

# Técnica robotizada de producción: Tecnología de agrupamiento

El empleo de grafos y técnicas de inteligencia artificial permite simplificar las tareas de planificación de la producción en lotes pequeños.

## Quinta Parte

Ing. Marisa R. De Giusti\*

### Resumen

Este es el quinto de una serie de cinco artículos donde se describen las actividades de estudio realizadas hasta el momento en el tema "Técnicas para la automatización de la producción", dentro de los objetivos del Programa Institucional de Robótica (PIR) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.

Dentro de dicho tema, esta serie se dedica a la disciplina denominada "Tecnología de agrupamiento", TA (Group Technology), de gran interés para los casos de producción de partes en lotes pequeños y medianos.

Este artículo describe la resolución por representación gráfica del problema de TA presentándose tres tipos de grafos: bipartito, de transición y de límites, incluyendo en su parte final un ejemplo de resolución con TA.

### Formulación gráfica

En esta formulación gráfica la matriz de incidencia  $[a_{ij}]$  se representa por medio de un grafo; aquí se describen tres modalidades distintas de grafos:

- Grafo bipartito.
- Grafo de transición.
- Grafo de límites.

### Grafo bipartito

En un grafo bipartito existen dos conjuntos de nodos: uno representa partes y el otro máquinas.

Para discutir la aplicación de grafos bipartitos se considera la matriz (1):

	Nº de parte					Nº de máquina
	1	2	3	4	5	
$[a_{ij}] =$	0	1	0	1	1	1
	1	0	1	0	0	2
	0	1	0	1	0	3
	1	0	1	0	0	4

Matriz (1)

El grafo bipartito que la representa es el de la Fig. 21, que puede descomponerse en dos grafos bipartitos

disjuntos como los que se muestran en la Fig. 22.

Basados en estas dos figuras se forman las familias de partes:

$$FP-1 = \{1, 3\} \quad FP-2 = \{2, 4, 5\}$$

y las celdas de máquinas:

$$CM-1 = \{2, 4\} \quad CM-2 = \{1, 3\}$$

### Grafo de transición

En un grafo de transición la parte es representada por un nodo, y la máquina por un arco. Considerando nuevamente la matriz (1), el grafo de transición que la representa es el de la Fig. 23.

La representación por medio de grafo de transición es útil para detectar las partes denominadas "cuellos de botella". Para ilustrar este concepto obsérvese el

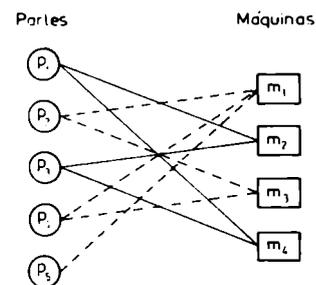


Fig. 21 Grafo bipartito correspondiente a la matriz (1).

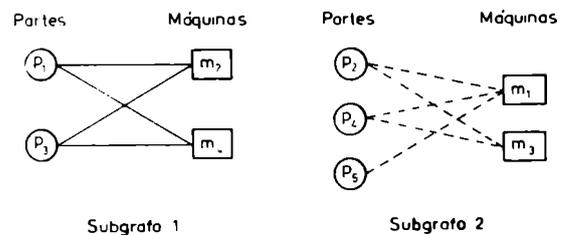


Fig. 22 — Dos grafos bipartitos disjuntos correspondientes al grafo de la Fig. 1.



Fig. 23 — Grafo de transición correspondiente a la matriz (1).

\* Miembro de la Carrera de Investigador de la CIC de la Feia. de Buenos Aires - Integrante del CeTAD, FI, UNLP.

grafo de transición correspondiente a la siguiente matriz:

					Nº de parte	
	1	2	3	4	5	Nº de máquina
$[a_{ij}] =$	1	1	0	0	1	1
	1	1	0	0	0	2
	0	0	1	1	1	3
	0	0	1	1	0	4
	Matriz (2)					

Esta matriz da como representación en grafo de transición el de la Fig. 24.

Por remoción de la parte 5 se obtienen los grafos de la Fig. 25.

Así se obtienen dos familias de partes y las correspondientes celdas de máquinas:

$$FP-1 = \{1, 2\} \quad FP-2 = \{3, 4\} \quad CM-1 = \{1, 2\} \quad y \\ CM-2 = \{3, 4\}$$

#### Grafo de límites

Un grafo de límites consiste en una jerarquía de grafos bipartitos. En cada nivel del grafo de límites, los nodos del grafo bipartito representan partes o máquinas. Obsérvese la Fig. 26 que representa el grafo de límites de la matriz (1).

Para aplicar grafos de límites para la determinación de "cuellos de botella" considérese la matriz (2) y su representación que aparece en la Fig. 27. Si en el grafo de dicha figura se remueve la parte 5, se tienen los dos grafos de límites que muestra la Fig. 28.

Determinar los "cuellos de botella" parte-máquina en un grafo, es una tarea bastante compleja; Kusiak [17] utiliza un algoritmo desarrollado por Lee [2] aplicable en TA.

#### Consideraciones previas

Dado un grafo  $G = (X, C)$  donde  $X$  representa a los nodos del grafo y  $C$  al conjunto de arcos que los conectan, una subred  $G_i = (X_i, C_i)$  de la red  $G =$

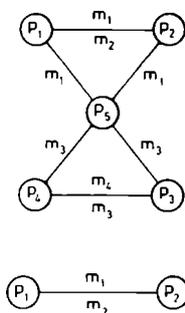


Fig. 24 — Grafo de transición correspondiente a la matriz (2).



Fig. 25 — Dos subgrafos de transición obtenidos a partir del grafo de transición de la Fig. 24.

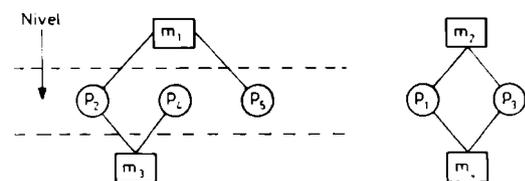


Fig. 26 — Grafo de límites correspondiente a la matriz (1).

$= (X, C)$  queda definida como una red formada por un subconjunto de nodos  $X_i \subset X$  junto con un conjunto de arcos que unen a dos nodos cualesquiera de  $X_i$ .

En la red  $G = (X, C)$  puede encontrarse un conjunto de nodos  $X_i$  donde  $(X_i \subset X)$  cuya remoción (junto con la de los arcos que le son incidentes) genera subredes completamente separadas, este conjunto de nodos se denomina conjunto de corte. Los nodos que integran el conjunto de corte (y que por lo tanto unen nodos de distintas subredes) son equiparables a las partes "cuellos de botella" que utilizan máquinas de distintas celdas en TA. El algoritmo de Lee [21] expuesto a continuación sirve para descomponer un grafo en subgrafos hallando el conjunto de corte.

Si se denota:

$N$ : Número de nodos en un grafo.

$K$ : Número máximo de nodos en un subgrafo.

El algoritmo consta de los siguientes pasos:

Paso 1:

Dada una red de  $N$  nodos con un número predeterminado  $K$  máximo de nodos en cada subgrafo, calcular el número mínimo de subredes, dado por:

$$\bar{m} = [(N-1)/K] > 1;$$

donde  $[(N-1)/K]$  indica el entero más próximo no menor que  $(N-1)/K$ .

Paso 2:

Para  $m$  subgrafos realizar los pasos 3-6 siendo inicialmente  $m = \bar{m}$ .

Paso 3:

Seleccionar  $m$  nodos iniciales uno por cada subgrafo.

Paso 4:

Formar un conjunto de nodos-límite para cada subgrafo de manera tal, que la remoción del conjunto aisle al subgrafo del resto del grafo. Cualquier nodo contenido en dos o más conjuntos de nodos-límite pasa a ser miembro del conjunto de corte y se remueve de la lista de nodos-límite.

Paso 5:

Seleccionar un nodo de cada conjunto de vértices-límite y adicionarlo al correspondiente subgrafo.

Paso 6:

Repetir los pasos 4 y 5 hasta que cada nodo esté asignado a la subred o al conjunto de corte.

Paso 7:

Repetir los pasos 3-6 hasta encontrar la mejor solución. De no encontrarla incrementar  $m$  en 1 y volver al paso 2.

Ejemplo:

Sea el grafo de la Fig. 29.

Paso 1: se hace  $K = 3$ .

$$\bar{m} = [(5-1)/3] = 2 > 1$$

Paso 2: se asigna el número de subgrafos  $m = \bar{m} = 2$ .

Paso 3: se seleccionan los nodos 2 y 5 como iniciales.

Paso 4: si se denota como  $C\{(A)\}$  a los nodos del grafo  $A$ , y  $C\{(B)\}$  a los nodos del grafo  $B$ , el con-

junto de los nodos comunes a ambos grafos se simboliza como:

$$C\{(A)\} \wedge \dots \wedge C\{(B)\}$$

Luego, si se elige:

$$C\{(1)\} = \{2, 3\}$$

$$C\{(2)\} = \{3, 5\}$$

entonces:  $C\{(1)\} \wedge C\{(2)\} = 3$ .

O sea que 3 es el nodo común de  $C\{(1)\}$  y  $C\{(2)\}$ , y por lo tanto se lo remueve de  $C\{(1)\}$  y  $C\{(2)\}$ .

Paso 5: adicionar los nodos 1 y 4 a los correspondientes subgrafos:

$$C\{(1)\} = \{1, 2\}$$

$$C\{(2)\} = \{4, 5\}$$

Paso 6: dado que no hay más nodos comunes en  $C\{(1)\}$  y  $C\{(2)\}$  y todos los nodos han sido asignados, detenerse.

Si cada nodo en el ejemplo expuesto representa una parte, la solución es:

$$FP-1 = \{1, 2\}$$

$$FP-2 = \{4, 5\}$$

De este modo se ha excluido el "cuello de botella" que significaba la parte 3.

#### Visualización del futuro en TA

En los últimos años se han producido cambios significativos en la industria manufacturera. Estos cambios pueden atribuirse fundamentalmente al desarrollo de sistemas automatizados de manufactura. Para tratar con la complejidad de estos nuevos sistemas los diseñadores comenzaron por desarrollar nuevas herramientas. Los *sistemas expertos* representan a esta clase de herramientas y se utilizan ampliamente en el área de diseño y planeamiento operacional.

El término *sistema experto* se refiere a un programa de computadora que puede realizar tareas en el dominio de aplicación, similares a un humano experto.

Hay tres características de importancia en la construcción de un sistema experto. Estas características son:

#### 1) La representación del conocimiento.

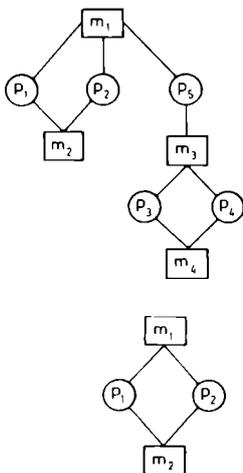


Fig. 27 — Grafo de límites correspondiente a la matriz (2).

Fig. 28 — Dos subgrafos disjuntos de límites obtenidos a partir del grafo de la Fig. 27.

2) La adquisición del conocimiento.

3) La estrategia de inferencia.

#### 1) Representación del conocimiento

Los métodos más frecuentes utilizados para la representación del conocimiento son:

- Reglas de producción.
- Redes semánticas.
- Tramas.
- Lógica de predicados.

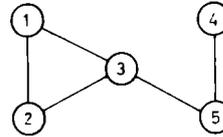


Fig. 29 — Ejemplo de aplicación del algoritmo de Lee.

#### Reglas de producción

Una regla de producción consiste en una parte a la izquierda que representa un conjunto de situaciones, determinando la aplicabilidad de la regla y una parte a la derecha que representa el conjunto de acciones a realizar si se aplica la regla. Una regla de producción puede tener las siguientes dos formas:

Forma 1: SI < condiciones >  
ENTONCES < acciones directas >

Forma 2: SI < condiciones >  
ENTONCES < acciones que activan otras reglas >

La primera categoría consiste en reglas de primer orden en las cuales la parte de la derecha es una acción específica sin ninguna referencia a otras reglas. En la segunda categoría, también denominada meta-reglas la parte de la derecha activa otras reglas de menor orden.

Ejemplos de reglas que pertenecen a estas dos categorías pueden ser:

#### • Regla de primer orden:

R1: SI la parte 1 tiene que tener una rugosidad superficial < 60 micrones.

ENTONCES se requieren: desbastado grueso y pulido.

#### • Regla de segundo orden (meta-regla):

R2: SI la parte 2 tiene una terminación final como la de la parte 1.

Y la parte 1 usa la R1.

ENTONCES activar la R1.

#### Redes semánticas

Una red semántica tiene la estructura de un grafo consistente en nodos y arcos rotulados. Un nodo en este contexto representa un concepto y un arco entre un par de nodos representa la relación entre los conceptos correspondientes a esos nodos.

Un ejemplo de red semántica se muestra en la Fig. 30, que da una forma útil de pensarla, si bien formalmente sólo es representable por medio de programas de computadora.

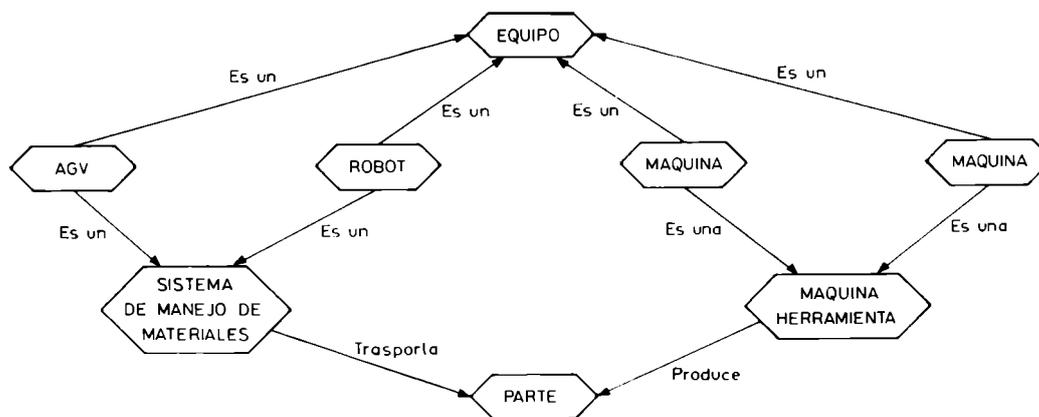


Fig. 30 — Red semántica.

### Tramas

Una trama puede ser definida como una estructura de datos que incluye conocimientos acerca de algún concepto. Está constituida por "tajadas" o porciones ("instancias") en cada una de las cuales se representa una propiedad simple del objeto.

Ejemplo:

Nombre de la trama	→ OA
Tipo de trama	→ Operación de agujereado
ES - UNA	→ Operación
Equipo requerido	→ Máquina herramienta
Duración	→ Intervalo (estándar y rango)
Próxima operación	→ Acabado

### Lógica de predicados

El empleo de reglas de producción presenta limitaciones para la representación de generalizaciones tales como: "...para todo X... existe algún X...", etc.). La lógica de predicados emplea sentencias que califican a objetos (sus argumentos) existiendo distintos métodos sistemáticos para encadenar estos predicados en un proceso de razonamiento (por ejemplo: el llamado método de resolución [2]).

#### 2) Adquisición del conocimiento

La adquisición de conocimientos puede lograrse a partir de distintas fuentes: expertos humanos y bases de datos, donde estos conocimientos pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Los conocimientos sobre datos y hechos relacionados con el dominio del problema.
- Los denominados conocimientos de procedimientos, que consisten en las reglas para resolver un dado problema.

#### 3) Estrategias de inferencia

Es el proceso de búsqueda que nos lleva, a través del espacio de estados del problema, al objetivo. En el caso de un sistema experto, para un objetivo como el que nos interesa, la necesidad de poder explicar la línea de exploración seguida de acuerdo a un método "pseudo-humano" provoca que la estrategia de inferencia más frecuente sea la de encadenado ("chain-ing").

Este proceso de búsqueda puede verse como el cruce de un grafo dirigido que puede realizarse en dos sentidos: hacia adelante o hacia atrás.

Tres factores determinan la elección de razonamiento hacia adelante o hacia atrás:

1. ¿Hay más estados de comienzo que estados objetivo? Es deseable moverse del menor al mayor número de estados.
2. ¿En qué dirección es mayor el factor de salto? Es deseable moverse en el sentido del menor factor de salto.
3. Si el programa debe responder a preguntas del usuario es importante proceder en la dirección que se corresponde más cerradamente con el modo en que razonará el usuario.

Dos ejemplos simples dejan estos conceptos más claros:

Suponiendo que se tiene que llegar hasta una fábrica situada en un barrio desconocido, ¿cómo conviene proceder en la búsqueda? Si el punto de partida es su domicilio particular y el objetivo la fábrica, resulta más sencillo planear la ruta a partir del lugar desconocido dado que de este modo el espacio de estados conocidos (lugares diferentes y conocidos) va creciendo a medida que se aproxima a su hogar; si lo hiciera en sentido inverso, la aproximación al lugar desconocido se haría cada vez más difícil. Este es un ejemplo de encadenado hacia atrás.

Considérese ahora una fórmula que contenga expresiones integrales. El estado objetivo es una fórmula equivalente a la inicial pero sin integrales. En este ejemplo se comienza con un estado inicial simple pero un sinnúmero posible de estados objetivo. Debido a esto es mejor razonar hacia adelante usando las reglas de integración para tratar de generar una expresión libre de integrales que comenzar con una expresión libre de integrales arbitraria y tratar de generar la integral particular que se desea resolver. Nuevamente es deseable avanzar hacia el mayor número posible de estados, lo que en este caso responde a una búsqueda hacia adelante. Para una mayor comprensión de estos temas consultar [2].

### Sistemas expertos en manufactura. Operación de un sistema experto

La realización de un sistema de manufactura involucra el diseño de partes, planeamiento de procesos, selección de equipos y distribución en planta.

Con el advenimiento de los sistemas expertos aparece como muy posible incrementar la eficiencia de los sistemas en manufactura. Heragu y Kusiak [6],

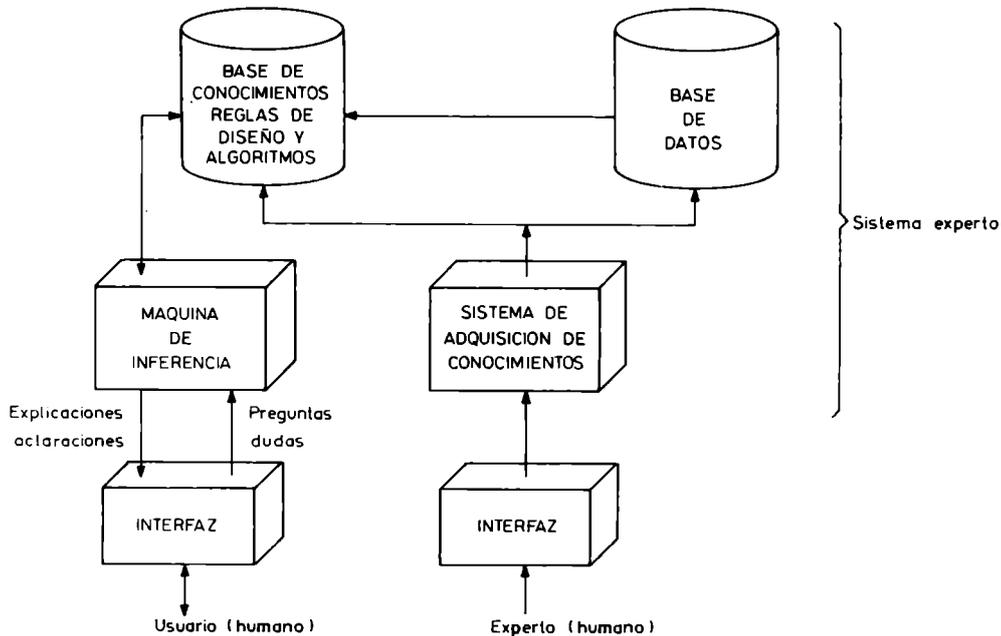


Fig. 31 — Estructura de un sistema experto para el diseño en manufactura.

proponen una estructura de sistema experto como la mostrada en la Fig. 31.

Un experto interactúa con un sistema de adquisición de conocimientos a través de una interfaz, que es la responsable de la generación y/o actualización de la base de datos de conocimientos.

Esta base de datos consiste en reglas de diseño, modelos y algoritmos para el diseño de partes, planeamiento de procesos, selección de equipos y arreglos de facilidades, las cuales pueden ser utilizadas para distintos procedimientos.

El tipo de máquina de inferencia elegida determina los procedimientos a emplear para resolver un dado problema, siendo la responsable de determinar las líneas de razonamiento para la solución que genera.

El sistema experto primero selecciona un modelo apropiado y un algoritmo para un dado problema y genera una solución inicial, la que es verificada para ver su aplicabilidad. Si es aplicable, se realiza una búsqueda en la base de datos para ver si se requieren modificaciones a la solución dada; si la solución no es posible se pasan compromisos adicionales al modelo, y se selecciona un algoritmo apropiado para la nueva solución.

La nueva solución es analizada para ver si es posible. Este proceso continúa hasta que se ha conseguido una solución satisfactoria. El usuario puede interactuar con el sistema a través de una interfaz apropiada.

Algunos autores, Kusiak<sup>[21]</sup> y Heragu<sup>[22]</sup> han sugerido que la arquitectura de sistema experto "en tándem" puede ser usada para la mayoría de los problemas prácticos que se derivan de la industria de la manufactura. El sistema experto en tándem combina un sistema experto con un mecanismo de optimización. Puede pensarse este modelo como el de un sistema experto ensamblado con una base de datos que contiene modelos y algoritmos como la mostrada en la Fig. 32.

El tipo de experto propuesto primero selecciona un modelo y un algoritmo apropiados para un dado problema generando una solución inicial. La solución ini-

cial es evaluada para ver su aplicabilidad. De ser posible el sistema controla con la base de datos para ver si se requiere alguna modificación a la solución. Si la solución no es posible se generan compromisos adicionales que son pasados al modelo, lo que lleva a la elección de un nuevo algoritmo. La nueva solución generada es verificada para comprobar su aplicabilidad. De este modo se continúa hasta hallar una solución satisfactoria.

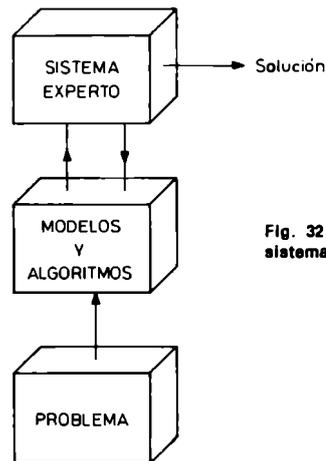


Fig. 32 — Arquitectura de un sistema experto en tándem.

### Conclusiones

Los cinco artículos que constituyeron esta publicación pretendieron exponer brevemente el problema de utilización de Tecnología de Agrupamiento (TA) en el ambiente industrial, dado que esta disciplina (como se comentara oportunamente) resuelve ventajosamente el diseño y ordenamiento de "piso" de una fábrica, el problema de organización lógica, el problema de diseño de piezas, ofreciendo numerosas ventajas de costo y tiempo. Cabe sin embargo recalcar que todos los ejemplos expuestos han sido expofeso de naturaleza sencilla en extremo, significando el estudio en planta de TA un verdadero desafío en tanto y en cuanto su aplicación en nuestro país es sumamente novedosa.

(Continúa en la pág. 188)

Dentro de los objetivos del Programa Institucional de Robótica se considera realizar la implementación algorítmica para contar con herramientas aptas para brindar un servicio concreto a la industria. ■

**Referencias**

- [<sup>1</sup>] Heragu, S. S. y Kusiak, A.: "Analysis of expert systems in manufacturing design". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, EE.UU., Vol. SMC 17 N° 6, noviembre-diciembre 1987, págs. 898-912.
  - [<sup>2</sup>] Kusiak, A. y Chow, W. S.: "An algorithm for cluster identification". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, EE.UU., Vol. SMC 17, N° 4, págs. 696, 699, 1987.
  - [<sup>3</sup>] Lee, J. L. y otros: "Calculation of shortest paths by optimal decomposition". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, EE.UU., Vol. SMC 12, 1982, págs. 410, 415.
  - [<sup>4</sup>] Rich, Elaine: "Artificial Intelligence". McGraw Hill, 1983.
  - [<sup>5</sup>] Kusiak, A.: "Artificial intelligence and operations research in FMS". Inform. Processing Operations Res., Vol. 25, págs. 2, 12, 1987.
  - [<sup>6</sup>] Heragu, S. S. y Kusiak, A.: "Expert systems and optimization in automated manufacturing systems". Dept. Mech. Ind. Eng. Univ. of Manitoba, Winnipeg, Canadá. Working Paper 07-87 1987.
-