

# Técnica robotizada de producción: Tecnología de agrupamiento

## Segunda Parte

El agrupamiento en "celdas" de máquinas permite optimizar las tareas, racionalizar el trabajo y hacer una mejor planificación. Se analizan también diversos métodos de clasificación y codificación.

Ing. Marisa R. De Giusti \*

### Resumen

Este es el segundo de una serie de cinco artículos que 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.

### Introducción

La disciplina denominada "Tecnología de agrupamiento" (TA), o "Manufactura en familias de partes" (Group Technology) es una técnica de producción de aplicación en aquellos casos en que la dimensión de un lote de piezas no justifica el montaje de una línea de producción especializada ("línea de flujo"); la idea básica de la TA consiste en agrupar las piezas a producir en lotes o tandas (batches) con características de maquinado similares, para luego procesarlas de manera conjunta a través de las máquinas que sean necesarias.

Como evolución posterior del mismo análisis, la TA ha incorporado el estudio de técnicas de agrupamiento de máquinas en celdas, que van desde un arreglo funcional (para pequeños lotes), hasta el sistema secuencial o por línea de flujo para lotes grandes.

El presente artículo considera el problema del diseño de celdas en TA y muestra diversas técnicas para conseguir el agrupamiento y clasificación de partes y máquinas. Es importante aclarar que, inevitablemente, todas estas soluciones implican en mayor o menor medida la esquematización o simplificación de problemas industriales reales, los que deben analizar un conjunto más elevado de variables, entre las que se cuentan aquellas relacionadas al costo y al planeamiento de producción.

### El concepto de "parte compuesta"

Una familia de partes está compuesta por el conjunto de aquellas partes que tienen atributos de diseño y manufactura similares; el concepto de "parte compuesta" es una forma de definir dicha "familia de partes".

Esta idea permite suponer la existencia de una parte ficticia que represente a todas las partes de la familia, al poseer los atributos de diseño y manufactura de todos sus miembros, como se ejemplifica en la Fig. 3. La parte compuesta en este caso posee los siete atributos listados en la Tabla I.

Una celda de máquina orientada al procesamiento de la parte compuesta debe diseñarse de modo tal que provea todas las capacidades de maquinado (en este ejemplo, siete) requeridas por dicha parte, y las máquinas, elementos de fijación y herramientas, deben disponerse de modo tal que faciliten un flujo eficiente de partes en trabajo a través de la celda. En este esquema, una parte que tenga todos los atributos pasará a través de los siete escalones de procesamiento, en tanto, para aquellas que no los reúnan todos, las operaciones innecesarias serán borradas de la hoja de ruta.

A pesar de que en la práctica las partes son más complejas, el concepto de parte compuesta sigue siendo válido para el análisis del problema de diseño de celdas de máquinas.

### Tipos de diseños de celdas

El agrupamiento de máquinas en "celdas" (ya sea lógico o físico) puede seguir cualquiera de los siguientes patrones:

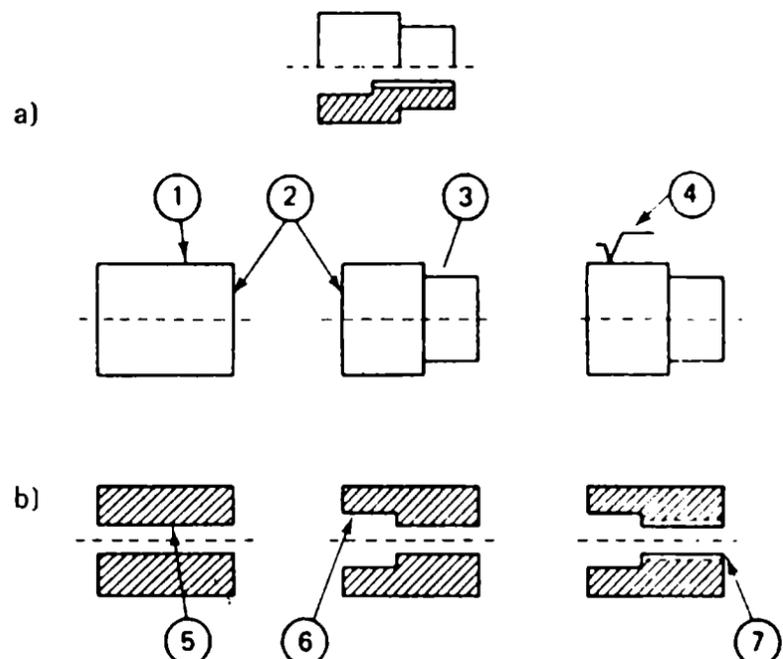


Fig. 3 — a) Parte compuesta provista de los siete atributos de diseño y manufactura que se detallan en la Tabla I; b) seis partes simples provistas de uno o un número limitado de dichos atributos. (Dibujo adaptado de [2].)

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

- Centro TA (sistema de máquina simple).
- Celda TA (sistema de arreglo en grupo).
- Línea de flujo TA.

#### Celda de máquina simple o centro TA

La celda de "máquina simple" o *centro TA* se desarrolla a partir de un arreglo funcional y consiste en un lugar de trabajo que, desde el punto de vista técnico y económico, está posicionado de modo tal que puede procesar un espectro de partes similares, cuyos atributos les permiten ser realizadas básicamente con un único tipo de máquina.

El centro TA constituye por ello el primer y más elemental escalón dentro de la racionalización que proporciona la tecnología de agrupamiento.

La Fig. 4 muestra una representación esquemática del centro TA. En el esquema superior se ven varias partes que requieren operaciones realizables con una única máquina (en este caso el torno esquematizado a la izquierda). La flecha hacia el esquema inferior indica el centro TA de torneado; los restantes centros mostrados en el dibujo (centro de torneado con control numérico por computadora - CNC, centro de alisado, centro de fresado, centro de rectificado, centro de perforado) se desarrollarían con un criterio idéntico.

La utilidad de esta forma básica de organización es sin embargo muy importante debido a la flexibilidad que proveen los modernos sistemas de transporte con guiado automático (AGVs: Automatic Guided Vehicles) para ingresar y egresar las partes al centro TA.

El primer objetivo del centro TA es el ordenamiento físico óptimo del equipo de trabajo con el auxilio del estudio de las características de similitud en manufactura, tarea que se une a un apropiado análisis económico.

El segundo objetivo es la racionalización del trabajo de escritorio necesario para el planeamiento de procesos.

Finalmente, otro logro importante del empleo de los centros TA es la disminución de los "tiempos muertos" en el recorrido de las piezas y en la puesta en funcionamiento de las máquinas, dado que procesan piezas similares (este beneficio se extiende también a la preparación de herramientas).

Esta racionalización significa, a nivel del programador de CAPP (Computer Aided Process Planning: Planeamiento de procesos asistido por computadora), una disminución muy grande de esfuerzos de cómputo.

#### Celda TA

La idea básica de una celda TA es dividir el área de manufactura en grupos de máquinas (no ya en una única máquina), donde cada celda contiene todas las máquinas necesarias para producir una determinada

**Tabla I: Atributos de diseño y manufactura de la parte compuesta de la Fig. 3**

Número	Atributo de diseño y manufactura
1	Operación de torneado del cilindro externo
2	Operación de facetado para las terminaciones
3	Operación de torneado para producir el escalón
4	Rectificado cilíndrico externo para acabado
5	Operación de agujereado para conseguir el agujero pasante
6	Desbarbado
7	Estriados internos

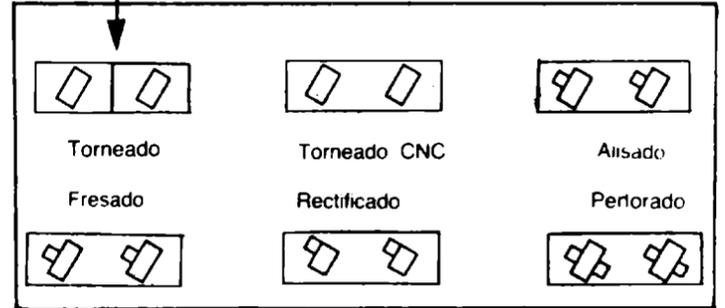
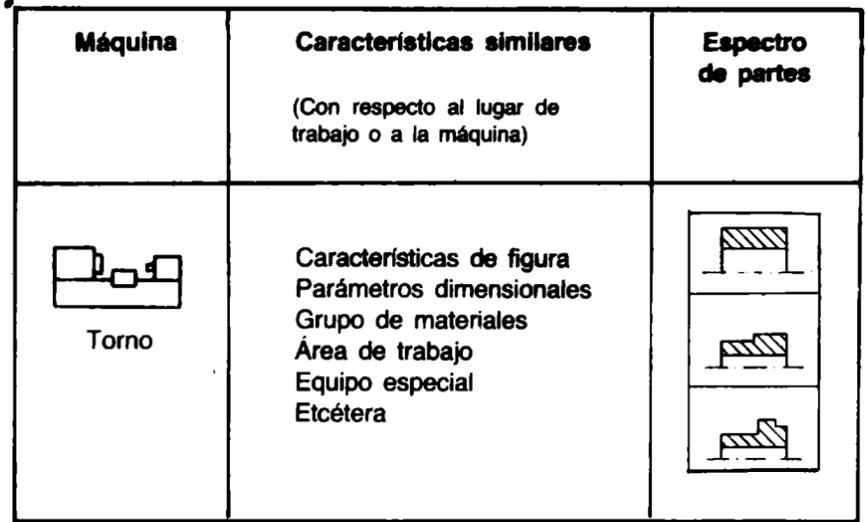


Fig. 4 — Centro TA. (Dibujo adaptado de [10].)

familia de partes, y donde las máquinas están convenientemente organizadas con las herramientas y piezas apropiadas para producir eficientemente esa familia de partes.

La celda TA no prevé el movimiento de piezas entre máquinas, problema que conduce a un segundo paso en la racionalización de TA.

La Fig. 5 ilustra el principio de la celda TA. El esquema superior muestra el agrupamiento de piezas que requieren tres máquinas para su procesamiento: torno, agujereadora y fresadora. La flecha señala la celda desarrollada para dichas piezas, y a su lado se muestran otras dos celdas que procesan partes distintas.

Comparando a la celda TA con el centro TA, la primera asegura la disminución de tiempos de ingreso y egreso de piezas, a la vez que simplifica el control de calidad.

(Continúa en la pág. 1241)

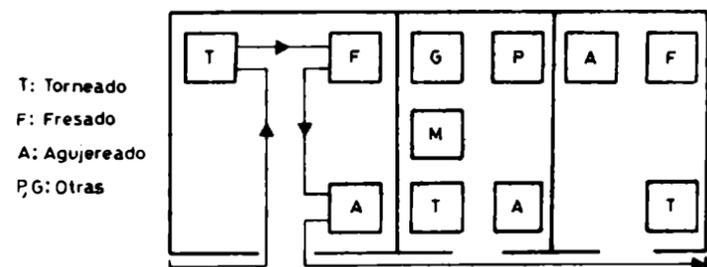
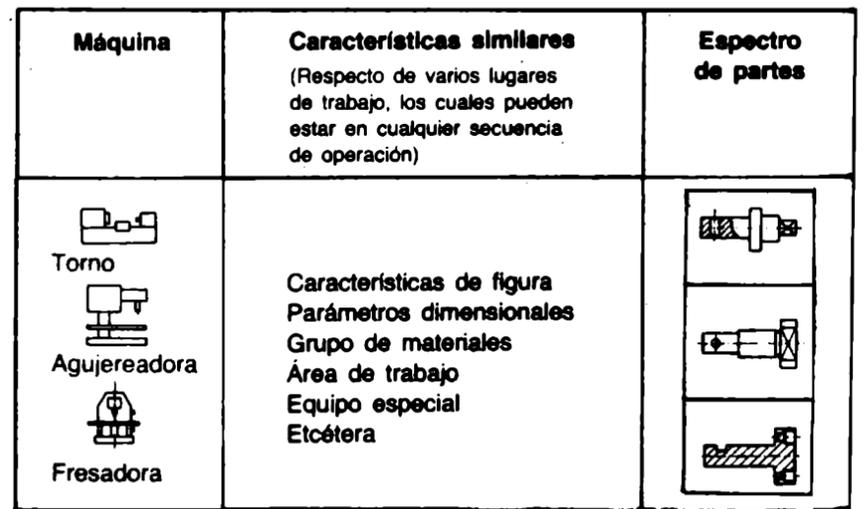
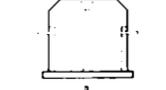
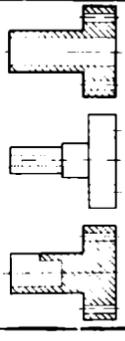


Fig. 5 — Celda TA. (Dibujo adaptado de [10].)

Máquina	Características similares (Respecto de varios lugares de trabajo a los cuales se pasa en una secuencia fija de operación)	Espectro de partes
1)  2)  3) 	Características de figura Parámetros dimensionales Grupo de materiales Área de trabajo Equipo especial Etcétera	

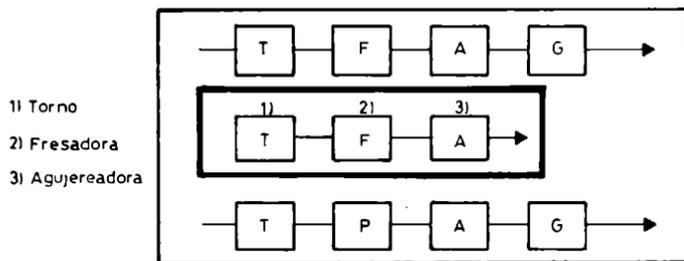


Fig. 6 — Línea de flujo TA.

Línea de flujo TA

En este caso, las máquinas se ubican de acuerdo a una secuencia fija de operaciones, lo que simplifica el transporte mediante esquemas rígidos (cintas o cadenas transportadoras) y/o AGVs a cada lugar de trabajo.

A pesar de ser el caso más complejo de los enunciados para celdas TA, presenta la limitación de que las partes de cada familia deben ser procesadas en la misma secuencia. Como consecuencia inmediata, el flujo de trabajo adquiere direccionalidad, debiendo estudiarse detalladamente el conjunto de almacenamientos transitorios o intermedios (buffers) y almacenamientos finales (stocks), así como la mejor atención de las piezas que tienen igual ciclo pero distinta secuencia de maquinado.

La Fig. 6 muestra el principio de la celda por flujo de línea. El esquema superior agrupa las partes que requieren la secuencia: torneado-fresado-agujereado, indicada por la flecha del recuadro del esquema inferior. Las otras dos líneas muestran las líneas de flujo de piezas distintas con otra secuencia fija.

Métodos de resolución del problema de TA

La llamada "resolución del problema TA" comprende aquellas técnicas empleadas para clasificar y organizar a las partes en familias, así como a las requeridas para la selección y asignación de maquinarias a celdas TA o líneas de flujo.

Dada la variedad de técnicas empleadas, que van desde simples métodos visuales hasta el uso de técnicas de inteligencia artificial, en la Fig. 7 se muestran los

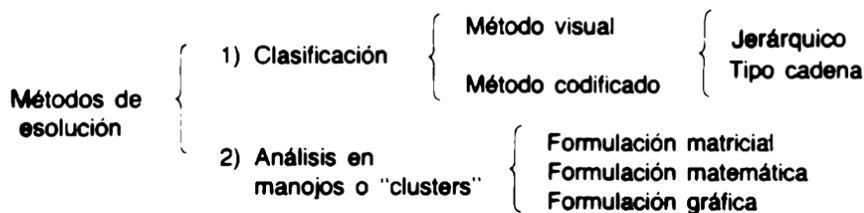


Fig. 7 — Métodos típicos para la resolución del problema de TA.

métodos típicos para la resolución del problema de TA.

Tal como se indica en dicha figura, existen dos métodos básicos para resolver el problema de TA. Ellos son el método de clasificación y el de análisis en manojos, racimos, o "clusters".

Método de clasificación

El método de clasificación se usa para agrupar partes dentro de familias, basándose en sus características de diseño, y a su vez permite dos posibles variantes:

- Método visual.
- Método codificado.

Ambos métodos requieren un esfuerzo importante de tiempo y trabajo-hombre, siendo el más complicado el método de clasificación y codificado (no hay hasta el momento ninguno que sea el aceptado universalmente).

Método visual

Es un procedimiento semisistemático donde las partes se agrupan de acuerdo a la similitud de su contorno, y se aplica sólo en los casos de números muy limitados de partes.

Como ejemplo obsérvese la Fig. 8.

Método codificado

Es un método según el cual las partes pueden ser clasificadas de acuerdo a las siguientes características:

1. Contorno geométrico y complejidad.
2. Dimensiones.
3. Tipo de material.
4. Forma del material en bruto (sin procesar).
5. Tolerancia y acabado de la parte terminada.

Usando un sistema de código cada parte tiene asignado un código numérico y/o alfabético, donde cada dígito o símbolo del mismo representa una característica de la parte. Los sistemas de código disponibles actualmente difieren con respecto a la profundidad de cobertura de las cinco características mencionadas.

Los sistemas de clasificación de partes pertenecen a una de las siguientes categorías:

- Sistemas basados en los atributos de diseño de las partes.
- Sistemas basados en los atributos de manufactura de las partes.

Los tipos de atributos de interés de las dos categorías aparecen listados en la Tabla II; en ellos se evidencia la superposición o solapamiento entre ambas clasificaciones.

El esquema de codificación de partes consiste en una secuencia de dígitos que designan los atributos de manufactura y diseño.

Los esquemas de códigos de clasificación de partes tienen dos estructuras básicas:

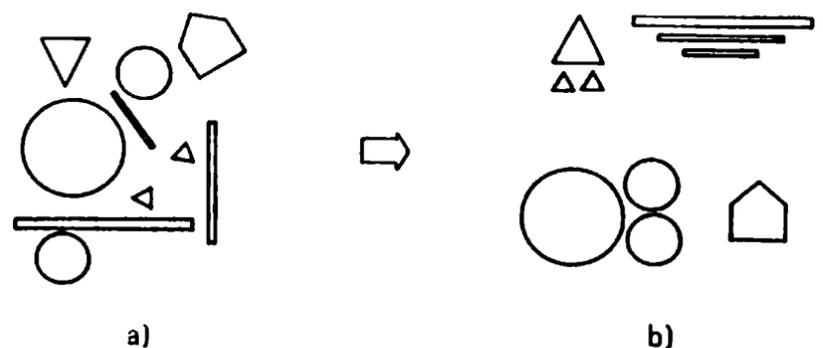


Fig. 8 — Método visual de agrupación de partes en familias. a) Partes antes del agrupamiento; b) partes agrupadas (Dibujo adaptado de [8].)

- Estructura jerárquica: en esta estructura de código, el significado de cada símbolo depende del valor de los símbolos precedentes.
- Estructura tipo cadena: en este tipo de código, la interpretación de cada símbolo en la secuencia es fijo, y no depende de la interpretación del símbolo precedente.

Por ejemplo, supóngase un código de dos dígitos tal como 17 ó 27, donde el primer dígito muestre la forma general de la parte, y el símbolo 1 signifique sección circular y el 2 rectangular.

En un código de estructura jerárquica la interpretación del segundo dígito (el 7) dependerá del valor del primero (1 y 2, respectivamente) donde el 7 precedido por 1 podría indicar una relación largo/diámetro y el 7 precedido por 2 la longitud de un lado.

En la estructura de código tipo cadena, el símbolo 7 se interpretará de un único modo, independientemente del primer dígito (por ejemplo podría indicar el largo de una parte).

Como resulta claro comprender, la ramificación del código jerárquico permite indicar mayor información sobre una pieza, para igual cantidad de dígitos, que el código tipo cadena.

La mayoría de los sistemas de clasificación y codificación actuales incorporan datos de diseño y manufactura en el código, tales como los códigos Opitz y Miclass de uso frecuente en planta TA [9].

#### Sistema de clasificación Opitz

Este sistema es uno de los "primitivos" usados en tecnología de agrupamiento, y utiliza una secuencia de 13 dígitos:

1 2 3 4 5      6 7 8 9      A B C D

Este sistema de código es demasiado complejo para poder describirlo detalladamente en este artículo; sin embargo, para comprender en forma general cómo trabaja el sistema Opitz, se indica su código básico. Este código consta de 9 dígitos que pueden extenderse con 4 más, donde la interpretación de los dígitos es la siguiente:

- Los 5 primeros dígitos son los de base para generar el código de la pieza en sí mismo.
- Los 4 dígitos siguientes constituyen un código suplementario con atributos que resultan útiles en manufactura (dimensiones, material de trabajo, tolerancias, etc.).

Tabla II: Atributos de diseño y manufactura de las partes, típicos del estudio de TA\*

Atributos de diseño	Atributos de manufactura
Forma externa básica	Proceso principal
Forma interna básica	Operaciones secundarias
Relación largo/diámetro	Dimensiones principales
Tipo de material	Relación largo/diámetro
Función de la parte	Acabado
Dimensiones principales	Herramientas de maquinado
Dimensiones secundarias	Secuencia de operación
Tolerancias	Tiempo de producción
Acabado	Tamaño del lote
	Producción anual
	Piezas fijas necesarias
	Piezas de corte

\* Datos extraídos de "Automation, production systems and computer aided manufacturing", de Mikell P. Groover, Prentice Hall, EE.UU., 1980. Cap. 18.

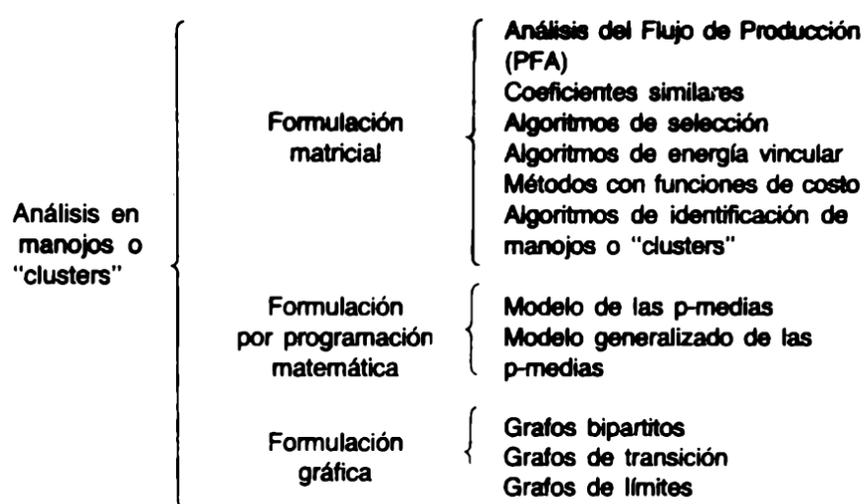


Fig. 9 — Técnicas para la selección de "clusters" que serán analizadas en el artículo.

- Los últimos 4 dígitos accesorios constituyen un código secundario y se usan en cada fábrica para identificar su tipo y secuencia de operaciones.

#### Sistemas Miclass

El sistema Miclass (Metal Institute Classification System) fue desarrollado para ayudar a automatizar un gran número de diseños distintos, procesos de manufactura y funciones varias que incluyen:

- Estandarización de dibujos.
- Recuperación de dibujos de acuerdo a un número de clasificación.
- Estandarización de enrutamientos.
- Planeamiento automatizado de procesos.
- Selección de partes para procesar en grupos particulares de máquinas-herramientas.

El sistema Miclass tiene como característica relevante la de ser interactivo, de modo tal que el usuario va respondiendo a preguntas generadas en la computadora, donde el número de preguntas se corresponde con la complejidad de la pieza; cuando la interacción finaliza aparece el código de la parte.

El código Miclass lleva de 12 a 30 dígitos, donde los 12 primeros son atributos aplicables a cualquier parte y los últimos 18 para las características particulares de cada industria.

Los atributos de las partes son codificados en los 12 primeros dígitos con el siguiente significado:

- Dígito 1: Forma principal.
- Dígitos 2 y 3: Elementos de forma.
- Dígito 4: Posición de los elementos de forma.
- Dígitos 5 y 6: Dimensiones principales.
- Dígito 7: Relación de las dimensiones.
- Dígito 8: Dimensiones auxiliares.
- Dígitos 9 y 10: Códigos de tolerancias.
- Dígitos 11 y 12: Códigos de materiales.

#### Beneficios del empleo de sistemas de clasificación y codificado

Los mayores beneficios de un sistema de clasificación y codificado son entre otros:

1. Facilita la formación de familias de partes y celdas de máquinas.
2. Permite la recuperación rápida de diseños, dibujos y planes de proceso.
3. Reduce la duplicación de diseño.

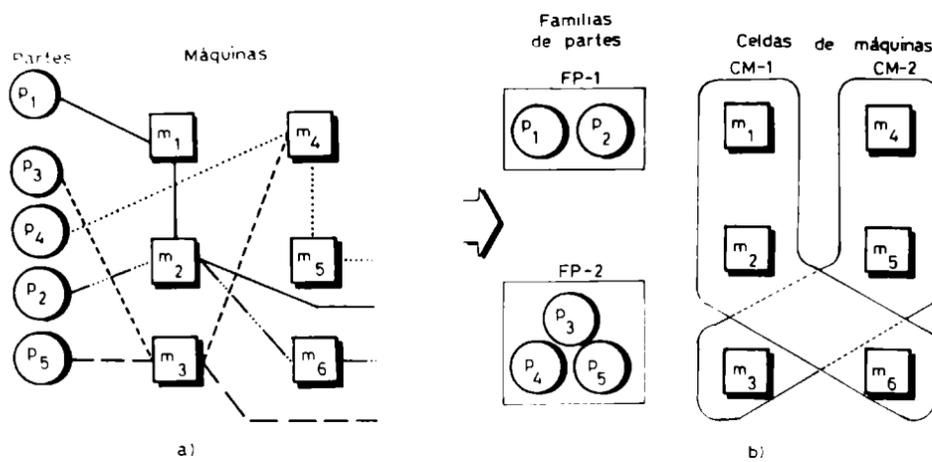


Fig. 10 — Ordenamiento lógico de máquinas. a) Máquinas y partes sin agrupar; b) máquinas y partes agrupadas. (Dibujo adaptado de [3].)

4. Provee estadísticas confiables de piezas de trabajo.
5. Disminuye los tiempos de puesta en marcha.
6. Racionaliza el uso de cada máquina-herramienta.
7. Ayuda al planeamiento de producción y a los procedimientos de planificación.

Una discusión más amplia de los sistemas de código puede verse en [11].

#### Método de análisis en manojos o "clusters"

El análisis en manojos, o en grupos, cuya denominación más común es análisis en "clusters", está relacionado con el *agrupamiento* de objetos dentro de grupos homogéneos basados en las características de los objetos. Dentro de este contexto usaremos en forma indistinta las palabras: *agrupamiento*, "cluster" o *manejo*, dejando de lado el término grupo por sus ya múltiples definiciones.

De las diversas técnicas para la selección de "clusters", en este artículo se analizan las mostradas en la Fig. 9.

La aplicación del análisis en "clusters" en TA lleva a agrupar partes dentro de familias de partes y máquinas en celdas de máquinas.

Como resultado de este último agrupamiento, existen dos opciones:

1. Ordenamiento físico de máquinas.
2. Ordenamiento lógico de máquinas.

El *ordenamiento físico de máquinas* requiere el movimiento de las maquinarias dentro del ambiente de

la fábrica, por lo cual el "piso" de la fábrica queda modificado.

El *ordenamiento lógico de máquinas* no altera la posición de las máquinas y se aplica en los casos en que el contenido de la producción cambia frecuentemente, de modo tal que el ordenamiento físico de máquinas no se justifique.

Ambos ordenamientos aparecen delineados en las Figs. 10 y 11.

#### Formulación matricial

En la formulación matricial se construye una matriz de incidencia parte-máquina  $[a_{ij}]$ , donde un elemento  $a_{ij}$  vale 1 si la máquina "i" es usada para procesar la parte "j", y 0 en caso contrario.

Típicamente, cuando se construye una matriz de incidencia parte-máquina  $[a_{ij}]$  los agrupamientos de partes y máquinas no son visibles, siendo el objetivo de los algoritmos transformar esta matriz inicial en una mejor estructurada donde los "clusters" se visualicen con mayor facilidad.

Por ejemplo, dada la siguiente matriz de incidencia  $[a_{ij}]$ :

		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	

Reordenar las filas y columnas de esta matriz da como resultado:

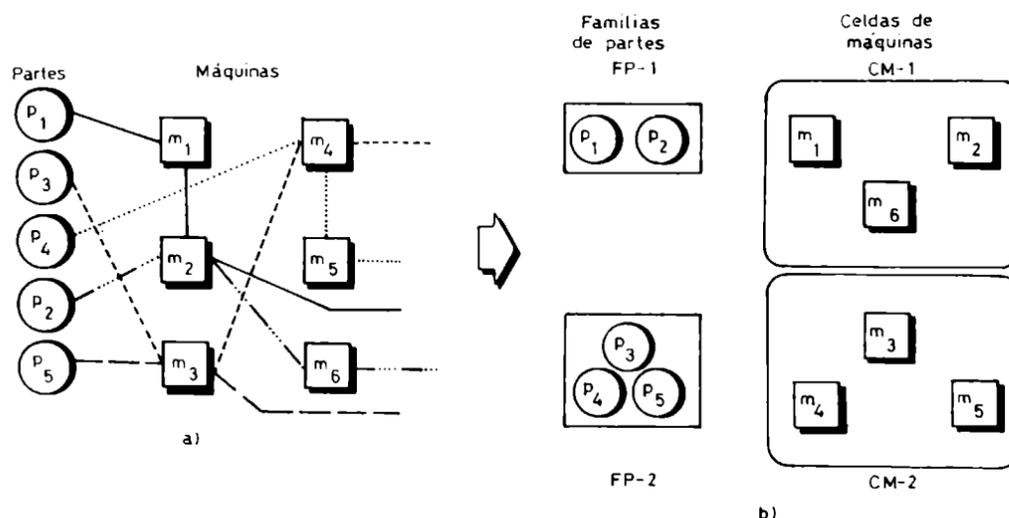


Fig. 11 — Ordenamiento físico de máquinas. a) Máquinas y partes sin agrupar; b) máquinas y partes agrupadas. (Dibujo adaptado de [3].)

N° de parte					N° de máquina
FP-1		FP-2			
1	3	2	4	5	
1	1	0	0	0	2 } CM-1
1	1	0	0	0	
0	0	1	1	1	1 } CM-2
0	0	1	1	0	

El análisis visual de esta nueva matriz pone en evidencia, con toda claridad, la existencia de dos celdas de máquinas o agrupamientos, los "clusters"  $CM-1 = \{2, 4\}$ ,  $CM-2 = \{1, 3\}$  y sus respectivas familias de partes  $FP-1 = \{1, 3\}$  y  $FP-2 = \{2, 4, 5\}$ .

Con este procedimiento pueden aparecer dos categorías de "clusters":

- 1) "Clusters" separables totalmente.
- 2) "Clusters" separables parcialmente.

Donde la primer categoría es la que se puede observar en la matriz anterior.

Sea ahora el siguiente caso:

N° de parte					N° de máquina
1	2	3	4	5	
1	1	0	0	1	1 } CM-1
1	1	0	0	0	
0	0	1	1	1	3 } CM-2
0	0	1	1	0	

Aquí la existencia del elemento  $a_{15}$  provoca que la matriz no pueda ser separada en dos "clusters" disjuntos debido a que la parte 5 tiene que ser maquinada en las dos celdas de máquinas  $CM-1$  y  $CM-2$ .

La remoción de la parte 5 de esta última da como resultado su descomposición en dos celdas de máquinas  $CM-1 = \{1, 2\}$ ,  $CM-2 = \{3, 4\}$  y dos familias de partes  $FP-1 = \{1, 2\}$  y  $FP-2 = \{3, 4\}$ , donde los dos "clusters" se denominan separables parcialmente.

Para terminar con el "cuello de botella" que significa la parte 5, pueden tomarse 3 acciones distintas:

1. Maquinarse en una celda y luego trasladarse a la otra.
2. Maquinarse en una facilidad funcional.
3. Subcontratarse.

La resolución de la formulación matricial del problema de TA puede ser encarada mediante múltiples técnicas, de las cuales la Fig. 9 muestra sólo seis.

Estas técnicas serán descriptas en la Tercera Parte de esta serie de artículos, como así también las técnicas de formulación por programación matemática y de formulación gráfica. ■

#### Referencias

- [2] Groover, Mikell P.: "Automation, production systems and computer aided manufacturing". Prentice Hall, EE.UU., 1980. Cap. 18, págs. 537-563.
- [3] Kusiak, Andrew y Finke, Gerard: "Selection of process plans in automated manufacturing systems". IEEE Journal of Robotics and Automation, EE.UU., Vol. 4, N° 4, agosto 1988, págs. 397-402.
- [10] Arn, E. A.: "Group Technology". Springer-Verlag, Germany, 1975.
- [11] Eckert, R. L.: "Codes and classification systems", American Machinery, págs. 88-92, diciembre 1975.

(Continuará)