



# Cátedra Nissan

-PROTHIUS-

## Utilización de modelos lineales para la planificación estratégica

*Joaquín Bautista Valhondo y Ramón Companys Pascual*

WP-05/2010

(Rec. DIT 92/08- BC - 1992)

*Departamento de Organización de Empresas*

Universidad Politécnica de Cataluña

**Publica:**

Universitat Politècnica de Catalunya  
[www.upc.edu](http://www.upc.edu)



**Edita:**

Cátedra Nissan  
[www.nissanchair.com](http://www.nissanchair.com)  
[director@nissanchair.com](mailto:director@nissanchair.com)

TITOL:

UTILIZACION  
DE MODELOS  
LINEALES  
PARA LA  
PLANIFICACION  
ESTRATEGICA

Autors: J. Bautista  
R. Companys

Document Intern de Treball  
(D.I.T.) 92/08

Barcelona, octubre 1992

Departament d'Organització d'Empreses  
Universitat Politècnica de Catalunya

# UTILIZACION DE MODELOS LINEALES PARA LA PLANIFICACION ESTRATEGICA

J. BAUTISTA VALHONDO

R. COMPANYS PASCUAL

DEPARTAMENT D'ORGANITZACIO D'EMPRESSES

ETSEIB - UPC

El presente trabajo está compuesto por tres artículos escritos sobre el mismo tema, una aplicación real desarrollada para una empresa concreta, pero intentando enfocar aspectos diferentes:

PRIMER ASPECTO: IMPACTO DE LA MODELIZACION EN LA TOMA DE DECISIONES ESTRATEGICAS SOBRE LA EVOLUCION DEL SISTEMA PRODUCTIVO (ASPECTO GESTION):

PLANIFICACION ESTRATEGICA DE LA PRODUCCION EN ACME

SEGUNDO ASPECTO: CONSTRUCCION DE UN SISTEMA INTERACTIVO PARA LA CONSTRUCCION, EXPLOTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS DE MODELOS LINEALES DE PLANIFICACION ESTRATEGICA (ASPECTO METODOLOGIA Y LENGUAJE):

A LANGAGE FOR BUILDING LINEAR MODELS IN STRATEGIC MANUFACTURING

TERCER ASPECTO: PROCEDIMIENTOS DE MANIPULACION DE MODELOS CON INTERVENCION INTERACTIVA PARA EXPLORAR ALTERNATIVAS "RAZONABLES" (ASPECTO ALGORITMICO):

EXPLORATION D'UN MODELE LINEAIRE DE PLANIFICACION STRATEGIQUE A L'AIDE DE PROCEDURES MIXTES

El primero estaba destinado a una revista de tipo técnico medio de amplia difusión. Sin embargo la empresa para quien se había realizado la aplicación, por razones de política general, no concedió la autorización para citar su nombre, sin lo cual (y sin fotografías de sus instalaciones) dicho artículo no era publicable. En la versión reproducida aquí se denomina a dicha empresa ACME, y se han maquillado convenientemente otros aspectos para mantener el anonimato.

El segundo texto estaba destinado a EURO-XI, celebrado en Aachen del 16 al 19 de julio de 1991, y fué aceptado por el Comité de Programa. Dificultades de compaginación de las actividades docentes de los autores impidieron su presentación efectiva.

El tercero fué destinado a RENCONTRES FRANCO-SUISSES DE RECHERCHE OPERATIONNELLE, celebrado en Paris, del 11 al 13 de septiembre de 1991, y presentado efectivamente el 12-09-1991.

Dado que en cada caso había que describir el entorno de la aplicación son inevitables ciertas repeticiones. Para poder comprender el ámbito del trabajo conviene señalar en primer lugar el calendario de realización:

inicio .....	27-12-1989
1ª Presentación .....	28-02-1990
2ª Presentación .....	18-05-1990
Presentación Final .....	23-08-1990

En la 1ª Presentación a la Dirección de la empresa se describió la estructura del modelo, del sistema informático y el contenido de los resultados esperados. En la 2ª se presentaron unos primeros resultados, muy significativos ya, que dieron lugar a la ampliación del horizonte (de 1992 se pasó a 1994) y al refinamiento de los juegos de datos a utilizar. En la Presentación Final se describieron los resultados obtenidos con los nuevos datos y las conclusiones a que había llegado el equipo realizador. Posteriormente la empresa siguió utilizando autonomamente el modelo y el sistema, lo que constituye el mayor éxito del trabajo (del que también da fé el que el equipo realizador haya sido solicitado para otros trabajos por la empresa).

Una forma de evaluar la carga de trabajo del equipo UPC en el caso tratado puede observarse en la tabla adjunta en la que se reparte en valores absolutos y porcentajes dicha carga (en horas) y los plazos de realización (en días):

	FASE 1	FASE 2	FASE 3	TOTAL
CARGA	90 16.2	250 45.1	215 38.7	555 100
PLAZO	64 25.6	79 31.6	97 38.8	250 100

Pueden notarse las diferentes intensidades de trabajo según la naturaleza de la fase (cada fase finaliza con una de las presentaciones). La tercer fase obligó a trabajar intensamente durante los meses de julio y agosto, lo que se vió favorecido por las vacaciones escolares.

## PLANIFICACION ESTRATEGICA DE LA PRODUCCION EN ACME

por

Ramón Companys  
U.P.C.

Joaquín Bautista  
U.P.C.

N. N.  
ACME, S. A.

0. INTRODUCCION
1. ESTRUCTURA DE LA SOLUCION
2. FORMA DEL MODELO
3. EXPLOTACION DEL SISTEMA
4. CONCLUSIONES

### 0. INTRODUCCION

ACME, S. A., estaba interesada en disponer de un Modelo matemático de su sistema de producción y distribución con el fin de analizar en el mismo la repercusión de diversas alternativas tácticas y estratégicas. El detonante lo constituyó el hecho de que a causa de su situación en plena zona urbana una de sus instalaciones industriales, que ya no había podido expansionarse en el pasado, estaba sometida a una fuerte presión municipal en vistas a su traslado. Existía el proyecto de construir una nueva fábrica en el polígono industrial CUATRO CAMINOS en substitución de la instalación de zona urbana, lo que había llevado a la dirección de ACME a interrogarse sobre qué productos debían fabricarse en la nueva fábrica, ya que no parecía obligado limitar la acción al simple traslado de las viejas instalaciones cuando las restricciones de espacio no eran ya determinantes. Por otra parte, desde siempre, la Dirección de ACME había considerado la producción de sus fábricas como un todo armónico, que mediante el transporte larga distancia y la concentración en distribuidoras regionales permitía la atención de la demanda del mercado. Por consiguiente la preocupación relativa a la fábrica de CUATRO CAMINOS llevaba a interrogarse sobre el mapa completo de productos a fabricar en cada una de las fábricas de ACME.

El sistema productivo actual de ACME se compone de 6 Fábricas, distribuidas por la geografía española, en las que se producen del orden de 100 especialidades o productos, agrupadas en 22 familias productivas, existiendo cierta especialización en las Fábricas (en ocasiones aconsejada por las características del mercado en su entorno más próximo). Como ya se ha indicado no todas las especialidades se producen en todas las Fábricas.

La producción de las Fábricas se encamina a 5 Centros Regionales nacionales, desde los cuales se distribuye a 38 Centros de Distribución, y desde éstos a los puntos de venta. Recientemente se ha creado un nuevo Centro Regional en Portugal. El transporte a larga distancia se realiza generalmente con el producto dispuesto en contenedores reutilizables, y por consiguiente debe garantizarse el retorno de los mismos.

De todos los componentes de procedencia exterior sólo uno se consideró crítico y susceptible de constituir un cuello de botella, y por tanto debiendo figurar en el Modelo. Lo denominaremos "material", y su producción, en volumen y calidad, depende de factores locales por lo que el abastecimiento y normalización del mismo es un elemento diferencial de coste importante. Se identificaron 17 Fuentes de Suministro de material con características propias. En las primeras fases del proceso productivo se obtiene un subproducto que se utiliza posteriormente, siendo algunos productos excedentarios y otros deficitarios del mismo (aunque el balance global es positivo). Por consiguiente inicialmente se acordó tener en cuenta en el Modelo los transportes entre fábricas de dicho subproducto.

Dada la naturaleza del producto, y de acuerdo a las normas legales vigentes, existen fechas de caducidad por lo que es conveniente adaptar muy cuidadosamente la distribución a la tipología de consumo de la zona atendida por un Centro. Existen diferencias notables en dicha tipología de consumo entre zonas y regiones, lo que ha llevado en forma natural a especializar en cierta forma los Centros y las mismas Fábricas (como ya se ha indicado).

Tras un primer análisis de la situación, tal como se ha expuesto, parecía razonable poder representarla mediante un Modelo lineal, en el que las variables principales fuesen las cantidades producidas de las especialidades en cada Fábrica y las cantidades a transportar de las mismas a los Centros Regionales, así como las cantidades de material transportadas de las Fuentes de Suministro a cada Fábrica, necesarias para la producción de la misma. Los parámetros serían las limitaciones productivas y de transporte así como la demanda de cada especialidad a atender desde cada Centro de Distribución y las disponibilidades de material en cada Fábrica.

El objetivo podía consistir en la minimización de los costes de explotación del sistema (ya que los ingresos quedaban definidos por la atención de la demanda), necesitándose como parámetros adicionales los costes unitarios de producción y transporte.

Ciertas características de la situación indicaban que no todas las variables a utilizar podían considerarse como continuas, ya que algunos aspectos precisaban, para su adecuada modelización, variables enteras y/o bivalentes:

- existe una regla según la cual un Centro Regional se abastece de cada especialidad desde una sola Fábrica,
- el coste operativo de un camión es prácticamente el mismo sea cual sea su nivel de carga,
- existen escalones en algunos costes (ligados por ejemplo a los cambios de especialidad en una línea de producción),

- una de las finalidades del modelo era deducir si convenía o no disponer de una línea de producción determinada en una Fábrica,

- etc.

Limitando la problemática a las Fábricas y los Centros Regionales, y adoptando hipótesis muy simplificativas, se estimó que en cualquier caso el número de variables del Modelo superaría las 2.000 y las restricciones las 800 (vease 1.2), por lo que las dos dificultades mayores de la manipulación del Modelo la constituirían:

\* la construcción del mismo, en sus diversas variantes, la introducción de modificaciones y su comunicación a un ordenador

\* el tratamiento de las variables enteras, pues aunque se han hecho grandes progresos en los paquetes informáticos aptos para tratar problemas de programación lineal mixta, el comportamiento de los mismos es en general impredecible en cuanto a tiempo de explotación y justeza de resultados al aumentar el número de dichas variables, y está muy ligado a la estructura del Modelo e incluso a los valores numéricos de los parámetros del mismo,

Se consideró que cualquier análisis A-B-C previo que permitiese reducir la complejidad del Modelo eliminando del mismo especialidades con poca repercusión o bien tales que, dada la tipología del consumo, no permitiesen alternativas razonables de fabricación y transporte (y teniendo en cuenta su efecto mediante reducción de las disponibilidades de la carga que representa), así como eliminando variables enteras, eligiendo ciertas modalidades específicas de producción y distribución (aún a costa de experimentar la sensibilidad de dichas modalidades) sería muy rentable.

Se deseaba analizar con el Modelo las consecuencias de diversas hipótesis, a fin de comparar alternativas tácticas y estratégicas, entre ellas:

H0: estructura actual, con diversas posibilidades de demanda

H1: estructura ampliada de las líneas actuales (modificando las capacidades productivas en alguna o algunas Fábricas existentes),

H2: eliminación de alguna de las Fábricas existentes, con adaptación de la capacidad de las restantes,

H3: adición de una nueva Fábrica en una localización concreta, determinando las especialidades a producir más interesantes, y la repercusión en las Fábricas pre-existentes,

.....

Dicho análisis permitía establecer para cada caso las producciones de cada Fábrica y los transportes entre los Fuentes de Suministro y las Fábricas, interfábricas y entre Fábricas y Centros Regionales, así como el coste de explotación asociado. La evaluación de las alternativas estratégicas, que debería tener en cuenta otros factores de coste (por ejemplo, las inversiones) se realizaría a partir de los resultados anteriores mediante los estimadores de rentabilidad tradicionales.

Aunque la construcción del Modelo antes descrito, la definición de las alternativas a contrastar y el análisis de las soluciones alcanzadas eran actividades indelegables, en las que la orientación e intervención del personal de ACME era tan necesaria como insustituible, parecía conveniente contar con la asistencia de un equipo exterior para ayudar en algunos aspectos técnicos. ACME solicitó la colaboración de la UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUNYA para que un equipo de la misma ejerciera dicha labor de asesoramiento en los aspectos técnicos, recogiendo información sobre el sistema productivo y de distribución, formalizando dicha información en el Modelo (definiendo las variables, restricciones, función económica, etc.), documentando el Modelo, formalizando las alternativas, explotando el Modelo en las diversas hipótesis en ordenador y realizando un primer análisis de las soluciones obtenidas.

Dentro de la colaboración se incluía la utilización de paquetes informáticos y ordenadores disponibles en la UPC.

Este proyecto recibió el nombre de Proyecto DANAE.

#### 1. ESTRUCTURA DE LA SOLUCION.

De acuerdo a los extremos anteriores y para poder proceder al análisis de las diversas alternativas estratégicas planteadas por ACME se consideró necesario construir un sistema soportado informáticamente que permitiera formalizar dichas alternativas y obtener para cada una de ellas el sistema de reglas tácticas más adecuado y una estimación del coste diferencial de explotación. Dicho sistema informático, acorde con la metodología de la UPC, consta de tres bloques principales:

1. PRE-PROCESADOR
2. PROCESADOR
3. POST-PROCESADOR

A continuación se indica someramente el contenido de cada uno de los bloques. El conjunto recibió el nombre de sistema DANAE, aunque más propiamente la parte específica del Proyecto está constituida por el PRE-PROCESADOR y el POST-PROCESADOR.

### 1.1. PRE-PROCESADOR.

Tiene dos funciones principales:

- a) servir de entrada, consulta, modificación, impresión de datos
- b) preparar el Modelo concreto (asociado a una hipótesis) en el formato adecuado para el PROCESADOR

En su primera función debía ser cómodo e interactivo, pero teniendo en cuenta que estaba destinado a usuarios "ilustrados" no precisaba gran belleza formal ni ser auto-explicativo. Los datos debían poderse almacenar (para no tener que ser reintroducidos en posteriores explotaciones), incluso sin todos los campos cumplimentados.

Las categorías de datos a tener en cuenta eran:

productos: código, unidad, descripción, familia productiva, familia comercial, tipo de contenedor asociado, unidades por contenedor, coeficiente consumo de material, coeficiente balance de subproducto,

fábricas: código, nombre, estado (activa o no), para cada tipo de línea productiva número de unidades y capacidad global efectiva (una capacidad cero se entiende como inexistencia de este tipo de línea en esta Fábrica),

líneas productivas: código, designación

tipos de contenedor: código, designación, número de contenedor con producto por palet, id. de contenedores vacíos,

fuentes de suministro de material: código, nombre, volumen, distancia a cada Fábrica,

distribuidoras regionales: código, nombre, capacidad de almacenamiento,

centros distribución: código, nombre, Centro Regional asociado, consumo o demanda de cada producto (ponderado para el estudio), distancias a cada Centro Regional,

rutas: código, transportes asociados, longitud,

costes unitarios: transporte de material, diferencial de calidad del material en origen, diferencial de normalización, transporte de subproducto, precio diferencial del subproducto en origen y/o en destino, coste de puesta en marcha de una línea de producción, de cambios de producción, de transporte de productos y contenedores,

parámetros varios: capacidad de un camión (número de palets de contenedores con producto y vacíos),

La preparación del modelo concreto asociado a un juego preciso de hipótesis se efectúa en cuatro fases. En la primera se realizan los cálculos auxiliares previos (determinación de la demanda de cada producto a cada Centro Regional, etc.). En la segunda se detectan las variables potenciales innecesarias, bien a causa de que su valor es forzosamente nulo (caso de que un producto no tenga línea productiva en una Fábrica), o su valor es obligatoriamente uno dado (caso de productos que sólo puedan fabricarse en una Fábrica).

A continuación se construye la versión del modelo marco que constituye el modelo concreto, en formato algébrico tradicional (función económica, restricciones, tipo de las variables) prescindiendo de las restricciones y variables innecesarias (aunque no, en su caso, de su repercusión).

Finalmente se añaden las restricciones adicionales, si existen, obligando o impidiendo la fabricación de ciertos productos en ciertas Fábricas, o bien obligando o impidiendo el abastecimiento de ciertos productos a ciertos Centros Regionales desde ciertas Fábricas.

### 1.2. PROCESADOR

Está constituido por el paquete LINDO de resolución de programas lineales mixtos. Inicialmente se utilizó la versión LINDO para PC-386 y posteriormente para incrementar la velocidad de resolución la MICROVAX 3000. No obstante en los casos más complejos llegar a una solución razonable costó más de 30 horas. Afortunadamente la mayoría de casos fueron considerablemente más simples. Una dimensión típica de un programa lineal tratado fué 3000 variables continuas, 350 variablea cero-uno, 16 variables enteras y 2500 restricciones.

### 1.3. POST-PROCESADOR

Los resultados obtenidos mediante LINDO se disponen en un archivo, con el formato clásico de las soluciones de los programas lineales (variables en la base, valor). El post-procesador extrae de dicho archivo la información pertinente presentándola inteligentemente" mediante cinco tipos de listado:

1. SQF : Para cada Fábrica y Familia de producto se indica el número de unidades producidas y el número de Especialidades distintas fabricadas de dicha Familia en la Fábrica,
2. SQE : Para cada Fábrica y Especialidad se indica el número de unidades producidas, y el número de lotes de producción que ello implica,

3. ERF : Para cada Centro Regional y cada Especialidad se indica qué Fábrica es la encargada del abastecimiento (y el número de Fábricas que abastecen en los casos en que haya más de una),
4. COSTE : Para cada componente de coste se indica su valor y porcentaje dentro del coste total,
5. MLE : Para cada Fábrica y Fuente de Suministro se indica la cantidad de material con que la última contribuye al abastecimiento de la primera,

#### 1.4. PUESTA A PUNTO

El conjunto del PRE-PROCESADOR y el POST-PROCESADOR representa 1,5 mega-bytes en código ejecutable, las bases de datos ocupan relativamente poco, medio mega y los modelos específicos generados tienen una extensión comprendida entre 150 Kbytes y 210 Kbytes.

Para facilitar la puesta a punto del modelo en las fases iniciales se permitió en el pre-procesador la construcción de modelos simplificados que sólo contuviesen parte del modelo definitivo, o que constituyeran una versión relajada del mismo (por ejemplo, no introduciendo las condiciones de integridad, los lotes mínimos o el retorno de contenedores vacíos) sin menoscabo de su validez general. Dichas facilidades constituyeron un elemento muy valioso en la exploración de las alternativas estratégicas más abiertas.

Así mismo se dotó al pre-procesador de los elementos necesarios para imponer o prohibir fabricaciones de especialidades concretas en Fábricas concretas, así como para imponer o prohibir el abastecimiento de especialidades concretas desde una Fábrica determinada a un Centro Regional preciso, junto con los tratamientos precisos para un primer análisis de coherencia.

## 2. FORMA DEL MODELO MARCO

Cada uno de los modelos concretos construidos a partir de los juegos de hipótesis elegidos seguía la filosofía de un Modelo Marco, que es el que inicialmente se elaboró en forma conceptual. En él se consideran las especialidades agrupadas en familias de producto, y cada familia asociada a una línea de producción.

### 2.1 VARIABLES

Las variables del modelo, que en definitiva son los valores que desean calcularse mediante el PROCESADOR y que definen los procedimientos tácticos de explotación del sistema productivo sugeridos por el sistema, son:

- Una variable binaria asociada a cada familia y cada Fábrica, que toma el valor uno si la familia se fabrica en la Fábrica y el cero en caso contrario. En forma análoga una variable binaria asociada a cada especialidad y cada Fábrica que toma el valor uno si la especialidad se fabrica en la Fábrica y el cero en caso contrario.
- Variables continuas correspondientes a la cantidad de cada especialidad fabricado en cada Fábrica y cantidad de cada especialidad transportado de cada Fábrica a cada Centro Regional.
- Variables continuas correspondientes a las contenedores de cada tipo (llenos y vacíos) que circulan por las rutas establecidas.
- Variables continuas correspondientes a las necesidades de material de cada Fábrica y a los abastecimientos de material desde las Fuentes de Suministro a las Fábricas.
- Variables continuas correspondientes a los balances de subproducto en cada Fábrica y a los transportes de subproducto entre Fábricas.
- Número de camiones necesarios en cada ruta (variable entera)

#### 2.4. PARAMETROS.

Los parámetros constituyen los datos básicos del modelo. En este caso están constituidos esencialmente por:

- demanda de cada especialidad en cada Centro Regional,
- capacidad de cada línea de producción en cada Fábrica,
- lote mínimo de producción de cada especialidad,
- consumo unitario de material y balance unitario de subproducto de cada especialidad,
- capacidad de las contenedores, y de los camiones (contenedores llenos y vacíos),
- disponibilidad de material en las Fuentes de Suministro,
- costes unitarios asociados al material, a las rutas de transporte de producto, al transporte de subproducto, a la puesta en marcha de las líneas de producción y a los cambios de especialidad en dichas líneas,

La unidad de tiempo elegida fué la semana. Siendo los valores de la demanda unos valores medios, los límites de capacidad de las líneas se adaptaron a esta circunstancia, para tener en cuenta

las fluctuaciones (esencialmente las puntas).

### 2.3. RESTRICCIONES

Las restricciones fijan la estructura del modelo, y las relaciones entre las variables y los parámetros del mismo. Dejando a un lado las correspondientes a meros cálculos (transformación de unidades de producto en número de contenedores, por ejemplo), aparecen las habituales en este tipo de modelos:

restricciones de atención a la demanda : la cantidad de cada especialidad transportada a cada Centro Regional corresponde a la demanda concentrada en éste,

restricciones de capacidad de producción : las cantidades producidas de cada familia en cada Fábrica no puede superar la capacidad de la línea productiva correspondiente,

restricciones de lote mínimo : si una especialidad se produce en una Fábrica, la cantidad fabricada es como mínimo igual a un lote de producción,

restricciones de abastecimiento de material : las cantidades de material transportadas no superan las disponibilidades de cada Fuente de Suministro e igualan las necesidades de cada Fábrica,

restricciones de abastecimiento de subproducto : las cantidades transportadas del subproducto no superan las disponibilidades del origen y satisfacen las necesidades del destino,

restricciones del transporte por rutas : los camiones necesarios en una ruta son suficientes para llevar las contenedores (llenos y vacíos) en los dos sentidos de la misma,

### 2.4. FUNCION ECONOMICA

El objetivo buscado es el de la minimización de los costes de explotación, constituido por la suma de los siguientes costes elementales:

coste de la material incluyendo lo percibido por el proveedor, el transporte y la eventual normalización a una calidad estándar,

coste de transporte del producto terminado y del retorno de contenedores a través de las rutas establecidas,

coste de transporte del subproducto,

coste de arranque (o puesta en marcha) de las líneas de producción,

coste de cambios de especialidad en las líneas de producción,

Naturalmente muchos elementos del coste operativo no aparecen en la relación anterior, pero no son directamente afectados por las decisiones que comporta el asignar un juego de valores a las variables del Modelo.

## 2.5. SIMPLIFICACIONES DEL MODELO

En la versión definitivamente utilizada del Modelo, no se tomaron en cuenta los aspectos relativos al transporte del subproducto, dada su pequeña repercusión.

La forma dada al coste de los cambios en el Modelo optimizado era una cota superior del mismo, ya que presuponía que todas las especialidades asignadas a una Fábrica se producen todos los días. En los cálculos del POST-PROCESADOR se evalúa de nuevo este coste teniendo en cuenta, dado el número de lotes mínimos de producción que supone la producción semanal, si una especialidad se fabrica 5, 3, 2 o 1 días por semana. En cualquier caso el exceso de coste tenido en cuenta en la optimización contribuye a evaluar los factores negativos no cuantificables que una producción no diaria suponen.

No se introdujo tampoco ningún condicionante para que cada Centro Regional se aprovisionara de cada Especialidad en una sola Fábrica. Por una parte los casos de incumplimiento en las soluciones generadas son pocas y con baja repercusión económica, y siempre podía procederse a transformar una solución que no cumpliera el condicionante en una que se adaptara a él. Por otra parte se trata de una Regla de funcionamiento a tener en cuenta más propiamente en el esquema táctico que en el estratégico.

Tres familias de productos tienen dos etapas de producción, con sus limitaciones correspondientes, lo que obligó a tener en cuenta esta circunstancia en la generación de restricciones.

## 3. EXPLOTACION DEL SISTEMA

La duración total del Proyecto DANAE fué de ocho meses. Las primeras explotaciones del sistema se realizaron a los cuatro meses y medio contados desde el inicio, en las instalaciones de la UPC, a partir de los siguientes datos:

- Familias y Especialidades de 1990, con las ampliaciones y modificaciones previstas conocidas,
- Demanda semanal media en los Centros de Distribución prevista para 1992,

- Capacidades de Fábrica previstas para 1992 (salvo, en su caso, al analizar ampliaciones, especialmente en CUATRO CAMINOS),
- Disponibilidad y calidad del material supuesta análoga a la de 1990,
- Rutas de transporte existentes en 1990,
- Costes a pesetas 1990

y con ellos se analizaron las siguientes hipótesis:

ESTRUCTURA ACTUAL CON 6 FABRICAS

ESTRUCTURA ABIERTA (SALVO PRODUCTOS ESPECIALES) CON 6 FABRICAS

ESTRUCTURA ABIERTA (SALVO PRODUCTOS ESPECIALES) CON 5 FABRICAS

ESTRUCTURA ABIERTA COMPLETA CON 5 FABRICAS

habiéndose obtenido resultados coherentes:

- El peso de los diferentes factores del modelo fue en todos los casos del siguiente orden:

COSTE DEL MATERIAL : 93 %

COSTE DE TRANSPORTE : 5 %

COSTE DE ARRANQUE : 1 %

COSTE DE CAMBIOS : 1 %

lo que implicaba la necesidad de afinar todo lo posible los datos relativos al abastecimiento de material

- En cualquiera de las hipótesis el sistema encontraba una solución casi equivalente en coste de de explotación compensando unos factores de coste con otros. Esto aconsejaba el orientar al sistemas en la formulación de las hipótesis hacia aquellas soluciones industrial o económicamente factibles, o que no representaran una ligera disminución del coste de explotación a costa de una elevada inversión.

- El sistema mostraba una predilección por ciertas Fuentes de Suministro de material frente a otras, lo que aconsejaba introducir más detalladamente la problemática estacional del sector junto con las modificaciones previsibles que se producirán a partir de 1992.

- El número de camiones utilizados en las soluciones halladas era ligeramente inferior al extrapolable de la situación actual real.
- Un cambio importante en la estructura de una fábrica (por ejemplo en las nuevas instalaciones de CUATRO CAMINOS) tenía una fuerte repercusión en la estructura del resto de Fábricas. Ello aconsejaba efectuar un análisis con mayor perspectiva.

Debido a las conclusiones anteriores se procedió a un nuevo estudio en el que el horizonte de datos se trasladó a 1994, tanto relativo a la demanda como a la disponibilidad y calidad del material. Así mismo se distinguió entre la temporada de verano y la de invierno. El sistema DANAE se instaló esta vez en los ordenadores de ACME, tras resolver algunos problemas de compatibilidad, lo que permitió acelerar la preparación de hipótesis y análisis de los resultados. Explorando las posibilidades se determinó:

- ESTRUCTURA OPTIMA (DE ACUERDO A LOS COSTES DE EXPLOTACION PARA LA FABRICA DE CUATRO CAMINOS, DISTINGUIENDO EN LAS AMPLIACIONES RESPECTO A LA ESTRUCTURA ACTUAL DE LA FABRICA EXISTENTE, LAS QUE ERAN CONSECUENCIA DEL CRECIMIENTO DE LA DEMANDA DE AQUELLAS QUE RESULTABAN (PRIMORDIALMENTE) DEL TRASLADO DE INSTALACIONES PREVIAMENTE SITUADAS EN OTRAS FABRICAS,
- AMPLIACIONES DE PRODUCCION RECOMENDADAS POR EL SISTEMA EN OTRAS FABRICAS, DISTINGUIENDO ENTRE LAS ESTIMADAS REALIZABLES (E INCORPORADAS EN EL ESTUDIO) Y LAS JUZGADAS INFECTIBLES POR CONSIDERACIONES PRACTICAS INDUSTRIALES (Y NO INCORPORADAS),
- ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LA SOLUCION PROPUESTA, DETERMINADO PARA CADA UNA DE LAS ALTERNATIVAS RAZONABLES EXISTENTES A LAS AMPLIACIONES DE CUATRO CAMINOS EL INCREMENTO DE COSTE DE EXPLOTACION,

#### 4. CONCLUSIONES

Una consecuencia natural del análisis anterior ha sido la definición por parte de la Dirección de ACME, S. A. de una estrategia productiva y la adopción de las decisiones iniciales en cuanto a la modificación de la capacidad productiva de las diferentes Fábricas acordes con ella. El mérito se debe no tanto a los resultados obtenidos, aunque válidos por sí mismos, sino principalmente al esfuerzo sinérgico de formalización que el establecimiento del Modelo y de las hipótesis alternativas ha representado para los miembros de dicha Dirección. En circunstancias normales, sin la existencia del Proyecto DANAE, la atención de la Dirección de una Empresa se ve solicitada por tal número de problemas, especialmente los día a día, que queda relativamente poco tiempo para los problemas a medio plazo. El Proyecto DANAE ha dado a la

Dirección de ACME, S. A. la ocasión y el pretexto de profundizar más intensa y regularmente en la naturaleza del problema a medio plazo se presentaba, puesto que el Proyecto en forma continuada recababa su atención, en busca de directrices o presentando resultados.

A nivel instrumental ha podido comprobarse las posibilidades de las técnicas cuantitativas más tradicionales, como la programación lineal, condicionadas a que el algoritmo numérico quede inmerso en un sistema más general que está adaptado al problema que trata de resolverse.

A nivel profesional las conclusiones, altamente positivas, se refieren a las grandes posibilidades de colaboración que se abren a la Universidad y a la Empresa, gracias a la aportación de experiencias y conocimientos complementarios.

EURO XI  
AACHEN, JULY 16-19, 1991

A LANGUAGE FOR BUILDING LINEAR MODELS IN STRATEGIC MANUFACTURING PLANNING.

RAMON COMPANYS

JOAQUIN BAUTISTA

Department d'Organització d'Empreses

ETSEIB - UPC

Av. Diagonal, 647

08028 BARCELONA (SPAIN)

tel. (343)401.65.71/73

FAX (343)401.66.00

KEY WORDS: Manufacturing Planning, Linear Models, Model Building Languages

A firm with six factories was studying the transfer of one of them to a new nearby location. In the new location the production lines could be new lines instead of the replication of the old ones, and a reasonable question was what should the distribution of production lines between all factories be in order to attain the highest level of efficiency. This also raised the question of the optimum number of factories.

There are 100 products, divided into 22 families; each family is produced on a different line, but all the products of the family can be produced on the same line. All the products need the same critical material, and the distribution of production must be made in accordance with the distance between the factory and the 17 material sources. Another important aspect is the transport between the factories and 6 Regional Warehouses.

An initial approach to the problem revealed the possibility of a linear model, but also the existence of some essentially integer or binary variables. The dimension of the model, in the most simplified situation, is:

3000 continuous variables

350 binary variables

16 integer variables

2500 constraints

In order to build the different models automatically, adapt them to the different alternatives and process them, a pre-processor (matrix generator) covering a very general spectrum was developed, and a data base was incorporated. A post-processor was also developed to transform the results from the simplex format to the planning format.



material with different geographic locations, availability and price. The selection of the sources of supply of each factory is a complex problem in the day-to-day operation of the company.

Both the demand and the availability of raw material show a certain degree of seasonality.

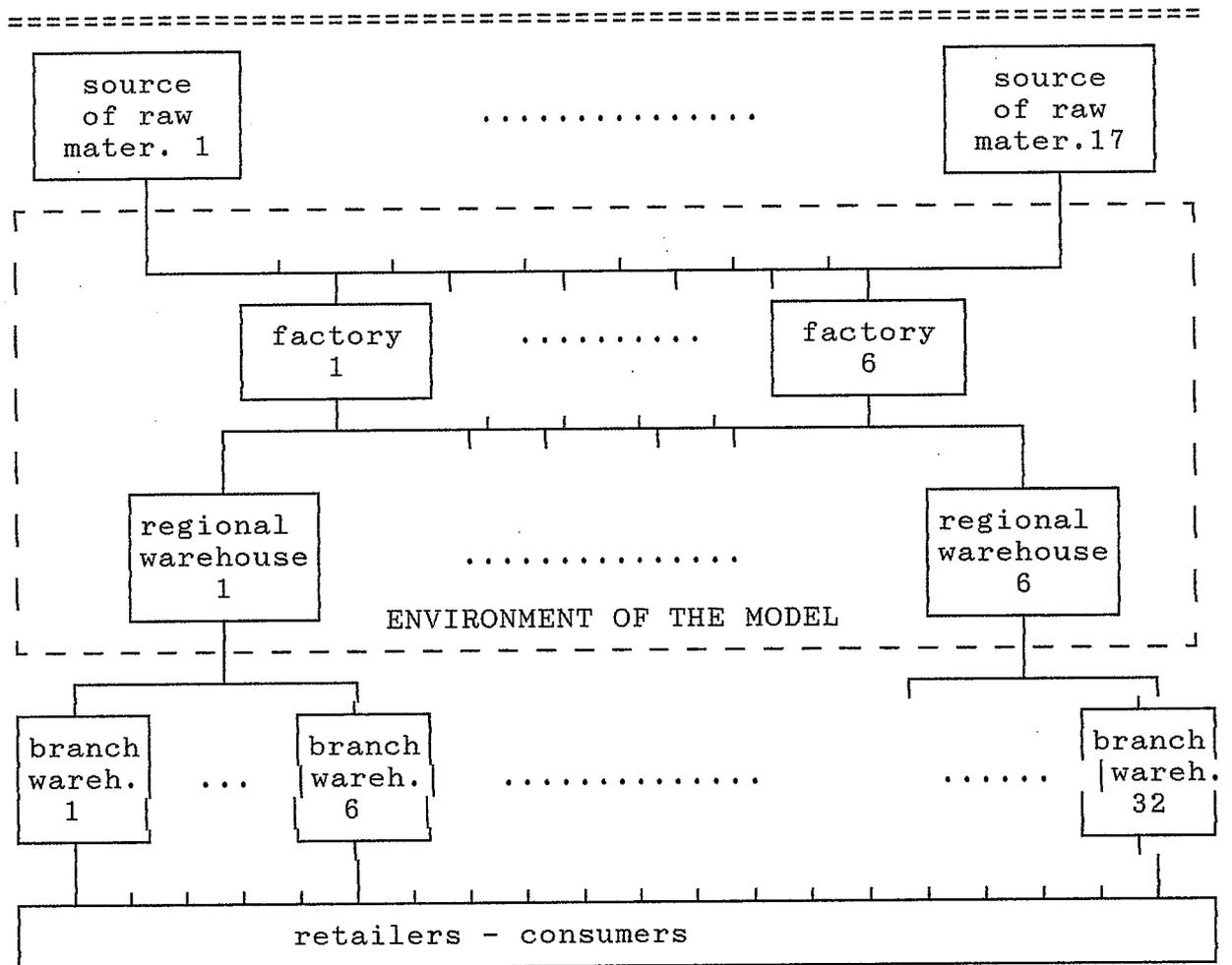


FIGURE 1 - LOGISTIC SYSTEM OF THE COMPANY

3. DESIGN OF THE MODEL

Accepting certain simplifications, an initial analysis of the situation led us to consider the possibility of modelling the operation of the system by means of a linear model with a certain number of binary and of integer variables - a model processable by computer. Having obtained the result of the model, a later calculation could take into account the aspects concerning profitability of the investments necessary for the transfers. Indeed, the number of possibilities of equipment were too numerous

and too closely connected to the existing situation and to the possibilities of the industrial plant market. This made it difficult to make an exhaustive list of the possibilities, which would in any case have made the model over-large.

The model had to be built on the basis of several hypotheses concerning the existence of lines in the factories, demand and the availability of raw materials. A fundamental factor was thus to make it sufficiently general to cover these areas and sufficiently specific to eliminate unnecessary elements in the models finally generated.

The variables taken into account in the model were:

- A binary variable associated to each family and each factory, which takes the value "one" if the family is indeed manufactured in the Factory, and "zero" otherwise.
- A variable binary associated to each product and each Factory, which takes the value "one" if the product is indeed manufactured in the Factory and "zero" otherwise.
- A continuous variable associated to the amount of each product manufactured per unit of time in each factory.
- A continuous variable associated to the amount of each product transported per unit of time from each factory to each regional warehouse.
- A continuous variable associated to the number of empty containers of each type transported per unit of time in each section of the established routes.
- A continuous variable associated to the number of empty containers of each type transported per unit of time in each section of the established routes.
- An integer variable associated to the number of lorries necessary on each route per unit of time.
- A continuous variable associated to the need for raw material per unit of time in each factory.
- A continuous variable associated to the amount of raw material transported per unit of time from each source to each factory.

The unit of time chosen in the case dealt with was the week. Due to a set of hypotheses some of the variables mentioned have no meaning (or are contradictory - e.g. that corresponding to the manufacture of a product in a factory which is not equipped to produce its family) These variables are not generated in the specific model.

The restrictions of the model are generically:  
(leaving aside those which merely correspond to calculations):

- attention to demand: the amount of each product received in each regional warehouse corresponds to its demand.
- production capacity: the amounts of the products of a family produced in each factory should not exceed the capacity installed.
- minimum batch: the amount of a product manufactured in a factory is at least the established batch.
- supply of raw materials: the amounts sent from a source do not exceed the available amounts and those received in a factory are equal to the needs.
- transport: the lorries provided for each route are sufficient to transport the containers.

There may also be specific restrictions whose meaning and content are laid out in 4.1.

The proposed objective is to minimize the total operating costs, described as:

cost of availability of raw material

cost of transport of the product

cost of starting up the lines

cost of changing product on a line

For the latter we adopted the simplification of considering that all the products assigned to a line are manufactured every day.

### 3.1. DIMENSION

The dimension of the model, in the most simplified situation, is:

3000 continuous variables  
 350 binary variables  
 16 integer variables  
 2500 constraints

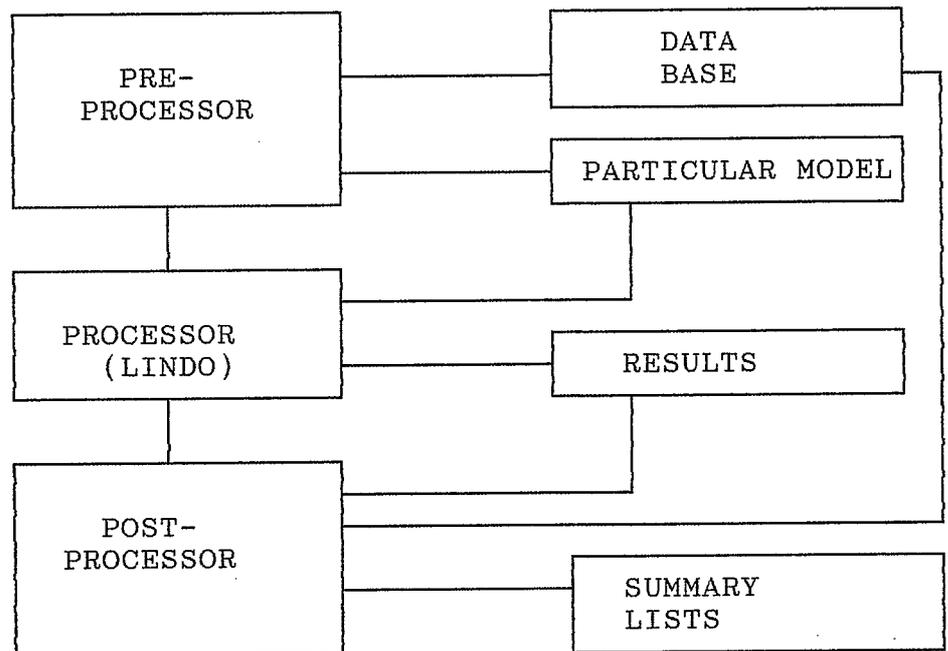


FIGURE 2 - STRUCTURE OF THE GENERATING AND OPERATING SYSTEM OF THE MODELS

#### 4. COMPUTER SYSTEM

In order to obtain the desired flexibility a computer system was divided into three main blocks:

1. PRE-PROCESSOR
2. PROCESSOR
3. POST-PROCESSOR

##### 4.1. PRE-PROCESSOR

It has two main tasks:

- a) to be used for the input, consultation and modification of data.
- b) to generate the specific model (associated to the hypotheses) in the format required by the PROCESSOR.

The categories of data to be taken into account are:

products: code, unit, description, production family, type of container, units per container, rate of consumption of raw materials, minimum batch.

factories: code, name, state (active or inactive) for each line overall effective capacity.

lines of production: code, name.

type of container: code, name, number of full and empty containers per pallet.

sources of raw material: code, name, availability, distance to the factories.

regional warehouses: code, name.

branch warehouses: code, name, regional centre to which they are assigned, distance to each regional warehouse.

demand: amount for each branch warehouse and each product (summer and winter).

route: code, associated transport, distance.

unit costs: transport of raw material, start up, changes and transport.

sundry parameters: capacity of a lorry.

#### 4.1.1. Generation of the Model

This is done in five phases:

Phase one: description of the desired model through the indication of the factories and active installations, the desired data (summer and winter), the treatment of each category of integer variables as such or possibly as continuous ones (which has particular repercussions on the minimum batches), introduction of special restriction of three possible types:

- a) limiting the maximum number of operative installations for certain families.
- b) forcing or prohibiting the operation of an installation in a given factory.
- c) forcing or prohibiting the manufacture of a given product in a given factory.

Phase two: making auxiliary calculations, especially the demand associated to each regional warehouse, and checking the potential existing of sufficient production capacity.

Phase three: detection of possible incoherences (caused in particular by the additional restrictions) and of unnecessary or forced variables.

Phase four: specific construction of the model, attempting to reduce the variables to a minimum.

#### 4.2. PROCESSOR

This consists of the LINDO computer package for solving mixed linear programmes.

#### 4.3. POST-PROCESSOR

The results obtained by LINDO are placed in a file with the format:

name of variable - primal value

for variables whose primal value is positive. The post-processor extracts the relevant information from this file, presenting it "intelligently" in five types of lists (in the present case):

1. LQF: For each Factory and Family of products this indicates the number of units produced and the number of different Products of the Family assigned to the Factory.
2. PQF: For each Factory and Product this indicates the number of units produced and the number of production batches that this involves.
3. PFR: For each regional warehouse and each Product this indicates which Factory is the main supplier (and the number of supplying Factories when there is more than one).
4. COST: For each component of cost this indicates its value and percentage of the total cost (the cost of change is recalculated without simplification).
5. SQF: For each Factory and Source this indicates the amount of raw material that the latter contributes to the supply of the former.

#### 4.4. DIMENSION.

The PRE-PROCESSOR and the POST-PROCESSOR represent together 1.5 mega-bytes in executable code. In this case the data bases occupy relatively little space (half a mega), and the specific models generated have an extension of 150 to 210 Kbytes.

#### 5. USE OF THE MODEL

The great flexibility obtained with the model generator allowed us not only to find the best reasonable solution for our case through the progressive introduction of more requirements in the model, but also to study its sensitivity, forcing solutions in its environment and evaluating the subsequent operating costs.

#### 6. SCOPE

The schema developed is not strictly dependent on the specific case for which it was designed, since most aspects are parametered and allow for changes within the general lines of the model described in 3.

We therefore believe that it is a first step in the preparation of a language for describing linear models for strategic planning of production systems.

#### 7. BIBLIOGRAPHY

SCHRAGE, L.; User's Manual for LINDO; The Scientific Press, 1989



TITOL:

**UTILIZACION DE  
MODELOS LINEALES  
PARA LA PLANIFICACION  
ESTRATEGICA**

**Autors: J. Bautista  
R. Companys**

**Document Intern de Treball  
(D.I.T.) 92/08**

**Barcelona, octubre 1992**

**Departament d'Organització d'Empreses  
Universitat Politècnica de Catalunya**



quantité disponible et le prix à l'origine de chaque source différent. Dans la gestion courante le choix des sources pour le fournissement des quantités de composante nécessaires à la fabrication de chaque usine est un des problèmes opérationnels les plus complexes.

Autant la demande des produits que la disponibilité de la composante ont une stationnalité appréciable.

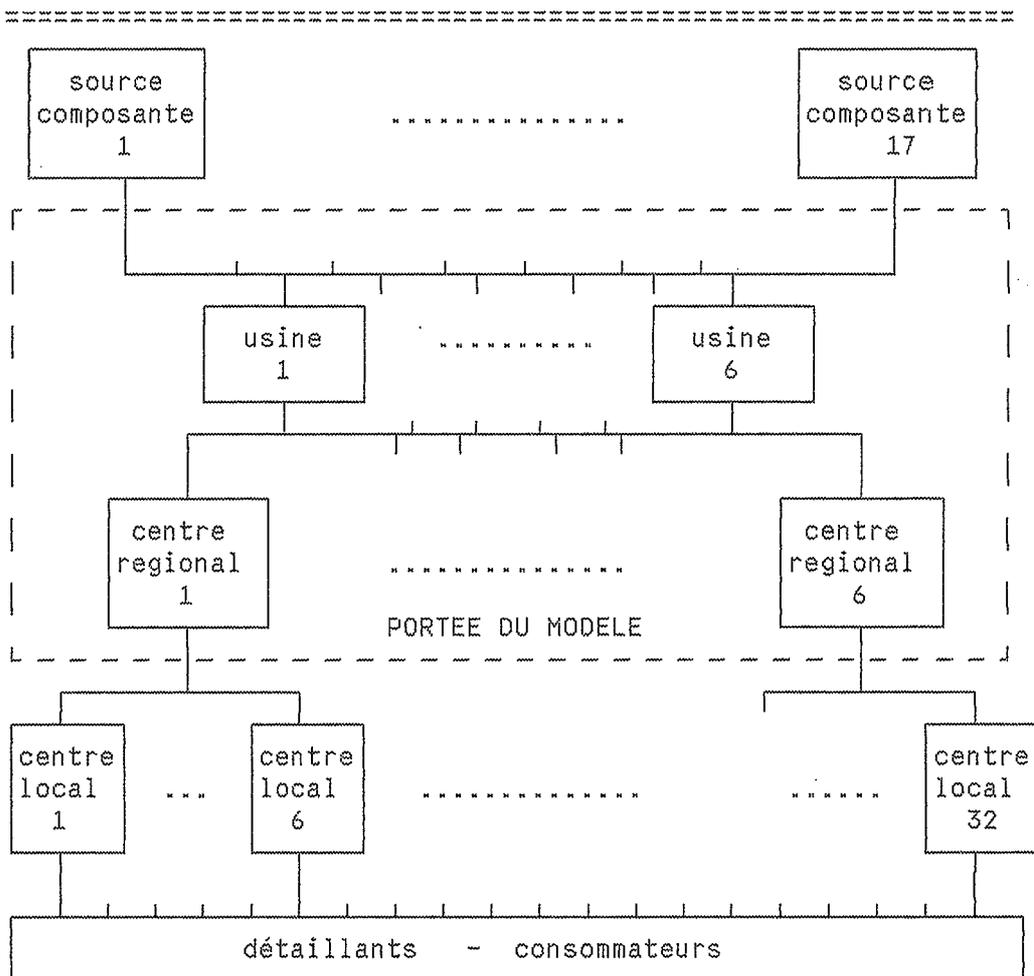


FIGURE 1 - SYSTEME LOGISTIQUE DE L'ENTREPRISE

### 3. CONCEPTION DU MODELE

Un premier examen du problème nous a amené à envisager la possibilité, au coût de certaines simplifications, de modéliser le comportement du système au moyen d'un modèle linéaire avec des variables bivalentes et entières, capable d'être exploité dans un ordinateur. Les aspects liés aux investissements et à sa rentabilité pouvaient être pris en compte plus tard. En fait les alternatives d'équipement étaient trop nombreuses et trop liées à des aspects techniques pour les formaliser aisément dans le

modèle.

Etant donné qu'on était censés de construire et exploiter plusieurs modèles, chacun d'eux répondant à des différents jeux d'hypothèses, sur les capacités installées dans les usines, la demande des produits et les disponibilités de composantes, nous avons choisi de définir en premier temps un meta-modèle, pourvu potentiellement de toute la généralité et complexité nécessaires lequel, au moyen d'un processus flexible capable d'éliminer les redondances et/ou les variables et contraintes non pertinentes, puisse aboutir aux modèles particuliers souhaités. On a choisi comme unité de temps la semaine et l'année horizon 1994. Les variables principales prises en compte dans le meta-modèle sont:

- Une variable binaire par famille et par usine, dont la valeur 1 correspond à la fabrication effective de la famille dans l'usine,
- Une variable binaire par produit et par usine, dont la valeur 1 correspond à la fabrication effective du produit dans l'usine,
- Une variable continue par produit et par usine correspondant à la quantité du produit fabriqué dans l'usine,
- Une variable continue par produit, par usine et par centre régional correspondant à la quantité du produit transporté de l'usine au centre,
- Une variable entière par route correspondant aux camions nécessaires pour le transport du produit (et retour) dans la route,
- Une variable continue par usine correspondant à la consommation de la composante,
- Une variable continue par source et par usine correspondant à la quantité de la composante transportée de la source à l'usine,

Les contraintes principales du meta-modèle sont:

- demande: la quantité de chaque produit reçue dans un centre régional est égale à la quantité demandée,
- production: la quantité de chaque produit envoyée à partir d'une usine est égale à la quantité fabriquée,
- capacité de production: la fabrication des produits d'une famille dans une usine ne doit pas dépasser la capacité de production de la ligne,
- lot minimal: la quantité de chaque produit fabriquée dans une usine ne doit pas être inférieure à celle du lot minimal du produit,

- approvisionnement: les quantités de la composante reçues dans une usine égalent les besoins,

- disponibilité: les quantités de la composante envoyées par une source ne dépassent pas la disponibilité de la source,

transport: le nombre de camions sur chaque route suffit à assurer le transport des produits et retour des recipients,

On a fait possible l'addition en plus de contraintes spéciales dont la signification se trouve en 4.1. La fonction objectif à minimiser du meta-modèle est la somme de coûts d'exploitation:

coût d'approvisionnement de la composante  
coût de transport du produit  
coût de mise en fonctionnement des lignes de fabrication  
coût de changement de produit dans une ligne

pour ce dernier coût on a choisi la simplification de supposer la fabrication de tous les produits 5 jours à la semaine.

### 3.1. DIMENSION

La dimension d'un modèle concret, dans le cas le plus simple, est:

3000 variables continues,  
350 variables binaires,  
16 variables entières,  
2500 contraintes,

## 4. LOGICIEL

L'architecture du logiciel, pour obtenir la flexibilité requise, a été conçue en trois modules de base:

1. PRE-PROCESSEUR
2. PROCESSEUR
3. POST-PROCESSEUR

### 4.1. PRE-PROCESSEUR

Il a deux fonctions:

- a) la création de la base de données,
- b) la construction du modèle concret (associé à un jeu d'hypothèses) dans le format requis par le PROCESSEUR,

#### 4.1.1. Construction du Modele

Se fait en cinq pas:

Pas un: introduction du jeu d'hypothèses sur les données, sur la relaxation éventuelle des contraintes de lot minimal ou de l'intégrité des variables, et sur l'existence des contraintes particulières des catégories suivantes:

- a) bornant supérieurement le nombre d'usines avec lignes opérationnelles pour une famille donnée,
- b) interdisant ou activant le fonctionnement d'une ligne dans une usine,
- c) interdisant ou activant la fabrication d'un produit dans une usine,
- d) interdisant ou activant le transport d'un produit d'une usine à un centre régional,

La catégorie (c) n'est pas compatible avec (d).

=====

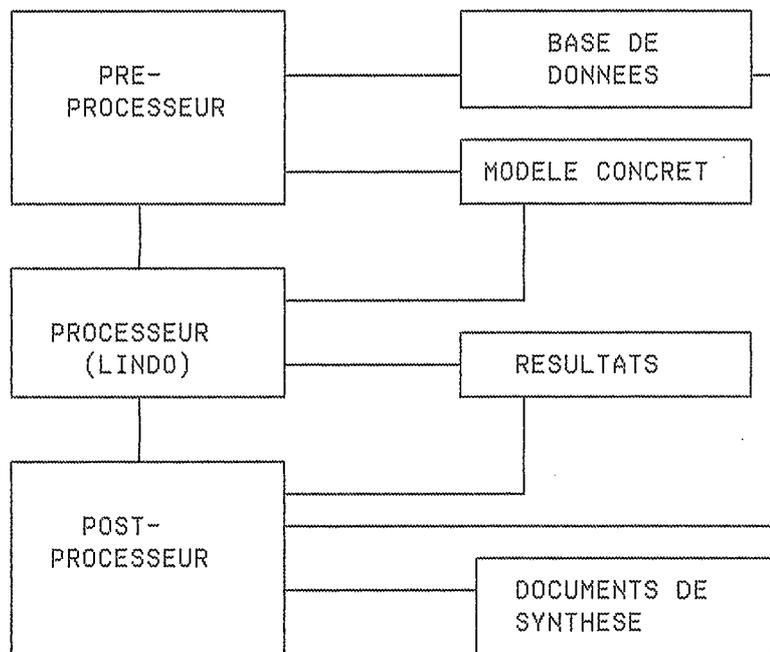


FIGURE 2 - ARCHITECTURE DU LOGICIEL DE GENERATION ET EXPLOITATION DES MODELES

Pas deux: calculs et contrôles auxiliaires,

Pas trois: détermination d'impossibilités (causées par les contraintes additionnelles) et des variables inutiles ou for-

cées,

Pas quatre: construction du modèle, avec réduction au nombre minimal des variables et contraintes,

Pas cinq: écriture du modèle dans un fichier,

#### 4.2. PROCESSEUR.

Le logiciel LINDO.

#### 4.3. POST-PROCESSEUR.

La solution fournie par LINDO est synthétisée dans un fichier avec le format: "nom de la variable - valeur primale" pour les variables dont la valeur est positive, et avec ce fichier et la base de données le post-processeur produit documents de synthèse:

1. LQF: Quantité et nombre de produits de chaque famille fabriqués dans chaque usine,
2. PQF: Quantité et nombre de lots de chaque produit fabriqués dans chaque usine,
3. PFR: Usine que fournit chaque produit à chaque centre régional,
4. COUT: Valeur et pourcentage du total de chaque facteur de coût (le coût de change de produit est recalculé sans la simplification du modèle)
5. SQF: Quantité de composante transportée de chaque source à chaque usine,

FAM.	e	e01	e02	e03	e04	e05	e06	e07	e08
	h	h01	h02	h03	h04	h05	h06	h07	h07
f1		u1/u4	u1/u4	u1/u4	u1/u4	u1/u2/ u4	u1/u4	u1/u4	u1/u2
f2		u1/u2	u1/u2	u1/u2	u1/u2	u1/u2	u1/u4	u1/u2	u1/u2
f3		u2/u5	u2/u5	u2/u5	u2/u5	u2/u5	u2/u5	u4/u5	u2/u5
f4		u1/u6	u2/u6	u1/u6	u1/u6	u1/u6	u1/u6	u1/u6	u1/u6
f5		u2/u4	u2/u4	ux/u4	u2/ux	u2/u4	u2/u4	u2/u4	u2/u4

FIGURE 3 - TABLEAU D'UN JEU D'EXPERIENCES

## 5. EXPLOITATION DU MODELE

Les premières expériences avec des modèles construits par le système nous ont montré que les temps d'exploitation étaient acceptables si le modèle était "fermé" (avec la plupart des alternatives sur les lignes fixées à l'aide des contraintes auxiliaires) ou "relaxé" (sans que la fabrication soit contrainte à satisfaire des lots minimaux), mais ils dépassaient des limites raisonnables si le modèle était très "ouvert" (plus de 72 heures sur MICROVAX sans avoir exploré tous les sommets de l'arbre au cours de la procédure "branch-and-bound").

D'autre part en raison de l'existence d'une situation initiale bien définie mais non nécessairement proche à celle optimale (qu'on aurait obtenu d'un modèle ouvert), les possibilités d'évolution des lignes de production dans chaque usine, en type de famille et capacité, dans l'horizon de 5 années étaient fortement dépendantes à la fois de cette disposition initiale, des caractéristiques propres à chaque usine (p.e. surface existante) et des technologies disponibles sur le marché. Ceci nous a amené à utiliser une procédure d'exploration dans l'ensemble des alternatives. A partir d'un jeu d'hypothèses peu contraignant (modèle "ouvert") mais en relaxant quelques conditions (par exemple sur les lots minimaux par produit) on pouvait obtenir une solution à l'aide du logiciel LINDO, qu'après analyse permettait classer les familles en celles dont le placement des lignes ne présentait aucun doute et celles où les doutes persistaient. On pouvait ainsi définir un ensemble d'alternatives à explorer, que conduisaient à des modèles avec moins de flou (plus "fermés") qu'on traitait avec un degré de relaxation plus réduit, et ainsi de suite. La figure 3 présente l'éclatement en alternatives à explorer. Le résultat final a été une collection d'ensembles d'alternatives voisines, techniquement cohérentes, avec évaluation des différentiels de coût d'exploitation pour chacune d'elles.

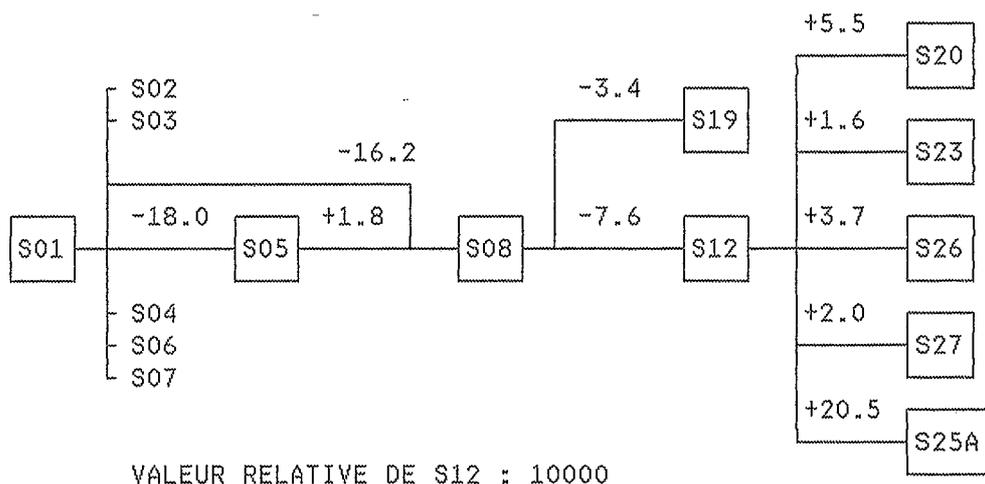


FIGURE 4 - ARBRE DES SOLUTIONS EXPLORÉES

## 6. CONCLUSION

Dans la figure 4 nous avons dessiné de façon abrégée l'arbre d'exploration des solutions. Chaque solution a une valeur résultant de la somme pondérée des coûts d'exploitation avec des données été et avec des données hiver. Dans les arêtes nous avons inscrit la variation de la valeur dans le sens de l'exploration. Bien que la solution S12 est celle de moindre coût, on a jugé meilleure S23 qui entraîne moins de changements et d'investissements.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

COMPANYS, R. & BAUTISTA, J.; A language for building linear models in strategic manufacturing planning; EURO XI, Aachen, 16-19 July 1991  
SCHRAGE, L.; User's Manual for LINDO; The Scientific Press, 1989