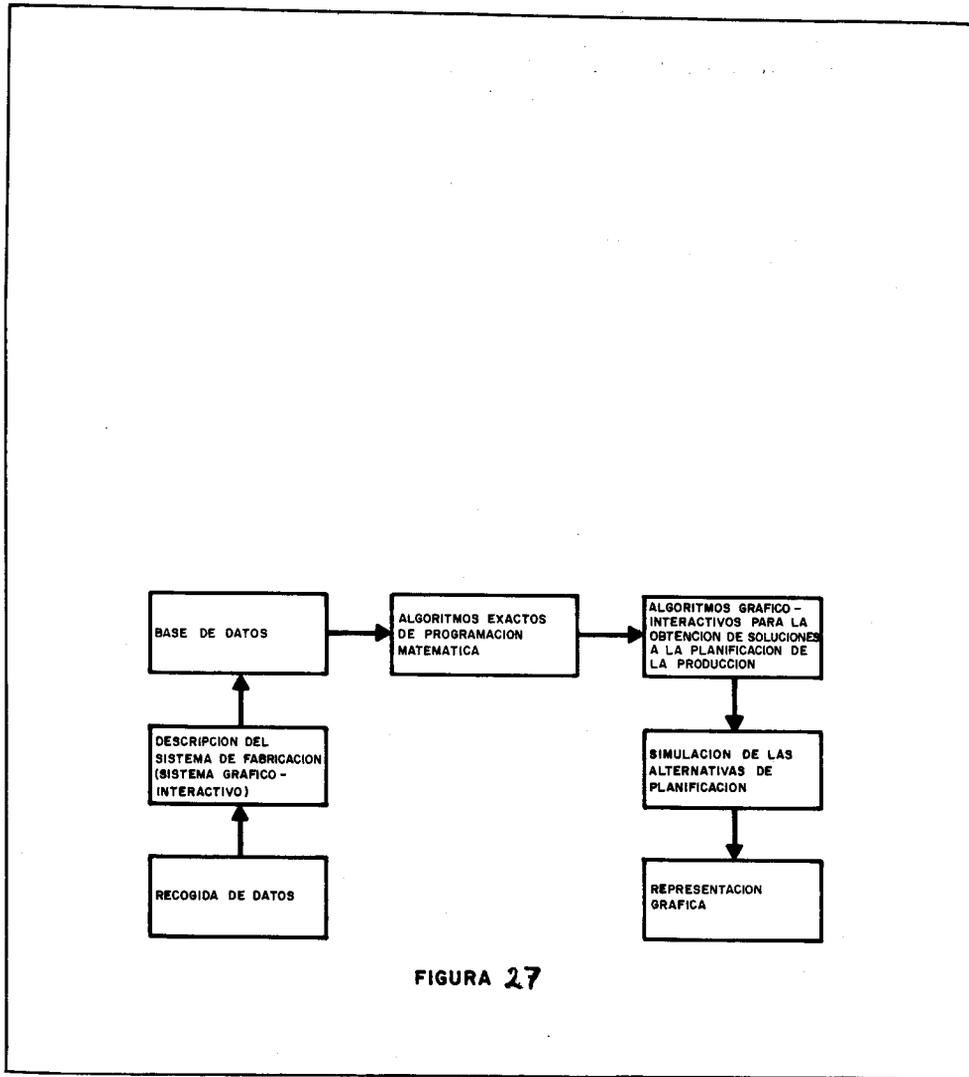


FIGURA 27

Organigrama general de un sistema para la generación y evaluación de alternativas en la planificación de la producción

TABLA 6

INTEGRACION DE SUBSISTEMAS PARA LA PLANIFICACION DE LA PRODUCCION EN FMS

SUBSIS- TEMA	OBJETIVO	SUMINISTRAR INFORMACION AL SUBSISTEMA:						
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7) Simulacion
Base de Datos	Suministrar informacion	*	*	*	*	*	*	*
(1)	Agrupacion de ordenes a utilizar simultaneamente el FMS		I					
(2)	Asignacion de la Produccion a cada subperiodo				I a(i,t)	I a(i,t)	I a(i,t)	I a(i,t)
(3)	Asignacion de la ruta inter-modulos					H, Q		H, Q
(4)	Asignacion de procesos y carga en cada modulo					M(f) cinm	F(m) cinm	M(f) F(m) cinm
(5)	Secuencia de operaciones y ruta de ordenes							o(i,g,j) con ruta(m1,m2)
(6)	Ciclo de la secuencia de carga de las piezas en el FMS							ciclo{o(g)}

- Grafos (y subgrafos) escalares y vectoriales.

## 6. REFERENCIAS.

- /1/ J.C. AMMONS, C.B. LOFGREN y L.F.MCGINNIS: "A large-scale work station loading problem", en /81/ 249-255.
- /2/ C. ABRAHAM, B. DIETRICH, S. GRAVES, W. MAXWELL y C. YANO: "A research agenda for models to plan and schedule manufacturing systems". IBM Research, paper RC 11329, Yorktown Heights (NY), 1985.
- /3/ E. BALAS y N. CHRISTOFIDES: "A restricted Lagrangian approach to the traveling Salesman Problem", Mathematical Programming 21 (1981) 19-46.
- /4/ M.M. BARASH: "The future of numerical controls", Mechanical Engineering 101 (1979) 26-31.
- /5/ E.R. BARNES : "An algorithm for partitioning nodes of a graph, SIAM J. of Algebraic and Discrete Methods 3 (1982) 541-550.
- /6/ M. BERRADA y K.E. STECKE: "A branch and bound approach for machine loading in Flexible Manufacturing Systems", working paper 329-b, Graduate School of Business Administration, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1984.
- /7/ H.J. BULLINGER y H.J. EARNECKE (eds): "Towards the Factory of the Future" (Spinger-Verlag, Berlin, 1985).
- /8/ J.K. BURBIDGE: "Production flow analysis" Production Engineering 42 (1963) 742-752.
- /9/ J.S. BUZACOTT y J.G. SHAUTHIKUMAR: "Models for understanding flexible manufacturing systems", AIIE Transactions 12 (1980) 339-350.
- /10/ J.S. BUZACOTT y D.W. YAO: "Flexible Manufacturing Systems: a review of models" working paper 82-007. Dept. of Industrial Engineering, University of Toronto, 1982.
- /11/ G. CARPANETO y P. TOTH: "Some new branching and bound criteria for the asymmetric travelling salesman problem", Management Science 26 (1980) 736-743.
- /12/ A.K. CHAKRAVARTY y A. SHTUB: "Selecting parts and loading Flexible Manufacturing Systems" en /81/ 284-289.
- /13/ A. CHATTERJEE, M.A. COHEN, W.L. MAXWELL y L.W. MILLER: "Manufacturing Flexibility: models and measurement", en /81/ 49-64.
- /14/ P.H. CHEN y J. TALAVAGE: "Production decision support system for computerized manufacturing systems", J. of Manufacturing Systems 1 (1982) 157-168.
- /15/ CHARLES STARK DRAPER LABORATORY: "Flexible Manufacturing Systems Handbook", (U.S. National Technical Information Service, 1983)
- /16/ W.M. CHOW, E.A. MacNAIR y C.H. SAUER: "Analysis of Manufacturing Systems by the Research Queueing Package", RC-10769, IBM Research, Yorktown Heights (NY), 1984. Ver también IBM J of Research and Development 29 (1985) 330-342.
- /17/ R.J. CLASSEN y E.M. MALSTROM: "Effective capacity planning for automated factories requires workable simulation tools and responsive shop floor controls", Industrial Engineering (1982) 73-83.
- /18/ N.H. COOK: "Computer-managed part manufacture, Scientific American 232 (1975) 22-28.
- /19/ H. CROWDER, E.L. JOHNSON y M. PADBERG: "Solving large-scale zero-one linear programming problems", Operations Research 31 (1983) 803-834.
- /20/ D. DUBOIS: "A mathematical model for a Flexible Manufacturing System with limited in-process inventory", European J. of Operational Research 14 (1983) 66-78.
- /21/ C. DUPONT-GATERMAND: "A survey of Flexible Manufacturing Systems", J. of Manufacturing Systems 1 (1982) 1-16.

- /22/ H.S. ELMARAGHY: "Simulation and Graphic al animation for advanced manufacturing systems", J. of Manufacturing Systems 1 (1982) 53-64.
- /23/ J.F. ENGELBERGER: "Robotics in practice: management and application of industrial robots"(American Management Association, NY, 1980).
- /24/ H. ENGELKE, J. GROTRIAN, C. SCHEUING, A. SCHMACKPFEFFER y B. SOLF: "Structured modeling in manufacturing processes" Proceedings of the 16th Annual Simulation Symposium, Tampa (Florida) 1983.
- /25/ H. ENGELKE, J. GROTRIAN, C. SCHEUING, A. SCHMACKPFEFFER, W. SCHWARZ, B. SOLF y J. TOMANN: "Integrated Manufacturing Modeling System", en /49/ 343-355.
- /26/ L.F. ESCUDERO: "Aplicaciones de la Teoría de Colas", (Ed. Deusto, Bilbao, 1972).
- /27/ L.F. ESCUDERO: "La simulación en la empresa" (Ed. Deusto, Bilbao, 1973).
- /28/ L.F. ESCUDERO: "Programación Lineal" (Ed. Deusto, Bilbao, 1976).
- /29/ L.F. ESCUDERO: "Reconocimiento de Patrones", (Ed. Paraninfo, Madrid, 1977).
- /30/ L.F. ESCUDERO: "On maintenance scheduling of production units", European J. of Operational Research 9 (1982) 264-274.
- /31/ L.F. ESCUDERO: "An algorithm for production scheduling problems", School on Combinatorial Optimization, Rio de Janeiro 1985 .
- /32/ L.F. ESCUDERO: "An efficient using of generative and evaluative models and algorithms for Flexible Manufacturing Systems" working paper, Operations Research (sometido a publicación) 1986.
- /33/ L.F. ESCUDERO: "On the linear ordering problem with precedence and scheduling constraints", European J. of Operational Research (sometido a publicacion) 1987.
- /34/ G. FINKE y A. KUSIAK: "Network approach to modelling of Flexible Manufacturing modules and cells", working paper 05/85, Technical University of Nova Scotia, Canada, 1985.
- /35/ A. FREVILLE y G. PLATEAU: "Heuristics and reduction methods for multiple constraints 0-1 linear programming problems" European J. of Operational Research 24 (1986) 206-215.
- /36/ F. GLOVER y E. WOLSEY: "Converting the 0-1 Polynomial programs to a 0-1 linear program", Operations Research 22 (1974) 180-182.
- /37/ M. GROTSCHHEL, M. JUNGER y G. REINELT: "A cutting plane algorithm for the linear ordering problem", Operations Research 34 (1984) 1195-1220.
- /38/ M. GROTSCHHEL, M. JUNGER y G. REINELT: "Facets of the linear ordering polytope" Mathematical Programming 33 (1985) 43-60.
- /39/ M. GUIGNARD y K. SPIELBERG: "Propagation, penalty improvement and use of logical inequalities", Mathematics of Operations Research 25 (1977) 157-171.
- /40/ T.G. GUNN: "The mechanization of design and manufacturing", Scientific American 247 (1982) 87-108.
- /41/ C.L. HAINES: "An algorithm for carrier routing in a flexible material-handling system", en /49/ 356-362.
- /42/ W.B. HEGINBOTHAM (ed.): "Simulation in Manufacturing"(IFS Publications, London 1985).
- /43/ W.S. HERROELEN: "Automation of small-batch production", Tijdschrift voor Economie en Management, XXVIII (1983) 139-163.
- /44/ W.S. HERROELEN y M.R. LAMBRECHT: "Management aspects of computerized manufacturing", en /81/ 65-80.

- /45/ K. HITOMI: "Manufacturing systems engineering. A Unified approach to manufacturing technology and production management", (Taylor and Francis, London, 1979).
- /46/ B.W. HOLLOCKS: "Getting the best from simulation", en /42/ 261-268.
- /47/ G.K. HUTCHINSON y J.R. HOLLAND: "The economic value of flexible automation", J. of Manufacturing Systems 1 (1982) 215-228.
- /48/ IBM, MPSX/370: "Mathematical Programming System Extended/370 y MIP/370 Mixed Integer Programming/370", Ref. manuals SH19-1095 (1975). Introduction to the Extended Control Language, Ref. manual SH19-1147 (1978). Newsletter SN19-1132 (1979).
- /49/ IBM J. of Research and Development, Computers in Manufacturing 29 (1985).
- /50/ E.L. JOHNSON, M.M. KOSTREVA y U. SUHL: "Solving 0-1 integer programming problems arising from large-scale planning models", Operations Research 33 (1985) 803-819.
- /51/ R.M. KARP y J.M. STEELE: "Probabilistic analysis of heuristics", en /61/ 181-205.
- /52/ J.R. KING y V. NAKORUCHAI: "Machine-component group formation in group technology: review and extensions", Intern. J. of Production Research 20 (1982) 117-133.
- /53/ L. KLEINROCK: "Queueing systems. Vol. I: Theory. Vol. II: Computer applications" (Wiley, NY, 1976).
- /54/ H. KOBAYASHI: "Modelling and analysis: An introduction to system performance evaluation methods" (Addison-Wesley, NY, 1978).
- /55/ A. KUSIAK: "The part families problem in flexible manufacturing systems", en /81/ 237-242.
- /56/ A. KUSIAK: "Flexible manufacturing systems: a structural approach" Intern. J. of Production Research 23 (1985a) 1057-1073.
- /57/ A. KUSIAK: "Integer programming approach to the process planning problem", Intern. J. of Advanced Manufacturing Technology 1 (1985b) 73-83.
- /58/ A. KUSIAK y G. FINKE: "Modeling and solving the flexible forging module scheduling problem", working paper 85/06, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Manitoba, Winnipeg Canada, 1985.
- /59/ A. KUSIAK, A. VANNELLI y K.R. KUMAR: "Grouping problem in scheduling manufacturing systems", Robotica 3 (1985a) 245-252.
- /60/ A. KUSIAK, A. VANNELLI y K.R. KUMAR: "Clustering analysis: models and algorithms", School on Combinatorial Optimization, Rio de Janeiro, 1985b.
- /61/ E.L. LAWLER, J.K. LENSTRA, A.H.G. RINNOOY-KAN y D.B. SHMOYS: "The Traveling Salesman Problem, A guided tour of combinatorial optimization", (J. Wiley, NY., 1985).
- /62/ J.E. LENZ: "What happens when you don't simulate", en /42/ 297-312.
- /63/ S. LIN and B.W. KERNIGHAM: "An effective heuristic algorithm for the Travelling Salesman Problem", Operations Research 21 (1973) 498-516.
- /64/ E.A. MacNAIR y C.H. SAUER: "Elements of practical performance modeling" (Prentice-Hall, Englewoods Cliffs, N.J., 1985).
- /65/ S. MARTELLO y P. TOTH: "An algorithm for the Generalized Assignment Problem", en: J.P. Brans (ed.), Operational Research' 81 (North-Holland, Amsterdam, 1981), 589-603.
- /66/ K. MURTY: "An algorithm for ranking all the assignment in order of increasing cost", Operations Research 16 (1968) 682-687.
- /67/ S.Y. NOF, A.B. WHINSTON y W.I. BULLERS: "Control and decision support in automatic manufacturing systems", AIIE Transactions 12 (1980) 156-169.

- /68/ T.E. MORTON: "A planning and scheduling system for Flexible Manufacturing Systems", en /81/ 314-326.
- /69/ H.W. POLLACK: "Manufacturing and machine tool operations" (Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ, 1979).
- /70/ R.S. PRESSMAN y J.E. WILLIAMS: "Numerical control and computer-aided manufacturing" (Wiley, NY, 1977).
- /71/ H.N. PSRAFTIS: "K-interchange procedures of the local search in a precedence-constrained routing problem", European J. of Operational Research 13 (1983) 391-402.
- /72/ P.G. RANKY: "The design and operation of FMS" (North-Holland, Amsterdam, 1983).
- /73/ G.T. ROSS y R.M. SOLAND: "A branch and bound algorithm for the Generalized Assignment Problem", Mathematical Programming 8 (1975) 91-103.
- /74/ G. SALVENDY: "Handbook of Industrial Engineering" (Wiley, NY, 1982).
- /75/ C.H. SAUER y K.M. CHANDY: "Computer systems performance modeling", (Prentice-Hall, Englewood, NJ, 1981).
- /76/ C. SANDI: "Solution of the machine loading problem with binary variables", en: Roy (ed.), Combinatorial Programming: methods and applications (D. Reided, Dordrecht-Holland, 1975) 371-378.
- /77/ C.H. SAUER, E.A. MacNAIR y J.F. KUROSE: "The Research Queueing Package Version 2: CMS Users Guide", RA-139, IBM Research, Yorktown Heights (NY), 1982.
- /78/ L. SCHRUBEN: "Simulation modeling with event graphs", Communications of ACM 26 (1983) 957-963.
- /79/ K.E. STECKE: "Formulation and solution of nonlinear integer production planning -- problems for flexible manufacturing systems", Management Sciences 29 (1983) 273-288.
- /80/ K.E. STECKE v T.L. MORIN: "Optimality of balanced workload in Flexible Manufacturing Systems", European J. of Operational Research 20 (1985) 68-82.
- /81/ K.E. STECKE v R. SURI (eds.): "Flexible Manufacturing Systems: Operations Research Models and Applications", (University of Michigan, Ann Arbor, 1984).
- /82/ K.E. STECKE v J.J. SOLBERG: "The optimal planning of computerized manufacturing systems: The CMS loading problem", working paper 20, School of Industrial Engineering, Purdue University, Indiana, 1981.
- /83/ K.E. STECKE v J.J. SOLBERG: "Loading and control policies for a flexible manufacturing system", Intern. J. of Production Research 19 (1981) 481-490.
- /84/ K.E. STECKE y J.J. SOLBERG: "The optimality of unbalancing both the workloads -- and machine group sizes in closed queueing networks of multi-servers queues", Operations Research (1987, aparecerá).
- /85/ R. SURI: "An overview of evaluative models for Flexible Manufacturing Systems" en /81/ 8-15.
- /86/ R. SURI y R.R. HILDEBRANT: "Modelling Flexible Manufacturing Systems using Mean-Value Analysis", J. of Manufacturing Systems 3 (1984) 27-38.
- /87/ R. SURI y C.K. WHITNEY: "Decision Support requirements in Flexible Manufacturing", J. of Manufacturing Systems 3 (1984) 61-69.
- /88/ R.J. WITTRICK: "Scheduling algorithms for flexible flow lines", IBM J. of Research and Development 29 (1985) 401-412.
- /89/ D.D.W. YAO y J.A. BUZACOTT: "Queueing models for a flexible machine station, Part I: The diffusion approximation", European J. of Operational Research 19 (1985) 133-240.

/90/ D.D.W. YAO y J.A. BUZACOTT: "Queueing models for a flexible machine station, Part II: The method of Coxian phases", European J. of Operational Research 19 (1985) 241-252.

/91/ D.M. ZELENOVIC: "Flexibility: a condition for effective production systems", Intern. J. of Production Research 20 (1982) 319-337.