



Cátedra Nissan

-PROTHIUS-

BERENICE (1988): Programación en la fabricación de prótesis dentales. *Informe para la dirección de Unión Dental S.A.*

*Joaquín Bautista Valhondo¹, Ramón Companys Pascual¹,
Juan Luengo Vallejo²*

¹ DOE - UPC

² Innovación de productos y procesos

R-02/2010

(Rec. Report BERENICE BCL-1988)

Departamento de Organización de Empresas

Universidad Politécnica de Cataluña

Publica:

Universitat Politècnica de Catalunya
www.upc.edu



Edita:

Cátedra Nissan
www.nissanchair.com
director@nissanchair.com

EL SISTEMA BERENICE

J.Bautista (*); R.Companys (*); J.Luengo (**)

(*) Departamento de Organización de Empresas UPC

(**) Innovación de Productos y Procesos

Resumen: El sistema BERENICE tiene por objetivo la programación, a partir de pedidos, de una cadena de producción automatizada, teniendo en cuenta las restricciones debidas a la capacidad de la cadena, la disponibilidad de moldes necesarios para la fabricación de cada producto y la disponibilidad de materias primas. Las materias primas presentan un tiempo de elaboración importante (alrededor de una semana) y el sistema BERENICE establece, también, las necesidades de materiales y las órdenes de fabricación correspondientes. Los procedimientos utilizados, para todo ello, son esencialmente heurísticos.

1. INTRODUCCION

Una empresa productora de prótesis dentales decidió cambiar su proceso de fabricación, inicialmente manual, por otro proceso altamente automatizado. Para ello, pidió nuestra colaboración en la construcción de un sistema de ayuda a la programación diaria de productos y planificación semanal de materias primas. Dicho sistema, teniendo en cuenta la cartera de pedidos activos, debía determinar: (1) las órdenes a comunicar al ordenador controlador del robot y demás elementos constituyentes de la nueva cadena y (2) las órdenes de fabricación (semanales) de materias primas.

El objeto del presente texto es describir brevemente algunos aspectos del proyecto desarrollado, tales como: el proceso de fabricación, la concepción del sistema de ayuda (BERENICE), la base de datos, los procedimientos, y las experiencias que se obtuvieron, inicialmente, por simulación.

2. EL PROCESO DE FABRICACION

La fabricación de prótesis dentales se realiza a una presión y temperatura concretas. Para ello, se utilizan moldes metálicos

construidos con una gran precisión y dos o tres obleas de pasta obtenida a partir de resinas poliméricas.

La naturaleza de las obleas (resinas componentes) determina el denominado color del producto. Por su parte, la forma dada por el molde es la que caracteriza un modelo.

Algunos modelos tienen tres capas (dentina, esmalte y cuello), otros, solamente dos; cada una de estas capas se forma a partir de una oblea; la combinación de obleas (el color, desde el punto de vista comercial) configura la naturaleza de la pieza.

Un juego de moldes está compuesto por una parte inferior, una superior y dos o tres cilindros que sirven para ejercer presión sobre los discos u obleas.

La preparación de las obleas lleva un cierto tiempo (del orden de una semana) y, para evitar la reacción química que haría inutilizable el material, es preciso mantenerlas refrigeradas estrictamente. A pesar de esta prevención, tras cierto tiempo, el material se degrada y no es posible obtener productos de buena calidad a partir de obleas que han madurado en exceso. Ello obliga a prever, con antelación de una semana, cuál será el consumo de obleas (consumo de colores) en el futuro.

Debido al importante coste, el número de ejemplares o réplicas de un molde está limitado (no más de diez). Puesto que un molde tarda un tiempo de TR minutos en recorrer toda la cadena, el número de veces que un molde puede utilizarse en una jornada laboral de TJ minutos, es, como máximo, $CD=INT(TJ/TR)$ veces (número de ciclos por jornada). Además, la cadena presenta una capacidad CL que limita el número de moldes tratados a la vez, lo que conduce a una producción diaria máxima de $CL \cdot CD$ moldeos al día. Un molde, en función del modelo, produce tres, cuatro o cinco juegos de prótesis.

Un juego de dientes es un conjunto de piezas, cuya configuración responde a la tradición comercial de la empresa, de dientes o muelas, superiores o inferiores.

Los colores también marcan restricciones al sistema productivo. Por una parte no es conveniente la fabricación ni el consumo diario (por razones de espacio en la línea) de muchas obleas

distintas, ello supone una limitación del número de colores disponibles y planificables diariamente; por otra, debido al sistema actual de clasificación, es conflictivo que un mismo modelo consuma simultáneamente muchos colores diferentes.

Los pedidos que llegan al sistema productivo son muy variados, tanto desde el punto de vista cualitativo (tipos de producto), como desde el punto de vista cuantitativo (cantidad).

3. CONCEPCION DEL SISTEMA

Las funciones que debe cumplir el sistema son de dos tipos, a saber:

1. Planificación a una semana vista de los COLORES:

Para determinar los COLORES que se consumirán la próxima semana y establecer las órdenes de fabricación de las obleas componentes.

2. Programación diaria de los PRODUCTOS:

Para determinar los productos a fabricar al día siguiente

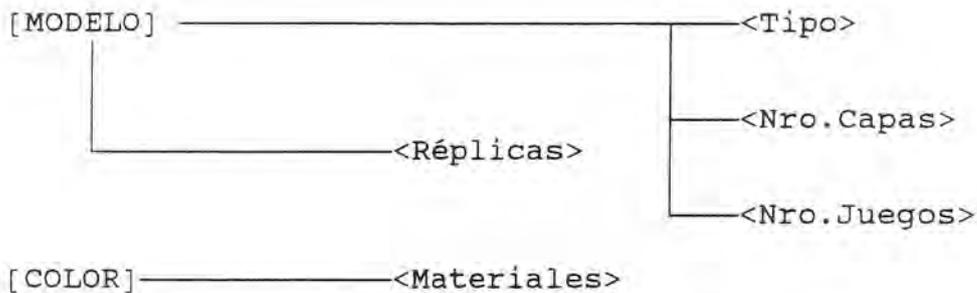
A las restricciones inducidas por el propio sistema productivo (ciclos día, capacidad de la línea, número de réplicas de cada modelo, etc.), hay que añadir todas aquellas derivadas de la disponibilidad y consumo preferente de materiales (obleas).

Tanto la programación diaria de productos como la planificación semanal de colores se obtiene, esencialmente, a partir de una simulación determinista en la que los productos contenidos en la cartera de pedidos en proceso se lanzan, tentativamente, en función de un coeficiente de prioridad que tiene en cuenta el volumen, variabilidad y fecha de los pedidos en proceso y, finalmente, las producciones históricas del catálogo de productos.

4. LA BASE DE DATOS

Los productos se definen como la combinación o reunión (en el sentido de la teoría de conjuntos) de dos aspectos o módulos: el modelo y el color. Cada módulo presenta, a su vez, varias

características o atributos. Siguiendo la formalización que hemos utilizado en otros proyectos anteriores (v.g. proyecto ARTEMISA), para nosotros las características están ligadas a las necesidades de recursos críticos; de manera que dos tipos de producto que presentan el mismo valor en una característica determinada tienen la misma necesidad de consumo del recurso, o subconjunto de recursos, asociado a ella. En tales condiciones podrá hablarse de intercambiabilidad entre productos desde el punto de vista de la fabricación. Por su parte, los atributos sirven, en nuestro esquema, para definir subconjuntos de tipos de producto atendiendo a restricciones o condiciones no ligadas a los recursos materiales (ver esquema E1).



E1. Esquema modular de la Base de Datos

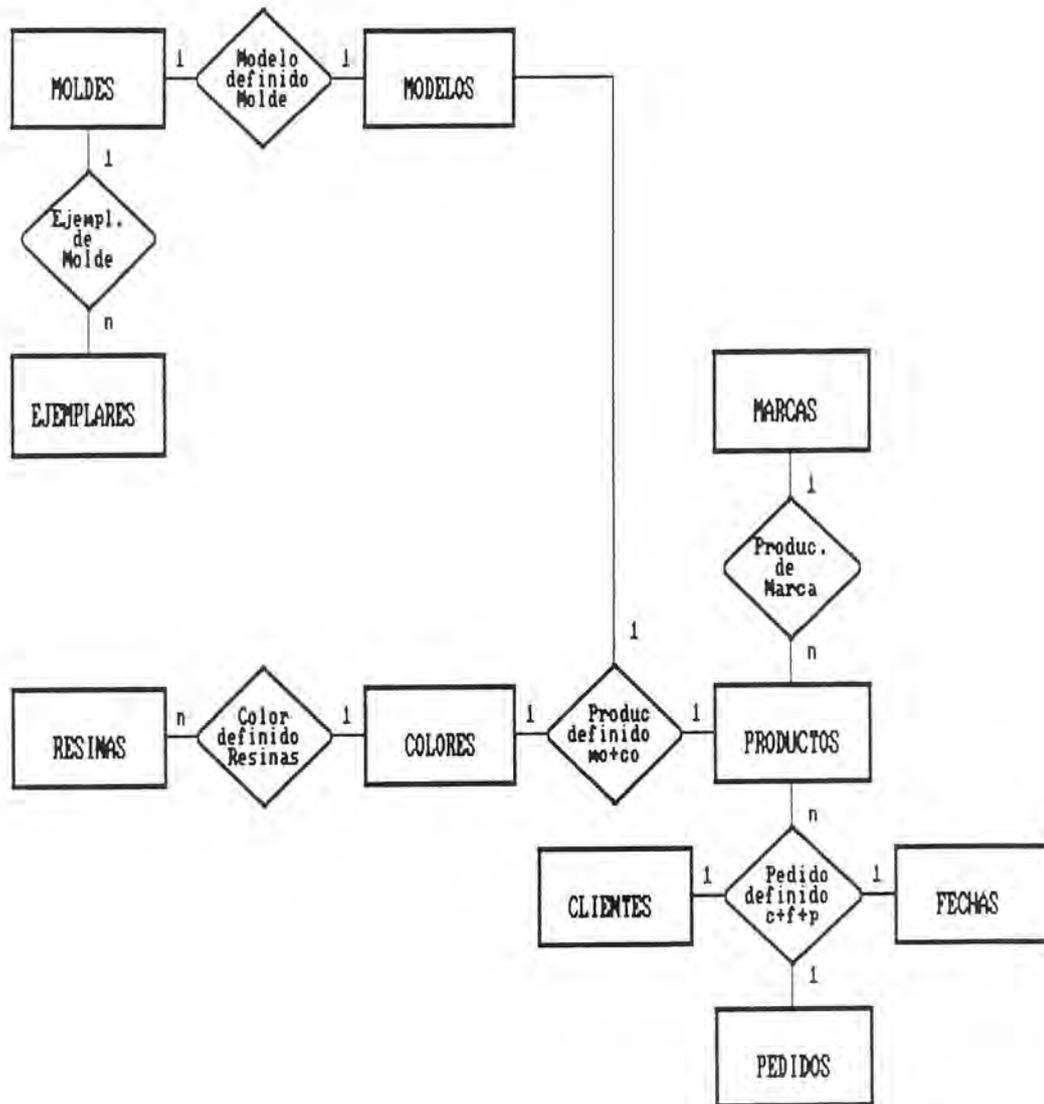
El número de instancias-modelo es del orden de 180 y el número de instancias-color de 90; ello supone la existencia de unos 15000 tipos de producto potencialmente diferentes, pero, debido a ciertas agrupaciones modelo-color (marcas comerciales) y a la concentración del mercado sobre ciertos productos, el número de productos activos es del orden de 3500.

Además, la Base contiene otros datos de interés como los que se refieren a clientes, pedidos y el conjunto de parámetros propio del sistema productivo (ver figura-1).

5. FUNCIONES DEL SISTEMA

Sucintamente, el sistema BERENICE presente en su versión actual las siguientes funciones y tratamientos:

LA BASE DE DATOS



- NUMERO DE INSTANCIAS MODELOS	:	1 8 0
- NUMERO DE INSTANCIAS COLOR	:	9 0
- NUMERO DE PRODUCTOS POTENCIALES	:	1 4 . 6 0 0
- NUMERO DE PRODUCTOS ACTIVOS	:	3 . 5 0 0
- NUMERO DE PEDIDOS/ANUAL	:	7 0 0

Figura.1- La BASE de DATOS

f1. ACCESO A BASES

f11. Datos de Productos

f111. Tratamiento de Marcas (A,B,C,M,L) ¹

f112. Tratamiento de Modelos (A,B,C,M,L)

Atributos: D/M

No. capas

No. réplicas

Tipo de oblea

f113. Tratamiento de Colores (A,B,C,M,L)

Atributos: No. capas

Resinas (3 posibles para dientes +

3 posibles para muelas)

Alta de resinas

f12. Datos de Clientes (A,B,C,M,L)

Atributos: Tipo

Nombre

Dirección

Población

País

Zona

Fecha de alta

Fecha último pedido

NIF

f13. Cartera de Pedidos (A,B,M,C,L)

Atributos: Referencia

Cliente

Fecha

Modelos-colores-cantidades

Status

f14. Datos históricos (M,C,L; datos estadísticos)

Atributos: Modelo-Color-Cantidad

[1] Las abreviaturas A, B, C, M y L significan respectivamente altas, bajas, consultas, modificaciones y listados.

f2. OPERACIONES PRE-PROGRAMA

- f21. Recepción del Robot
Realimentación de la Línea Automática (producción realizada)
- f22. Consulta del Programa a consolidar
- f23. Selección y expedición de Pedidos
Se consideran dos estados posibles para los pedidos:
(I) Introducido.- Puede modificarse, anularse y pasar a proceso (seleccionarse)
(P) Seleccionado.- Puede des-seleccionarse y darse por finalizado (expedirse).
Un pedido seleccionado cuando se expide se considera finalizado y desaparece de la base. Su contenido se detrae de la obra en curso; caso de anomalía se indicará, pero el operador tiene siempre la última palabra. La velocidad del tratamiento depende del tamaño de las bases, por lo que es fundamental eliminar los pedidos terminados y expedidos.
- f24. Confirmar Programa
Añadir a la Obra en Curso las cantidades expresadas en el Programa de Producción (según f21)
- f25. Confirmar Obra en Curso (C,M,L)
Entendemos por obra en curso de cada producto a la cantidad en juegos del mismo que existe desde la salida de la Línea hasta la expedición de pedidos. Por consiguiente se incluyen los juegos en los bombos antes, durante y después del desbarbado; en las cajitas antes y después de la clasificación; en las tablillas durante la formación real de pedidos, y en stock.
- f26. Pedidos expeditibles
Cálculo y presentación del estado de compleción de los pedidos en proceso tras la asignación (en orden de prioridades) de la Obra en Curso.
- f27. Disponibilidad de Colores

f28. Disponibilidad de Réplicas

f3. CALCULO DEL PROGRAMA DE PRODUCTOS

Trás la introducción de los Colores disponibles (f28) para cada día del horizonte de programación (5 días máximo), se realiza una simulación lanzando tentativamente instancias modelo-color-cantidad, por orden prioritario, de aquellos pedidos seleccionados para ser procesados (f23).

En el lanzamiento se tiene en cuenta, además de las notas dadas a las instancias, la disponibilidad de réplicas y de colores, la compleción de lotes mínimos y la demanda histórica.

f4. CALCULO DEL PROGRAMA DE COLORES

La presente función realiza inicialmente los mismos cálculos que la f3 (lanzamiento simulado de instancias de los pedidos en proceso, agotando los colores disponibles). Trás ello, y una vez establecidas la situación de la Obra en Curso y las instancias pendientes por programar, se seleccionan varios colores (hasta un máximo establecido por el usuario) siguiendo, fundamentalmente, los criterios de antigüedad y volumen del color. Los colores candidatos a la selección son los que en principio figuran en la base de producción pendiente.

f5. OPERACIONES POST-PROGRAMA

f51. Modificar Programa de Productos

f52. Emisión al Robot

Envío del Programa determinado por BERENICE al PC que controla la Línea.

f53. Recepción del Robot (Idem f21)

f54. Consulta del Programa a consolidar (Idem f22)

f55. Confirmar Programa (Idem f24)

f56. Consultar Programa de Colores

f6. PARAMETROS DEL SISTEMA

El sistema BERENICE ofrece una gran flexibilidad en cuanto a la definición del sistema productivo para el que debe destinarse. Ello se realiza mediante la variación de los parámetros que intervienen en las diferentes funciones y tratamientos. Estos parámetros son:

- Número de ciclos por día
- Número de moldes por ciclo (capacidad de la línea).
- Número máximo de colores a consumir en un día de producción.
- Número máximo de colores utilizados simultáneamente en un día de producción.
- Número máximo de colores antiguos que deben tomarse en la selección para definir el Plan de Colores.
- Lote mínimo de fabricación de obleas (mortadelas o conjunto de obleas) en el horizonte del Plan.
- Lote mínimo de fabricación de producto en un día.
- Nivel de stock máximo permitido por producto.
- Rendimiento de fabricación (tanto por uno).
- Número de días de horizonte de Planificación de Colores.

En la figura-2 se presenta un esquema global del sistema BERENICE.

6. PROCEDIMIENTOS (Explotación regular del Sistema)

Bajo el supuesto de que la programación se va a realizar día a día y después de la jornada de trabajo, el horizonte de la programación se divide en dos períodos: el primero compuesto por los cinco primeros días, y el segundo por el resto. Esta división está originada por el plazo de obtención de obleas que actualmente se fija en cinco días laborables (una semana). Durante el período primero, la fabricación estará condicionada fuertemente por el número de obleas disponibles, ya en diferentes estadios de elaboración. En el segundo período la única limitación vendrá impuesta por el número máximo diario de colores. La secuencia de acciones a realizar en la programación será la siguiente:

0.- La introducción de pedidos en el sistema BERENICE se hace

SISTEMA BERENICE

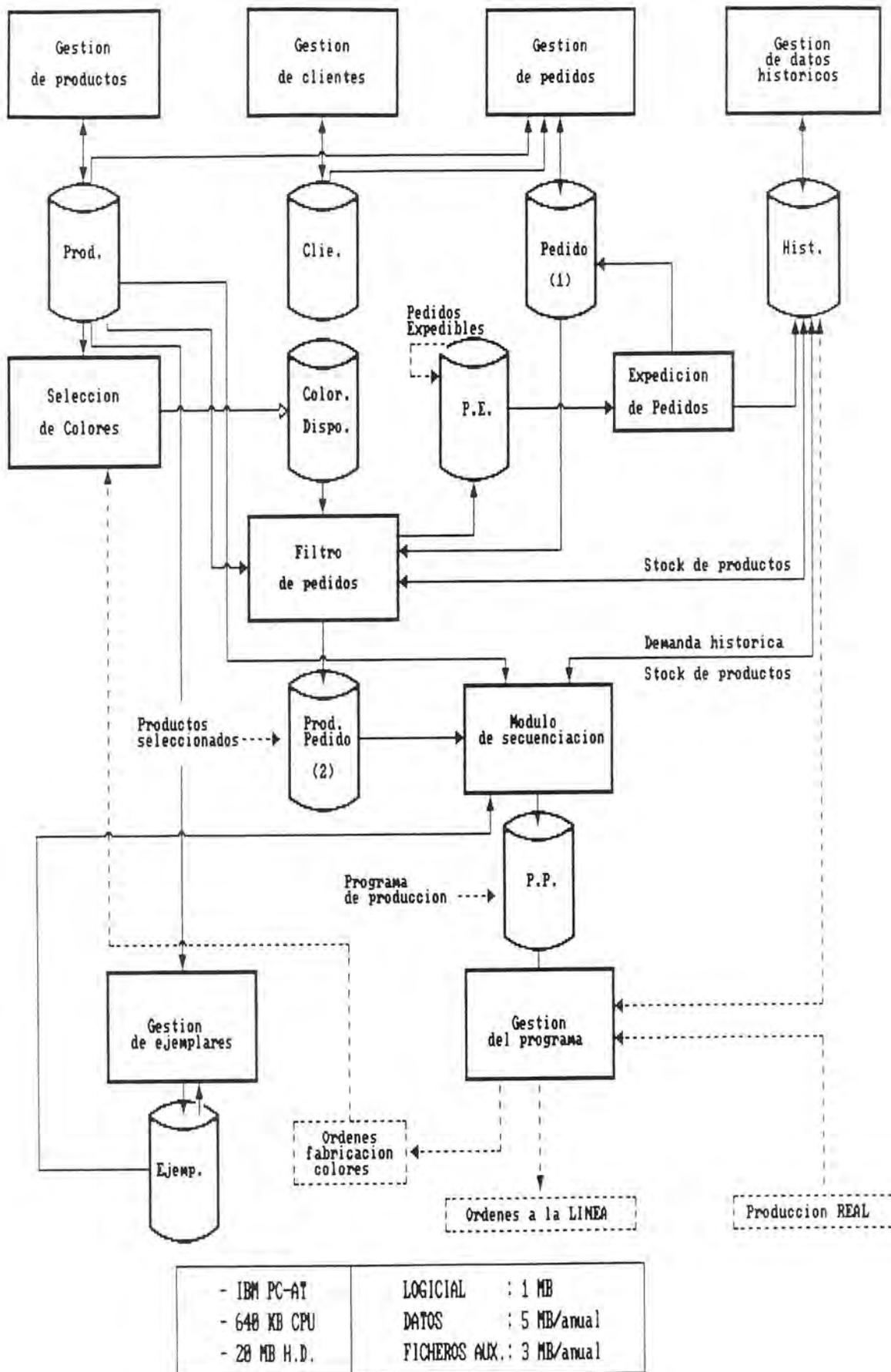


Figura.2- Esquema global del Sistema BERENICE

sobre la marcha a medida que se producen sus llegadas a la fábrica. Sin embargo, la decisión de que un pedido sea tenido en cuenta o no para la programación la toma siempre el usuario mediante la función f23.

1.- Entrada de la realimentación de la Línea Automatizada, relativa a la producción efectiva realizada. Con ello se dispondrá de la información precisa para la actualización de la base de datos respecto a productos-pedido pendientes y obra en curso disponible.

1.1.- Emisión del listado de pedidos expedibles (que pueden cumplimentarse).

2.- Confirmación de situación de pedidos y obra en curso:

2.1.- Indicación al sistema de los pedidos cumplimentados y expedidos a los clientes.

2.2.- Confirmación de la obra en curso existente (por excepción y en forma regular tres o cuatro veces al año).

2.3.- Selección de pedidos para el proceso de programación (modificaciones respecto a la situación anterior).

Sólo se considerarán en la programación los pedidos seleccionados, por lo cual, salvo circunstancias muy excepcionales (cartera de pedidos pendientes muy grande), deberán seleccionarse todos los pedidos debidamente introducidos. Pueden utilizarse pedidos virtuales cuando la cartera sea reducida, si se desea evitar que la Línea se quede parada por falta de un programa de producción, pedidos que se eliminarán de la programación cuando queden substituídos por pedidos reales.

3.- Confirmación de las disponibilidades productivas:

3.1.- Confirmación de los colores/cantidades disponibles los próximos cinco días. Dichos colores y cantidades habrán sido objeto de los programas emitidos los cinco días anteriores; en una situación ideal los valores deberían coincidir con los programados.

3.2.- Confirmación del número de réplicas disponibles

(comunicación por excepción de las modificaciones producidas).

4.- Programación en firme de los moldeos a realizar el día siguiente.

4.1.- Preparación de un fichero para el controlador de la Línea Automatizada indicando por lo menos:

molde - color - cantidad

Puesto que durante la programación se ha determinado una secuencia posible, puede comunicarse también dicha secuencia.

5.- Programación indicativa de los 4 siguientes días.
(Siguiendo el mismo procedimiento que en 4)

6.- Determinación de los colores más adecuados para el día 6°. Advertimos que "el sexto día" contiene, para nosotros, todo el horizonte de Planificación de Colores.

7.- Programación tentativa del día 6°:
(siguiendo el mismo procedimiento que en 4)

7.1.- Determinación de las cantidades necesarias de cada color.

7.2.- Emisión del programa de fabricación de mortadelas.

A continuación veremos con mayor detalles los procedimientos empleados en las acciones 4 y 7.

7. PROGRAMACION EN FIRME DEL PROXIMO DIA

7.1. Consideraciones previas

La secuencia de los productos a fabricar se hace teniendo en cuenta los siguientes factores:

(1) Las instancias modelo-color-cantidad correspondientes a los pedidos que figuran en la cartera con status de proceso. El usuario es siempre el que decide que pedidos se seleccionan

(des-seleccionan) para ser considerados en la programación.

(2) La disponibilidad de los colores en el día tratado. Dicha disponibilidad será introducida por el usuario atendiendo a la reservas de obleas contenidas en el almacén refrigerado. A su vez, la presencia de las obleas en el almacén se debe, normalmente, a la elaboración realizada la semana anterior bajo las indicaciones dadas por BERENICE (concretamente, el resultado dado por la función f4).

Lógicamente, las instancias modelo-color-cantidad de los pedidos en procesos que presenten un color no disponible no se programarán. Por otra parte, si el número de colores disponibles supera al máximo permitido, el sistema elegirá los más convenientes mediante un procedimiento que veremos posteriormente.

(3) La disponibilidad de moldes, es decir, las réplicas de cada modelo con las que se cuenta para realizar la producción en el día. Esto limitará el número de lanzamientos de un mismo modelo -i- en la cantidad:

$$\text{Moldeos_máximo}(i) = \text{NR}_i \cdot \text{CD}$$

donde:

NR_i es el número de réplicas disponibles para el modelo i .
 CD es el número de ciclos al día.

(4) La capacidad de la línea, concepto al que también nos hemos referido como número de moldes por ciclo. Ello supondrá, de cara al proceso de simulación, que un molde concreto no quedará libre hasta el siguiente ciclo y, concretamente, con una separación entre lanzamientos igual a la Capacidad de la Línea CL .

(5) La Nota o prioridad de las instancias pedido-modelo-color. Para la asignación de nota a cada instancia se tendrá en cuenta los siguientes elementos prioritarios:

(1) La NOTA del Pedido

- Antigüedad del Pedido (NA): Se establece una función lineal del retraso.
- Volumen del Pedido (NPE): Se establece una función

convexa dependiente del tiempo inevitable para finalizar el Pedido.

(2) La NOTA del Producto (NPR)

Se establece una función lineal dependiente de:

- Volumen del Producto: Porcentaje del producto dentro del pedido
- Volumen del modelo: Tiempo necesario para realizar el modelo (dentro del pedido) teniendo en cuenta el número de réplicas disponible. Definitivamente:

$$\text{NOTA FINAL} = \text{ALFA} \cdot \text{NA} + \text{BETA} \cdot \text{NPE} + \text{GAMMA} \cdot \text{NPR}$$

NF_{ijk} : Nota del Producto-Pedido

(6) Lotes mínimos de fabricación de cada producto

(7) La Demanda Histórica

La secuencia definitiva (definición del modelo y color en orden de introducción y procesamiento en la cadena) es un problema fácil de formular y, a la vez, difícil de resolver debido al tipo y número de variables que surgirían al plantear, por ejemplo, un programa lineal binario.

Una método clásico para abordar el problema consiste en resolver, jerárquicamente por fases, una serie de problemas, obteniendo, en la última, una solución final. En primer lugar se determinan los tipos y cantidades de productos a fabricar en un día. Seguidamente, se procede a establecer una secuencia de producción siguiendo algún criterio razonable.

7.2. Modelos lineales para la selección diaria de productos

Aunque el procedimiento adoptado definitivamente, y consolidado en BERENICE, se basa en la simulación determinista, se describe a continuación, fundamentalmente para fijar ideas, un modelo lineal para determinar el programa de producción de un día determinado. En la **Tabla-1** se presenta la nomenclatura del modelo; asimismo, la **Tabla-2** muestra la formulación del mismo.

El hecho de haber abandonado, hasta el presente, la vía de resolución mediante algún algoritmo de PLE se debe, en esencia,

a dos carencias:

(1) Rapidez: Las variables que intervienen en el modelo son enteras y, aunque el número de las mismas no es muy elevado¹, los tiempos de ejecución suelen ser grandes, hecho contrapuesto a la forma en que debía trabajar el usuario, configurando varias alternativas de cartera de pedidos en proceso y esperando las soluciones que el sistema ofrece.

(2) Control: Cada vez es mayor la tendencia a comandar los sistemas productivos en tiempo real para responder a posibles incidencias, ello no sólo exige respuestas rápidas sino también confeccionar, aunque sea alternativamente, procedimientos que ofrezcan una parte de la solución (la requerida de inmediato) sin esperar a tener una solución global.

Indices

k : Pedido genérico
i : Modelo genérico
j : Color genérico
t : Ciclo genérico

Constantes diarias y parámetros

NP : Número de pedidos en cartera-selección
NM : Número de modelos en cartera de pedidos
NC : Número de colores disponibles
CD : Número de utilizaciones de un molde por día
CL : Capacidad de la Línea
DC_j : Disponibilidad del color **j** (un día determinado)
NR_i : Número de moldes del modelo **i**
L_{i,j} : Lote mínimo del producto (**i,j**)
DH_{ij} : Demanda histórica del producto (**i,j**)
d_{ijk} : Demanda actual corregida del producto (**i,j**) del pedido **k**
NP_{ijk} : Nota del producto-pedido (**i,j,k**)

Variables

X_{ijk} : Producción de (**i,j,k**) en el día
X_{ijkt} : Producción de (**i,j,k**) en el ciclo **t**
Y_{ij} : Variable binaria que indica si (**i,j**) se fabrica o no.

Tabla-1: Nomenclatura del modelo de producción diaria

[1] El número de instancias producto-pedido en la cartera de selección es del orden de 3000.

Disponibilidad de Colores

$$[r1.1] \quad \sum_i \sum_k X_{ijk} \leq DC_j \quad \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC$$

Disponibilidad de moldes

$$[r2.1] \quad \sum_j \sum_k X_{ijk} \leq NR_i \cdot CD \quad \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM$$

Capacidad de la Línea

$$[r3.1] \quad \sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk} \leq CL \cdot CD$$

Lotes mínimos de fabricación

$$[r4.1] \quad \sum_k X_{ijk} \geq L_{ij} \cdot Y_{ij} \quad \begin{array}{l} \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM \\ \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC \end{array}$$

Satisfacción de la demanda

$$[r5.1] \quad X_{ijk} \leq d_{ijk} \quad \begin{array}{l} \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM \\ \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC \\ \text{para todo } k = 0, 1, \dots, NP \end{array}$$

Función objetivo

$$[r0.1] \quad [MAX] \quad Z = \sum_i \sum_j \sum_k NF_{ijk} \cdot X_{ijk}$$

Tabla-2: Modelo MPD1 de producción diaria (ver-1)

En el modelo presentado en la **Tabla-2**, las restricciones [r1.1] expresan que el programa de producción no debe consumir más obleas (agrupadas en colores) que las disponibles; las [r2.1] indican, para cada modelo, la limitación productiva diaria máxima debida a la disponibilidad de moldes, asimismo, la restricción [r3.1] establece una limitación productiva global; por su parte, la exigencia de una masa crítica para el proceso de desbarbado exige producciones mínimas, ello se expresa en las restricciones [r4.1]; también se persigue satisfacer, con

ciertas prioridades, la demanda, para ello se limitan las producciones a fin de no generar más stock del necesario (restricciones [r5.1]) y se establece una nota global del programa de producción con objeto de maximizarla (función objetivo [r0.1]).

Disponibilidad de Colores

$$[r1.2] \quad \sum_i \sum_k \sum_t X_{ijkt} \leq DC_j \quad \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC$$

Disponibilidad de moldes

$$[r2.2] \quad \sum_j \sum_k X_{ijkt} \leq NR_i \quad \begin{array}{l} \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM \\ \text{para todo } t = 1, 2, \dots, CD \end{array}$$

Capacidad de la Línea

$$[r3.2] \quad \sum_i \sum_j \sum_k X_{ijkt} \leq CL \quad \text{para todo } t = 1, 2, \dots, CD$$

Lotes mínimos de fabricación

$$[r4.2] \quad \sum_k \sum_t X_{ijkt} \geq L_{ij} \cdot Y_{ij} \quad \begin{array}{l} \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM \\ \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC \end{array}$$

Satisfacción de la demanda

$$[r5.2] \quad \sum_t X_{ijkt} \leq d_{ijk} \quad \begin{array}{l} \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM \\ \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC \\ \text{para todo } k = 0, 1, \dots, NP \end{array}$$

Prioridad y congruencias cíclicas

$$[r6.2] \quad \sum_i \sum_j \sum_k NF_{ijk} \cdot (X_{ijkt} - X_{ijkt+1}) \geq 0 \quad \text{para todo } t = 1, 2, \dots, CD-1$$

Función objetivo

$$[r0.2] \quad [MAX] Z = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t NF_{ijk} \cdot X_{ijkt}$$

Tabla-3: Modelo MPD2 de producción diaria (ver-2)

En **MPD1**, la restricción de producción máxima diaria [r3.1] presenta un término independiente expresado a través del producto de dos términos: longitud de la cadena (**CL**) y el número de veces que un molde puede utilizarse en un día de producción (**CD**). A este segundo concepto lo denominamos ciclo regenerativo de disponibilidad de molde y su valor¹, medido en moldeos equivalentes, es igual a la longitud de la cadena **CL**.

Esta observación permite afinar más el modelo de selección, pues sugiere la creación de paquetes de subprogramas de producción (tantos como ciclos) de idéntico tamaño **CL**. El problema puede verse, entonces, como el relleno o recubrimiento de un área rectangular de dimensiones **CLxCD** (véase figura-3) siguiendo una serie de reglas pautadas por las restricciones y el objetivo perseguido.

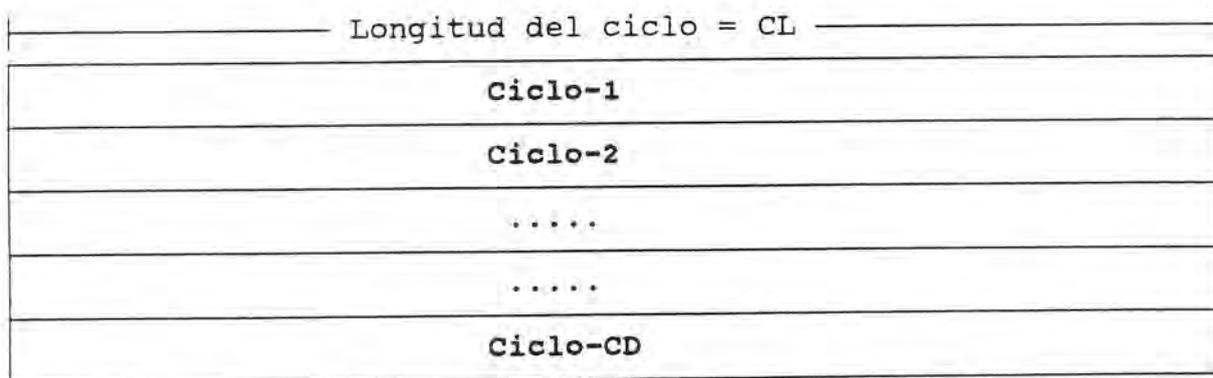


Figura-3: Mapa del programa de producción

La versión-2 del modelo lineal (**MPD-2**) presentada en la **Tabla-3** es la que, justamente, describe esta forma de ver el problema. En dicha versión, las restricciones y función objetivo incluyen el concepto de ciclo regenerativo. Se ha añadido, además, el bloque de restricciones [r6.2] a fin de ordenar, prioritariamente, las operaciones (moldeos) realizadas en cada ciclo; con ello, no sólo se descartarían soluciones equivalentes, en caso de recurrir a la programación lineal, sino también se obtendrían soluciones fáciles de manejar para la construcción defi-

 [1] Puede medirse, también, en unidades de tiempo, en cuyo caso el valor del ciclo regenerativo es igual al mínimo tiempo necesario para que un molde concreto esté disponible entre dos entradas consecutivas a la cadena sin que se haya producido rotura de secuencia.

nitiva de la secuencia de introducción a la línea siguiendo el criterio de lanzar, lo más pronto posible, las operaciones que, por nota, se consideran prioritarias; en definitiva, los ciclos resultantes, también, estarían ordenados por notas.

7.3. Procedimiento heurístico para la selección de productos

Con los elementos básicos introducidos anteriormente es fácil diseñar heurísticas que permitan la obtención rápida de una solución. El procedimiento incorporado en **BERENICE** consiste, esencialmente, en realizar una simulación, ciclo a ciclo, del funcionamiento de la cadena: (1) lanzando, según prioridad, las operaciones, o fracciones de las mismas, que satisfagan el conjunto de restricciones hasta saturar la capacidad del ciclo, (2) regenerando la disponibilidad de réplicas al finalizar un ciclo y (3) fabricando para stock, hasta un cierto límite (a partir del cual se dejan huecos en la simulación de la cadena), si se agotan todas las instancias de los pedidos en proceso o, simplemente, no es posible el lanzamiento de las instancias pendientes.

Con algo más de detalle, los pasos seguidos para la selección diaria de productos son los siguientes:

p0. PREPARACION DE DATOS

p0-1. Purga de pedidos. Determinación de las demandas corregidas

Una vez configurada por el usuario la cartera de pedidos en proceso, se procede a la ordenación de ésta según una nota que resume, esencialmente, la antigüedad, el volumen y diversidad de cada pedido. Seguidamente, y por el orden establecido, se eliminan o modifican las instancias producto-pedido que pueden ser cubiertas total o parcialmente por las reservas contenidas en la obra en curso; lógicamente, las reservas utilizadas se detraen de esta última base.

Los resultados de este paso son: la cartera de pedidos purgada y la obra en curso actualizada temporalmente.

p0-2. Selección de colores para la programación a partir de unas disponibilidades de obleas.

En situación ideal, un determinado día, existirán obleas sólo de Q^1 colores en cantidades definidas, por lo que la selección es trivial y forzada. En ciertos casos pueden estar disponibles obleas de más de Q colores; en tales circunstancias, se toman, de entre los disponibles, Q colores constituidos en dos grupos de tamaño establecido por el usuario mediante una proporción y cuya formación responde a los criterios siguientes:

(1) Antigüedad: Se eligen preferentemente los colores que aparecen en los pedidos más antiguos.

(2) Area: Se eligen preferentemente los colores que mejor rellenan el mapa del programa de producción (posteriormente incidiremos sobre este punto).

Trás las selección de colores, se genera, a fin de proporcionar mayor rapidez a los pasos siguientes, un subcatálogo de productos (reunión de los que figuran en la cartera de pedidos purgada).

p0-3. Cálculo de notas de instancias producto-pedido

Ver punto.5 del parágrafo 7.1.

p1. RELLENO DE CICLOS REGENERATIVOS

Se consideran tres pilas o colas de órdenes, a saber:

(1) Cola de órdenes dinámicas OL, generadas internamente por el algoritmo a fin de completar lotes mínimos de fabricación

(2) Cola de órdenes de demanda OD (son las que propiamente corresponden a las necesidades netas)

(3) Cola de demanda histórica OH que actúa como previsión cualitativa con objeto de decidir fabricaciones para stock.

Se considera también una pila de reservas de productos RP cuyo valor inicial corresponde al de la obra en curso actualizada

[1] Sea Q el número máximo de colores diario definido por el usuario.

temporalmente (**RP0**). Sólo se tienen en cuenta aquellos productos con producción inferior al lote mínimo de fabricación

p1-0. Iniciación

Se incrementa el contador de ciclos en una unidad; si el valor sobrepasa al máximo establecido, se pasa a **p-2**.

Se inicia la simulación del ciclo regenerando el número de réplicas de cada modelo a su valor máximo disponible y haciendo la capacidad actual del ciclo igual a la capacidad de la línea **CL**.

p1-1. Tratamiento de la lista OL

Se recorre la pila **OL** a partir de la primera orden. Se determina el valor del lanzamiento tomando el mínimo valor entre:

- (1) unidades disponibles del color
- (2) réplicas disponibles del modelo
- (3) capacidad actual del ciclo
- (4) valor de la orden

Se detrae el valor del lanzamiento a los objetos asociados a los conceptos anteriores.

Se añade el valor del lanzamiento a la pila **RP**¹.

Si el valor actual de la orden² es cero, se elimina la orden.

Si la capacidad actual del ciclo es igual a cero, se vuelve a **p1-0**.

Si la capacidad actual del ciclo es mayor que cero, se distinguen dos casos:

- (a) Si quedan órdenes pendientes en **OL**, se pasa a la siguiente orden.
- (b) Si se han agotado las órdenes pendientes, se pasa a **p1-2** (lista **OD**).

p1-2. Tratamiento de la lista OD

Se recorre la lista **OD** a partir de la primera orden, cabe distinguir dos casos, a saber:

[1] La pila **RP** hay que entenderla como una base de producción adelantada

[2] Valor_actual -> Valor_actual - Valor_Lanzamiento

p1-2.1. El producto ha sido lanzado anteriormente

Se reduce el valor de la orden en una cantidad igual al mínimo entre la disponibilidad en la lista **RP** y el valor de la orden; se reduce, también, en dicho mínimo la disponibilidad en **RP**.

Si el valor actual de la orden es cero, se elimina la orden; se pasa a la siguiente orden.

Si el valor actual de la orden es mayor que cero, se determina el valor del lanzamiento tomando el mínimo valor entre:

- (1) unidades disponibles del color
- (2) réplicas disponibles del modelo
- (3) capacidad actual del ciclo
- (4) valor de la orden

Se detrae el valor del lanzamiento a los objetos asociados a los conceptos anteriores.

Se añade el valor del lanzamiento a la pila **RP**.

Si el valor actual de la orden es cero, se elimina la orden.

Si la capacidad actual del ciclo es igual a cero, se vuelve a **p1-0**.

Si la capacidad actual del ciclo es mayor que cero, se distinguen dos casos:

- (a) Si quedan órdenes pendientes en **OD**, se pasa a la siguiente orden.
- (b) Si se han agotado las órdenes pendientes, se pasa a **p1-3** (lista **OH**).

p1-2.2. El producto debe lanzarse por primera vez

Se determina si es posible fabricar un lote mínimo de producción con la disponibilidad de colores actual y la disponibilidad de moldes acumulada desde el ciclo en proceso hasta el último.

Si no es posible realizar un lote mínimo, se rechaza la orden; se pasa a la siguiente.

Si es posible realizar un lote mínimo, se determina el valor del lanzamiento tomando el mínimo valor entre:

- (1) unidades disponibles del color
- (2) réplicas disponibles del modelo

- (3) capacidad actual del ciclo
- (4) valor de la orden

Se detrae el valor del lanzamiento a los objetos asociados a los conceptos anteriores.

Se añade el valor del lanzamiento a la pila **RP**.

Se genera, también, una orden dinámica y se introduce en la cola de la lista **OL** (el valor de esta orden es el del lote mínimo menos el del lanzamiento).

Si el valor actual de la orden es cero, se elimina la orden.

Si la capacidad actual del ciclo es igual a cero, se vuelve a **p1-0**.

Si la capacidad actual del ciclo es mayor que cero, se distinguen dos casos:

- (a) Si quedan órdenes pendientes en **OD**, se pasa a la siguiente orden.
- (b) Si se han agotado las órdenes pendientes, se pasa a **p1-3** (lista **OH**).

p1-3. Tratamiento de la lista OH

Se recorre la lista **OH** a partir de la primera instancia¹. Se determina si el producto tomado en **OH** presenta un valor, en la lista **RP**, igual o superior a un límite superior de reserva establecido (**LS**)². En tal caso, se inhibe la instancia; se pasa a la siguiente.

Si el valor de reserva es inferior a **LS**, se determina el valor del lanzamiento tomando el mínimo valor entre:

- (1) unidades disponibles del color
- (2) réplicas disponibles del modelo
- (3) capacidad actual del ciclo
- (4) **LS** menos valor de reserva

Se detrae el valor del lanzamiento a los objetos asociados a los conceptos (1), (2) y (3).

[1] La ordenación en la lista **OH** se establece por orden decreciente de la demanda histórica.

[2] El lector puede comprobar que esta condición queda reflejada en los modelos lineales presentados más arriba a través de las limitaciones de demanda del que hemos denominado **pedido-0**.

Se añade el valor del lanzamiento a la pila **RP**.

Si la capacidad actual del ciclo es igual a cero, se vuelve a **p1-0**.

Si la capacidad actual del ciclo es mayor que cero, se distinguen dos casos:

(a) Si quedan instancias pendientes en **OH**, se pasa a la siguiente instancia.

(b) Si se han agotado las instancias pendientes, se dejan huecos en la cadena. Se vuelve a **p1-0**.

p-2. OBTENCION DEL PROGRAMA DE PRODUCCION

Evidentemente, el programa de producción (**PP**), determinado a través del procedimiento anterior, es la pila diferencia entre las pilas de reserva actual e inicial ($PP = RP - RP0$).

El sistema BERENICE salva también la traza de relleno de ciclos, con lo que se obtienen, además, partes del programa encapsuladas en paquetes (ciclos) de **CL** unidades. Ello permite, si se desea utilizar el criterio de secuenciación por prioridad, obtener una secuencia de producción cuasi-inmediatamente.

8. SELECCION DE COLORES DEL DIA-6

Denominamos día-6 al periodo para el que se deciden, tras la programación tentativa en los días precedentes en los que existe disponibilidad de colores, las obleas (mortadelas) que deben fabricarse para que la materia prima esté disponible en el momento adecuado.

Definitivamente, el presente problema consiste en determinar qué obleas y en qué cantidades deben empezar a fabricarse para disponer de ellos una semana más tarde.

Para resolver el problema, nos apoyaremos en el concepto de mapa de producción presentado en la figura-3, en el sentido de que el objetivo perseguido consiste en recubrir un área (múltiplo de $CD \cdot CL$ -según el número de días que abarque el periodo de planificación de colores-) con unidades de productos, de entre las pendientes a programar, de **Q** colores a lo sumo. Para ello, definiremos seguidamente dos conceptos: (1) área de un color genérico **j** y área de un conjunto de colores **C**; denotadas por

$a(j)$ y $A(C)$, respectivamente.

Area del Color j

$$a(j) = \sum_i \min (d_{ij}, NR_i \cdot CD)$$

Area del conjunto de colores C

$$A(C) = \sum_i \min (\sum_{j \in C} d_{ij} , NR_i \cdot CD)$$

donde, d_{ij} representa la demanda pendiente del producto (i,j) , y el producto $NR_i \cdot CD$ es la capacidad de producción (diaria) del modelo i .

Hacemos notar que, a la vista de las definiciones anteriores, el área de un conjunto de colores C es menor o igual que la suma de áreas de los colores componentes (basta suponer que se dispone de un conjunto de productos con producciones pendientes mayores que las capacidades de producción de los modelos respectivos).

La definición de área de conjunto sugiere una primera formalización del problema tal como: Buscar un subconjunto de colores -C- de área máxima y con Q elementos a lo sumo.

Por otra parte, el área de un conjunto de colores $A(C)$ puede ser, en ocasiones, superior a la capacidad de producción (diaria) de la línea ($CL \cdot CD$). Por tal motivo, conviene introducir otro concepto que denominaremos área recortada $AR(C)$ y se define así:

$$AR(C) = \min (A(C), CL \cdot CD)$$

La anterior definición es útil en aquellos casos en que es posible encontrar más de un conjunto de colores que cubran, con los requisitos establecidos, el mapa de producción.

A partir de dicha definición, una segunda formalización del

problema es la siguiente: Buscar un subconjunto de colores -C-
de área recortada máxima y con el menor número de elementos.
Obviamente, el ningún caso dicho número de elementos será mayor
que Q .

Indice

- 1.- INTRODUCCION
- 2.- PROCESO DE FABRICACION
- 3.- CONCEPCION DEL SISTEMA BERENICE
- 4.- LA BASE DE DATOS
- 5.- FUNCIONES DEL SISTEMA
- 6.- LOS PROCEDIMIENTOS
- 7.- PROGRAMACION EN FIRME DEL PROXIMO DIA
 - 7.1.- Consideraciones
 - 7.2.- Modelos lineales
 - 7.3.- Procedimiento heurístico
- 8.- LA SELECCION DE LOS COLORES DEL DIA-6
- 9.- REALIZACIONES

PROCESO DE FABRICACION

1. CARACTERISTICAS DE FABRICACION DE PROTESIS DENTARIAS:

- A PRESION Y TEMPERATURA CONCRETAS
- MOLDES (de gran precisión)
- 2 ó 3 OBLEAS DE RESINAS POLIMERIZADAS
- LA FORMA DEL MOLDE DETERMINA EL MODELO
- LA NATURALEZA DE LAS OBLEAS DEFINE EL COLOR

2. CARACTERISTICAS DE LOS MOLDES

- LIMITACION DEL NUMERO DE EJEMPLARES A CAUSA DE SU ELEVADO COSTE (entre 5 y 10)
- UNA REPLICA SE UTILIZA COMO MAXIMO 15 VECES AL DIA
- UN MOLDE PRODUCE 3,4 ó 5 JUEGOS DE PROTESIS DENTARIAS

3. CARACTERISTICAS DE LOS COLORES Y OBLEAS

- LAS OBLEAS REQUIEREN UNA SEMANA DE PREPARACION
- SE HA DE PREVER EL CONSUMO DE CADA COLOR CON UNA SEMANA DE ANTICIPACION
- EL NUMERO MAXIMO DE COLORES AL DIA ES 4

4. CARACTERISTICAS DE LA CADENA Y JORNADA LABORAL

- EL TIEMPO DE RECORRIDO DE UN MOLDE ES DEL ORDEN 30 MINUTOS (LONGITUD DE LA CADENA)
- LA CADENA TIENE UNA CAPACIDAD DE 60 MOLDES
- LA JORNADA LABORAL TIENE 1 TURNOS DE 7.5 HORAS
- LA PRODUCCION DIARIA MAXIMA ES DE 900 MOLDEOS

5. CARACTERISTICAS DE LOS PEDIDOS

- NUMERO DE PRODUCTOS Y CANTIDADES MUY VARIADOS
- SE RECIBEN PEDIDOS CADA DIA

LA CONCEPCION DEL SISTEMA BERENICE

LAS FUNCIONES DEL SISTEMA SON:

- (1) PLANIFICACION A UNA SEMANA VISTA DE LOS COLORES
PARA DETERMINAR LOS COLORES QUE SE CONSUMIRAN LA PROXIMA
SEMANA Y ESTABLECER LAS ORDENES DE FABRICACION DE LAS
OBLEAS
- (2) PROGRAMACION DIARIA
PARA DETERMINAR LOS PRODUCTOS A FABRICAR EL DIA
SIGUIENTE
 - MODELO
 - COLOR
 - CANTIDAD
 - SECUENCIA

LAS RESTRICCIONES DEL SISTEMA SE INDUCEN POR:

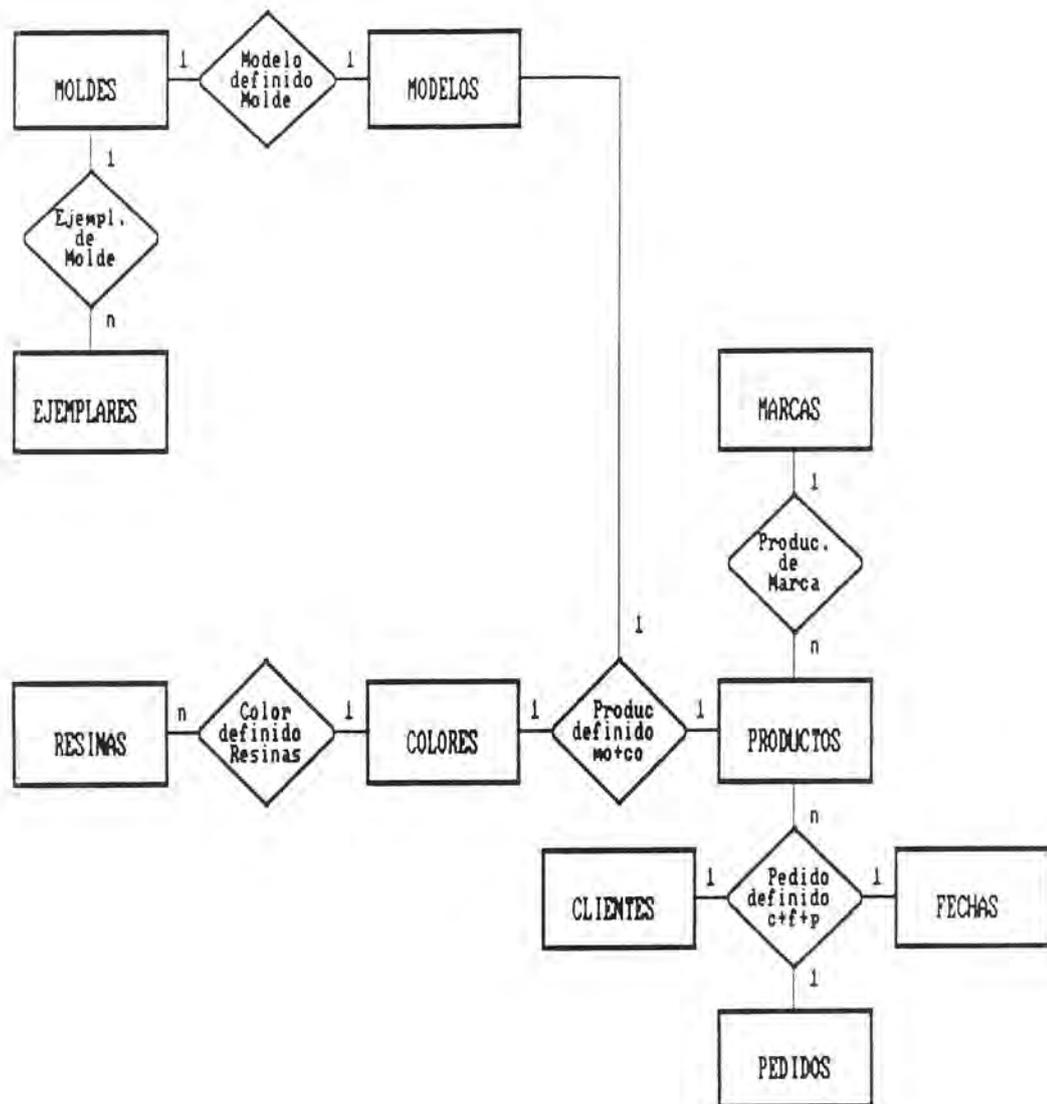
- (1) LAS LIMITACIONES DEL SISTEMA PRODUCTIVO
- (2) LA DISPONIBILIDAD DE MATERIALES

EL OBJETIVO DEL SISTEMA:

UN PROCEDIMIENTO PARA LA DEFINICION DE PRIORIDADES DE CADA
PRODUCTO EN FUNCION DE:

- (1) LA CARTERA DE PEDIDOS
 - VARIABILIDAD
 - VOLUMEN
 - FECHA
- (2) EL HISTORICO (DEMANDAS ANTERIORES)
- (3) STATUS DE STOCK DE LOS PRODUCTOS

LA BASE DE DATOS



- NUMERO DE INSTANCIAS MODELOS	:	1 8 8
- NUMERO DE INSTANCIAS COLOR	:	9 8
- NUMERO DE PRODUCTOS POTENCIALES	:	1 4 . 6 0 8
- NUMERO DE PRODUCTOS ACTIVOS	:	3 . 5 0 8
- NUMERO DE PEDIDOS/ANUAL	:	7 8 8

Figura.1- La BASE de DATOS

FUNCIONES DEL SISTEMA BERENICE

f1. ACCESO A BASES

- f11. Datos de Productos
 - f111. Tratamiento de Marcas (A,B,C,M,L) ¹
 - f112. Tratamiento de Modelos (A,B,C,M,L)
 - f113. Tratamiento de Colores (A,B,C,M,L)
- f12. Datos de Clientes (A,B,C,M,L)
- f13. Cartera de Pedidos (A,B,M,C,L)
- f14. Datos históricos (M,C,L; datos estadísticos)

f2. OPERACIONES PRE-PROGRAMA

- f21. Recepción del Robot
- f22. Consulta del Programa a consolidar
- f23. Selección y expedición de Pedidos
- f24. Confirmar Programa
- f25. Confirmar Obra en Curso (C,M,L)
- f26. Pedidos expedibles
- f27. Disponibilidad de Colores
- f28. Disponibilidad de Réplicas

f3. CALCULO DEL PROGRAMA DE PRODUCTOSf4. CALCULO DEL PROGRAMA DE COLORESf5. OPERACIONES POST-PROGRAMA

- f51. Modificar Programa de Productos
- f52. Emisión al Robot
- f53. Recepción del Robot (Idem f21)
- f54. Consulta del Programa a consolidar (Idem f22)
- f55. Confirmar Programa (Idem f24)
- f56. Consultar Programa de Colores

f6. PARAMETROS DEL SISTEMA

[1] Las abreviaturas A, B, C, M y L significan respectivamente altas, bajas, consultas, modificaciones y listados.

SISTEMA BERENICE

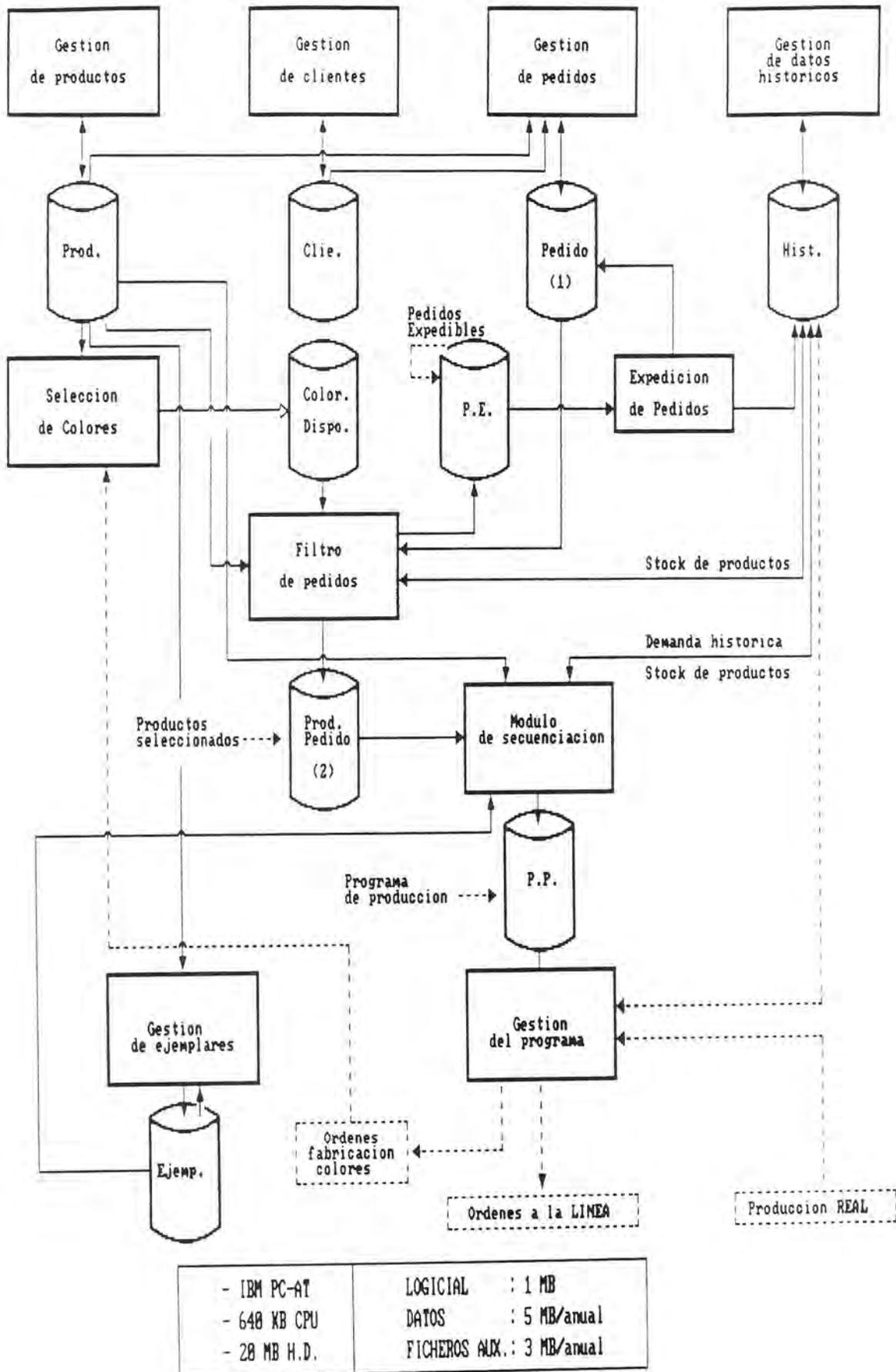


Figura.2- Esquema global del Sistema BERENICE

**PROCEDIMIENTOS
(EXPLOTACION REGULAR DEL SISTEMA)**

(1) PREPROGRAMACION

- INTRODUCCION DE LA INFORMACION SOBRE LA PRODUCCION REAL DE LA CADENA (FICHERO "ROBOT.OUT")
- ACTUALIZACION DE LA OBRA EN CURSO
- RELACION DE PEDIDOS FINALIZADOS

(2) CONFIRMACION DE ESTADO DE PEDIDOS Y OBRA EN CURSO

- PEDIDOS EXPEDIBLES
- CORRECCION DE LA OBRA EN CURSO
- SELECCION DE PEDIDOS A PROGRAMAR

(3) CONFIRMACION DE LA CAPACIDAD DE PRODUCCION

- CANTIDAD DE COLORES DISPONIBLES EN EL HORIZONTE
- VARIACION DEL NUMERO DE EJEMPLARES DE LOS MOLDES

(4) PROGRAMACION EN FIRME DEL PROXIMO DIA

- DETERMINACION DE LA NOTA DE LOS PRODUCTO-PEDIDO
- SELECCION DE LA SECUENCIA DE FABRICACION
- PREPARACION DEL FICHERO "ROBOT.INP" CON:

MOLDE - COLOR - CANTIDAD
(con destino al ordenador de la cadena)

(5) PROGRAMACION INDICATIVA DE LOS 4 DIAS SIGUIENTES
(procedimiento 4)

(6) SELECCION DE LOS COLORES PARA EL DIA-6

(7) PROGRAMACION TENTATIVA DEL DIA-6 (procedimiento 4)

- CALCULO DEL NUMERO DE MOLDEOS DE CADA COLOR
- ORDEN DE FABRICACION DE LAS OBLEAS

SELECCION DE PRODUCTOS A FABRICAR EN UN DIA

LA SECUENCIA DE PRODUCTOS A FABRICAR SE HACE TENIENDO EN CUENTA:

- LA DISPONIBILIDAD DE COLORES DIARIA (CUALITATIVA Y CUANTITATIVAMENTE)
- LA DISPONIBILIDAD DE MOLDES
- LA CAPACIDAD DE LA CADENA
- LA PRIORIDAD DE LOS PRODUCTOS-PEDIDO (LA NOTA)
- LOTES MINIMOS DE FABRICACION DE CADA PRODUCTO
- LA DEMANDA HISTORICA

SE REALIZA UNA SIMULACION DEL FUNCIONAMIENTO DE LA CADENA Y SE OBTIENE:

- LOS PRODUCTOS A FABRICAR
 - MARCA
 - MODELO
 - COLOR
 - CANTIDAD
- UNA SECUENCIA POSIBLE DE PRODUCCION (ORDENACION)

NOTA:

SI NO ES POSIBLE FABRICAR TODOS LOS PRODUCTOS DE LOS PEDIDOS EN PROCESO ENTONCES SE PRODUCE PARA STOCK HASTA UN CIERTO LIMITE, A PARTIR DEL CUAL SE DEJAN HUECOS EN LA CADENA

LA NOTA DE LOS PRODUCTOS-PEDIDO

LOS ELEMENTOS PRIORITARIOS SON

(1) LA NOTA DEL PEDIDO

- ANTIGUEDAD DEL PEDIDO (**NA**)
Función lineal del retraso
- VOLUMEN DEL PEDIDO (**NPE**)
Función covexa del tiempo inevitable para finalizar un pedido.

(2) LA NOTA DEL PRODUCTO (NPR)

FUNCION LINEAL DE

- VOLUMEN DEL PRODUCTO (TANTO POR CIENTO DEL PRODUCTO EN EL PEDIDO)
- VOLUMEN DEL MODELO (TIEMPO NECESARIO PARA REALIZAR EL MODELO TENIENDO EN CUENTA LA DISPONIBILIDAD DE LOS MOLDES)

$$\text{NOTA FINAL} = \text{ALFA} \cdot \text{NA} + \text{BETA} \cdot \text{NPE} + \text{GAMMA} \cdot \text{NPR}$$

NF(i, j, k)
Producto-Pedido

MODELOS LINEALES
(Nomenclatura)

Indices

k : Pedido genérico
i : Modelo genérico
j : Color genérico
t : Ciclo genérico

Constantes diarias y parámetros

NP : Número de pedidos en cartera-selección
NM : Número de modelos en cartera de pedidos
NC : Número de colores disponibles
CD : Número de utilizaciones de un molde por día
CL : Capacidad de la Linea
DC_j : Disponibilidad del color j (un día determinado)
NR_i : Número de moldes del modelo i
L_{ij} : Lote mínimo del producto (i,j)
DH_{ij} : Demanda histórica del producto (i,j)
d_{ijk} : Demanda actual corregida del producto (i,j) del pedido k
NF_{ijk} : Nota del producto-pedido (i,j,k)

Variables

X_{ijk} : Producción de (i,j,k) en el día
X_{ijkt} : Producción de (i,j,k) en el ciclo t
Y_{ij} : Variable binaria que indica si (i,j) se fabrica o no.

Tabla-1: Nomenclatura del modelo de producción diaria

MODELOS LINEALES
(Producciones globales)

Disponibilidad de Colores

$$[r1.1] \quad \sum_i \sum_k X_{ijk} \leq DC_j \quad \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC$$

Disponibilidad de moldes

$$[r2.1] \quad \sum_j \sum_k X_{ijk} \leq NR_i \cdot CD \quad \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM$$

Capacidad de la Linea

$$[r3.1] \quad \sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk} \leq CL \cdot CD$$

Lotes mínimos de fabricación

$$[r4.1] \quad \sum_k X_{ijk} \geq L_{ij} \cdot Y_{ij} \quad \begin{array}{l} \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM \\ \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC \end{array}$$

Satisfacción de la demanda

$$[r5.1] \quad X_{ijk} \leq d_{ijk} \quad \begin{array}{l} \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM \\ \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC \\ \text{para todo } k = 0, 1, \dots, NP \end{array}$$

Función objetivo

$$[r0.1] \quad [MAX] Z = \sum_i \sum_j \sum_k NF_{ijk} \cdot X_{ijk}$$

Tabla-2: Modelo MPD1 de producción diaria (ver-1)

MODELOS LINEALES
(Producciones por ciclo)

Disponibilidad de Colores

$$[r1.2] \quad \sum_i \sum_k \sum_t X_{ijkt} \leq DC_j \quad \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC$$

Disponibilidad de moldes

$$[r2.2] \quad \sum_j \sum_k X_{ijkt} \leq NR_i \quad \begin{array}{l} \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM \\ \text{para todo } t = 1, 2, \dots, CD \end{array}$$

Capacidad de la Linea

$$[r3.2] \quad \sum_i \sum_j \sum_k X_{ijkt} \leq CL \quad \text{para todo } t = 1, 2, \dots, CD$$

Lotes mínimos de fabricación

$$[r4.2] \quad \sum_k \sum_t X_{ijkt} \geq L_{ij} \cdot Y_{ij} \quad \begin{array}{l} \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM \\ \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC \end{array}$$

Satisfacción de la demanda

$$[r5.2] \quad \sum_t X_{ijkt} \leq d_{ijk} \quad \begin{array}{l} \text{para todo } i = 1, 2, \dots, NM \\ \text{para todo } j = 1, 2, \dots, NC \\ \text{para todo } k = 0, 1, \dots, NP \end{array}$$

Prioridad y congruencias cíclicas

$$[r6.2] \quad \sum_i \sum_j \sum_k NF_{ijk} \cdot (X_{ijkt} - X_{ijkt+1}) \geq 0 \quad \text{para todo } t = 1, 2, \dots, CD-1$$

Función objetivo

$$[r0.2] \quad [MAX] \quad Z = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_t NF_{ijk} \cdot X_{ijkt}$$

Tabla-3: Modelo MPD2 de producción diaria (ver-2)

MODELOS LINEALES
(Conceptos)

CICLO REGENERATIVO : PERIODO DE TIEMPO TRANSCURRIDO ENTRE DOS UTILIZACIONES CONSECUTIVAS DE UN MISMO MOLDE.

TIEMPO.PROCESO o CL

NRO.UTILIZACIONES.MOLDE = CICLOS.DIA

REPRESENTACION PROGRAMA DE PRODUCCION

Longitud del ciclo = CL
Ciclo-1
Ciclo-2
Ciclo-3
Ciclo-4
.....
.....
Ciclo-CD-1
Ciclo-CD

Figura-3: Mapa del programa de producción

AREA DEL MAPA = CICLOS.(DIA) x CAPACIDAD.LINEA

IDEA: RECUBRIR AREA DEL MAPA CICLO a CICLO

PROCEDIMIENTO HEURISTICO

p0. PREPARACION DE DATOS

- p0-1. Purga de pedidos. Determinación de las demandas corregidas
- p0-2. Selección de colores para la programación a partir de unas disponibilidades de obleas.
 - (1) Antigüedad
 - (2) Area
- p0-3. Cálculo de notas de instancias producto-pedido

p1. RELLENO DE CICLOS REGENERATIVOS

Se consideran tres pilas de órdenes y una de reserva

- (1) Cola de órdenes dinámicas OL
- (2) Cola de órdenes de demanda OD
- (3) Cola de demanda histórica OH
- (4) Pila de reserva de productos RP

p1-0. Iniciación

p1-1. Tratamiento de la lista OL

p1-2. Tratamiento de la lista OD

p1-2.1. El producto ha sido lanzado anteriormente

p1-2.2. El producto debe lanzarse por primera vez

p1-3. Tratamiento de la lista OH

p-2. OBTENCION DEL PROGRAMA DE PRODUCCION

$$PP = RP - RPO$$

SELECCION DE COLORES PARA EL DIA-6

Area del Color j

$$a(j) = \sum_i \min (d_{ij}, NR_i \cdot CD)$$

Area del conjunto de colores C

$$A(C) = \sum_i \min (\sum_{j \in C} d_{ij}, NR_i \cdot CD)$$

d_{ij} es la demanda pendiente del producto (i,j)
 $NR_i \cdot CD$ es la capacidad de producción (diaria) del modelo i.

FORMALIZACION-1

BUSCAR UN SUBCONJUNTO DE COLORES -C- DE AREA MAXIMA Y CON -Q- ELEMENTOS A LO SUMO

Area reducida del conjunto de colores C

$$AR(C) = \min (A(C), CL \cdot CD)$$

$CL \cdot CD$ es la capacidad (diaria) máxima de la línea

FORMALIZACION-2

BUSCAR UN SUBCONJUNTO DE COLORES -C- DE AREA REDUCIDA MAXIMA Y CON EL MENOR NUMERO DE ELEMENTOS

SELECCION DE COLORES
(Modelos Lineales)

Nomenclatura

Indices

i : Modelo genérico
j : Color genérico

Constantes diarias y parámetros

NM : Número de modelos en cartera de pedidos
NC : Número de colores en cartera de pedidos
Q : Número de colores máximos a seleccionar
CD : Número de utilizaciones de un molde por día
CL : Capacidad de la Línea
NR_i : Número de moldes del modelo i
d_{ij} : Demanda actual corregida del producto (i,j)

Variables

X_i : Aportación al área del modelo i.
Y_j : Variable binaria que indica si j se selecciona o no.
AR : Area reducida

Formulación-1

$$[\text{MAX}] A(C) = \sum_{i=1}^{NM} X_i \quad [r1.0]$$

s.a.

$$X_i = \min \left(\sum_{j=1}^{NC} d_{ij} \cdot Y_j, NR_i \cdot CD \right) \quad [r1.1]$$

para $i = 1, 2, \dots, NM$

$$\sum_{j=1}^{NC} Y_j \leq Q \quad [r1.2]$$

para $j = 1, 2, \dots, NC$

Todas las variables enteras

En definitiva: $[\text{MAX}] A(C)$ tal que $|C| \leq Q$

SELECCION DE COLORES
(Modelos Lineales)

Formulación-2

$$[\text{MAX}] Z = AR - \mu \cdot \sum_{j=1}^{NC} Y_j \quad [\text{r2.0}]$$

s.a.

$$X_i = \min \left(\sum_{j=1}^{NC} d_{ij} \cdot Y_j, NR_i \cdot CD \right) \quad [\text{r1.1}]$$

para $i = 1, 2, \dots, NM$

$$\sum_{j=1}^{NC} Y_j \leq Q \quad [\text{r1.2}]$$

$$AR = \min \left(\sum_{i=1}^{NM} X_i, CL \cdot CD \right) \quad [\text{r2.1}]$$

Todas las variables enteras

En definitiva: $[\text{MAX}] AR(C) - \mu \cdot |C|$ tal que $|C| \leq Q$
(dos criterios jerarquizados)

SELECCION DE COLORES
(Procedimientos heurísticos)

HEURISTICA "GREEDY-1"

IDEA: TOMAR PROGRESIVAMENTE AQUELLOS COLORES QUE PRESENTEN MAYOR AREA

p1- PARA CADA COLOR j CALCULAR EL "AREA":

$$a(j) = \sum_{i=1}^{NM} \min (d_{ij}, NR_i \cdot CD) \quad [\text{for-1}]$$

p2- ORDENAR LOS COLORES POR a(j) DECRECIENTE

p3- TOMAR LOS Q PRIMEROS COLORES

VARIANTE

p1- HACER C = "vacío"; r = 0. CALCULAR EL "AREA" PARA CADA j

p2- ESTABLECER UNA LISTA DE LOS COLORES ORDENADOS POR a(j) DECRECIENTE (for-1)

p3- TOMAR EL PRIMER COLOR DE LA LISTA j₀ ELIMINANDOLO DE ELLA, Y PASANDOLO A LA LISTA C. AUMENTAR r EN 1.

p4- SI r = Q ENTONCES FIN

SINO IR A p5

p5- CALCULAR A(C)

$$A(C) = \sum_i \min \{ \sum_{j \in C} d_{ij}, NR_i \cdot CD \} \quad [\text{for-2}]$$

p6- SI A(C) ≥ CL · CD ENTONCES FIN

SINO IR A p3

PROCEDIMIENTOS HEURISTICOS (2)

HEURISTICA "GREEDY-2"

p1- HACER $r = 0$, $x(i) = 0$ ($i = 1, 2, \dots, NM$), $C = \text{"vacío"}$
 CALCULAR $a(j)$ PARA CADA COLOR j

p2- ORDENAR LOS COLORES POR $a(j)$ DECRECIENTE

p3- TOMAR EL PRIMER COLOR, j_0 , INCLUIRLO EN C , AUMENTAR r EN 1

p4- SI $r = Q$ ENTONCES FIN

SINO IR A p5

p5- HACER:

$$x(i) = \min \{ x(i) + d_{ij_0}, NR_i \cdot CD \}$$

p6- SI $\sum_i x(i) \geq CL \cdot CD$ ENTONCES FIN

SINO IR A p7

p7- CALCULAR LA "APORTACION" PARA LOS COLORES j QUE NO ESTAN EN LA LISTA C :

$$a(j) = \sum_i \min \{ d_{ij}, NR_i \cdot CD - x(i) \}$$

p8- IR A p2.

NOTA: NO SE HAN INDICADO LOS PROCEDIMIENTOS A SEGUIR CUANDO LOS COLORES SE "AGOTAN" EN CURSO DE APLICACION DEL ALGORITMO.

SELECCION DE COLORES
(Ejemplo)

Parámetros:

$$CD = 6 \quad CL = 5 \quad CPC = CL \cdot CD = 30 \quad Q = 3$$

COLORES	MODELOS				a(j)
	1	2	3	4	
1	15		8		18
2	12	2	6		20
3	3	2	3		8
4		3		7	9
5		2		3	5
6		4	1	3	8
7	2	3	2	4	11
8			3	4	7
NR(i)	2	2	1	1	
NR _i · CD	12	12	6	6	

Soluciones

SOLUCION "GREEDY-1" : $C = \{ 2, 1, 7 \}$; $A(C) = 27$

SOLUCION "GREEDY-2" : $C = \{ 2, 4, 7 \}$; $A(C) = 33$ (> CPC)

SOLUCION "BRANCH-AND-BOUND" : además de la anterior

$$C = \{ 2, 6, 7 \} ; A(C) = 33$$
