

# Inicio del proceso de automatización utilizando tecnología de grupos\*

## Starting the automation process by using group technology

Jorge Andrés García Barbosa<sup>1</sup>, Ernesto Córdoba Nieto<sup>2</sup>

### RESUMEN

El presente artículo describe el inicio de un proceso de automatización fundamentado en la aplicación de la tecnología de grupos (*Group Technology*, GT). Se realiza la organización y disposición de las máquinas (*layout*) basado en el concepto de celdas de manufactura en la empresa Mecanizados CNC, dedicada a la fabricación de productos del sector metalmecánico (Fig. 1), una vez se ha determinado la mejor ubicación de los equipos se procede a programar la producción. Se establece el orden de elaboración de los productos y el adecuado montaje de las herramientas en las máquinas de la celda teniendo como objetivo la minimización de montajes, con lo cual se mejoraron los índices de productividad en un 15%.

**PALABRAS CLAVE:** Automatización industrial, organización de producción, tecnología de grupos.

### ABSTRACT

This article describes starting-up an automation process based on applying group technology (GT). Mecanizados CNC, a company making metallurgical sector products, bases the layout (organisation and disposition) of its machinery on the concept of manufacturing cells (Fig. 1.); production is programmed once the best location for the equipment has been determined. The order of making products and suitable setting up of tools for the machinery in the cells is established, aimed at minimising set up leading to achieving 15% improvement in productivity.

**KEY WORDS:** industrial automation, production organisation, group technology.

Recibido: Septiembre 29 de 2004

Aceptado: Noviembre 24 de 2004

## I. Introducción

La organización de los procesos de manufactura es de vital importancia para la competitividad de las empresas y por medio de ésta se logran los objetivos de productividad y eficiencia. Además, se disminuyen los costos de fabricación utilizando los mismos medios con los que se contaba antes de la organización.

Un proceso de manufactura se debe concebir de manera organizada y eficiente desde el principio, esto facilitará la implementación de sistemas automatizados a medida que el sistema lo requiera.



**Fig. 1.** Máquinas en planta de la empresa Mecanizados CNC.

La flexibilidad como concepto fundamental en los actuales procesos productivos es la habilidad para adaptarse a los continuos cambios del mercado.

La máxima escala evolutiva de los actuales procesos de producción automatizados son las células integrales de manufactura (CIM), y es objetivo de este artículo sentar las bases en este largo proceso de automatización.

## II. Fundamentos

La principal ventaja de la implementación de la tecnología de grupos (*Group Technology*, GT) es que un sistema de manufactura puede ser descompuesto en subsistemas o familias de partes con similitudes de forma, diseño y producción. La manufactura de celdas es una aplicación

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, M.Sc. jagarciab@unal.edu.co.

<sup>2</sup> Profesor titular Universidad Nacional de Colombia. ecordoban@unal.edu.co

\* Maestría en ingeniería - materiales y procesos de manufactura, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica. Universidad Nacional de Colombia - sede bogotá.

de la tecnología de grupos a los procesos industriales y su principal objetivo es reducir tiempos de montaje y tiempos de flujo, minimizando así inventarios y costos en proceso y optimizando tiempos de respuesta.

Como norma esencial, el proceso de automatización en producción no empezará antes de definir exactamente el problema, así el ingeniero estará compenetrado con la situación, conocerá en detalle el proceso, se enterará de los recursos disponibles, tendrá en cuenta los volúmenes de producción, los plazos de entrega determinados con los clientes, y estará al tanto de las especificaciones de calidad. La Fig. 2 ilustra el diagrama de flujo con el cual se inicia el proceso de automatización.

Realizado el primer paso en proceso de automatización se procede a realizar el diseño de celdas de manufactura, que está basado en los conceptos de tecnología de grupos; el objetivo es procesar varias familias de partes en un grupo de máquinas CNC dentro de una celda, en la que el esfuerzo en transporte de material es minimizado.

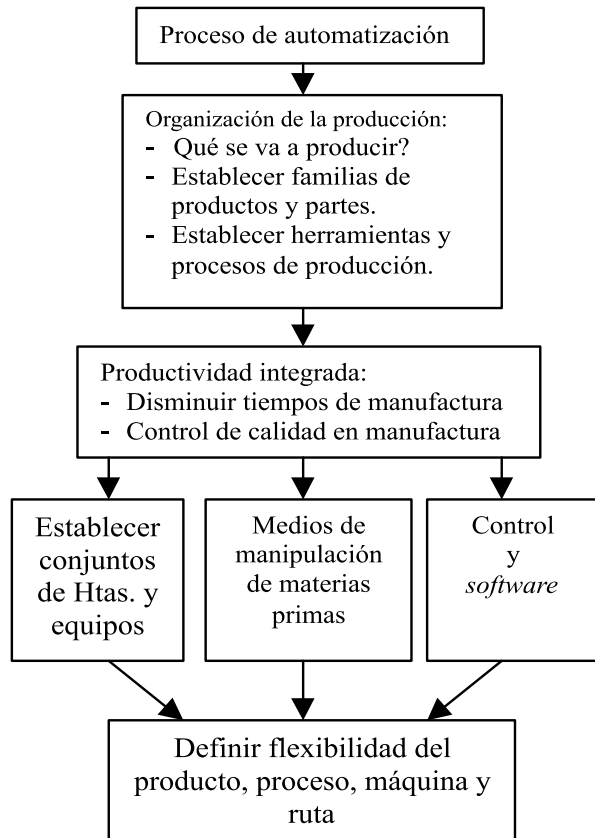


Fig. 2. Inicio del proceso de automatización.

### III. Ejemplo de aplicación industrial

La empresa colombiana Mecanizados CNC Ltda., dedicada al sector metalmecánico, tiene dentro de sus líneas de fabricación una que corresponde a la transformación del acero inoxidable, orientada hacia el área de arquitectura interior, Fig. 3. El objetivo del presente ejercicio es

sentar las bases de organización del proceso de fabricación para satisfacer la demanda de los productos.

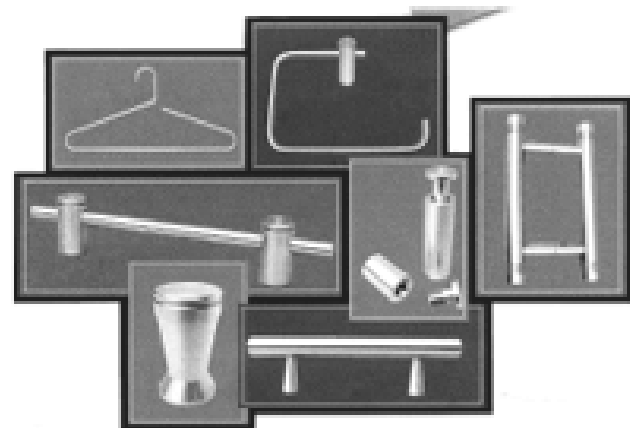


Fig. 3. Familia de productos en acero inoxidable.

#### A. Diseño de celdas de manufactura

Se establece la totalidad de los productos que serán fabricados por la celda de manufactura y los procesos que se realizan para su elaboración, según Tabla 1.

Se organiza una matriz que identifica los procesos a los que cada uno de los productos son sometidos, por medio de unos y ceros identificamos si al producto se le practica un proceso o no. Utilizando el método de "ranqueo" Rank Order Clustering (ROC) (King,1980), determinamos la sensibilidad de *peso específico tecnológico* de cada una de las columnas y cada una de las filas, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 1. Identificación de procesos y productos.

Procesos		Productos	
M1	Máquina 1	P1	Producto 1
M2	Máquina 2	P2	Producto 2
M3	Máquina 3	P3	Producto 3
M4	Máquina 4	P4	Producto 4
		P5	Producto 5
		P6	Producto 6
		P7	Producto 7
		P8	Producto 8

Tabla 2. Matriz de productos Vs. procesos. Los espacios vacíos se consideran ceros

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
M1	1	1	1	1	1	1	1	1	255
M2		1		1	1	1		1	93
M3		1		1	1	1			92
M4		1	1	1	1	1		1	125
	8	15	9	15	15	15	8	13	

Se ordenan las filas en orden decreciente de acuerdo a la **sensibilidad de peso específico tecnológico**, a continuación se organizan las columnas en orden decreciente. Se repiten estos dos pasos hasta que la matriz no sufra más modificaciones. El resultado de esta operación se puede observar en la Tabla 3. Una vez la matriz ha sido organizada, se determinan las posibles celdas de manufactura; una celda de manufactura, es un conjunto de partes y máquinas que tienen en común el proceso de fabricación, y por tanto con base en esta matriz se determinará el montaje y ubicación en planta (*layout*) de las máquinas.

En este caso se observa en la matriz la formación de varias posibles celdas de manufactura:

1. La matriz completa puede ser considerada una sola celda de manufactura compuesta por las cuatro máquinas.
2. Dos celdas de trabajo compuestas por celda uno (M2, M3 y P2, P4, P5, P6) y celda dos (M1, M4 y P8, P3, P1, P7).

**Tabla 3.** Matriz de productos Vs. procesos organizada por el método (ROC).

	P2	P4	P5	P6	P8	P3	P1	P7	
M1	1	1	1	1	1	1	1	1	255
M4	1	1	1	1	1	1	1	1	252
M2	1	1	1	1	1				248
M3	1	1	1	1					240
	15	15	15	15	14	12	8	8	

3. La tercera posibilidad corresponde a cuatro celdas de trabajo que atraviesan la matriz en diagonal, y corresponden a las celdas cruzadas por una línea diagonal en la Tabla 3.

**B. Evaluación del diseño de celdas**

Una vez se han establecido las celdas de manufactura, se procederá con la evaluación de la mejor opción para el montaje en planta, con base en la matriz anteriormente desarrollada (Tabla 3) se pueden definir diferentes configuraciones de celdas. Criterios como el de minimización de costos de transporte de material intracelda e intercelda, así como la eficacia de la combinación de celdas, son la base para escoger la mejor configuración.

La disposición de las máquinas en una celda, así como la disposición de las celdas y el transporte de material entre estos sistemas, empiezan a ser ahora la prioridad.

*1) Evaluación de costos de transporte*

Cuando de la matriz se extractan diferentes tipos de configuraciones de celdas (como en este caso), esta herramienta sirve para escoger entre una de las posibles configuraciones con base en el menor costo de transporte de materiales dentro del proceso productivo.

El costo total para movimientos interceldas e intraceldas está dado por la relación (1).

$$TC_i = C_1 N_i + C_2 \sum_{j=1}^m d_{ij} k_{ij} \quad (1)$$

donde:

- $m$  = número de celdas
- $C_1$  = costo de movimiento intercelda
- $C_2$  = costo de movimiento intracelda
- $N_i$  = Número de movimientos entre celdas para una configuración establecida

$\sum_{j=1}^m d_{ij} k_{ij}$  = Distancia total de movimientos intracelda en la  $j$ -ésima celda en la  $i$ -ésima configuración.

*a) Costos de transporte para un montaje considerando cuatro celdas de manufactura*

Es de notar que cada una de las máquinas corresponde a una celda de manufactura, por lo tanto no hay movimientos intracelda, los quince movimientos identificados en la matriz ilustrada en la Tabla 3 se desarrollan como movimientos interceldas; considerando el costo de un movimiento interceldas como el doble de un movimiento intraceldas, se tiene:

$$TC_i = C_1 N_i + C_2 \sum_{j=1}^m d_{ij} k_{ij} = 2 \times 15 + 1 \times \left( \frac{2+1}{3} \right) \times 0 = 30$$

*b) Costos de transporte para un montaje con dos celdas*

En este caso se tienen cinco movimientos interceldas, cuatro movimientos intracelda en la celda uno, y seis movimientos intraceldas en la celda dos (M1, M4), de esta forma se tiene:

$$TC_i = C_1 N_i + C_2 \sum_{j=1}^m d_{ij} k_{ij} = 2 \times 5 + 1 \times \left( \frac{2+1}{3} \right) \times 4 + 1 \times \left( \frac{2+1}{3} \right) \times 6 = 20.$$

*c) Costos de transporte para un montaje con una sola celda.*

Es posible ubicar las cuatro máquinas en dos tipos de configuraciones, en línea recta o en cuadrado, por medio del análisis de costos se determinará cuál de los dos tipos de montajes es más conveniente.

Distancia esperada para un montaje en línea recta

$$(d_{ij}) = \frac{N+1}{3}, \text{ donde } N \text{ es el número de máquinas.}$$

Distancia esperada para un montaje en rectángulo con M

$$\text{filas de } L \text{ máquinas } (d_{ij}) = \frac{M+L}{3}$$

Considerando que el costo interceldas es el doble del costo intracelda, el costo de transporte se dará así:

En el caso de montaje en línea,

$$TC_i = C_1 N_i + C_2 \sum_{j=1}^m d_{ij} k_{ij} = 2 \times 0 + 1 \times \left( \frac{4+1}{3} \right) \times 15 = 25$$

En un montaje rectangular,

$$TC_i = C_1 N_i + C_2 \sum_{j=1}^m d_{ij} k_{ij} = 2 \times 0 + 1 \times \left( \frac{2+2}{3} \right) \times 15 = 20$$

### 2) Evaluación de eficacia tecnológica

Otro de los elementos utilizados para escoger entre diferentes tipos de configuraciones de celdas, es el de la eficacia, que está determinado por la relación (2).

$$\Gamma = \frac{1-\psi}{1+\phi} \quad (2)$$

Donde  $\psi$  = Número de elementos excepcionales / número total de operaciones y

$\phi$  = Número de vacíos en los bloques diagonales / número total de operaciones.

Eficacia de un montaje con una sola celda:

$$\Gamma = \frac{1-\psi}{1+\phi} = \frac{1-0/23}{1+9/23} = 0,72$$

Eficacia de un montaje con dos celdas:

$$\Gamma = \frac{1-\psi}{1+\phi} = \frac{1-9/23}{1+2/23} = 0,56$$

Eficacia de un montaje con cuatro celdas:

$$\Gamma = \frac{1-\psi}{1+\phi} = \frac{1-15/23}{1+0/23} = 0,35$$

### 3) Resultado de la evaluación

Se presenta a continuación el resumen de la evaluación en la Tabla 4.

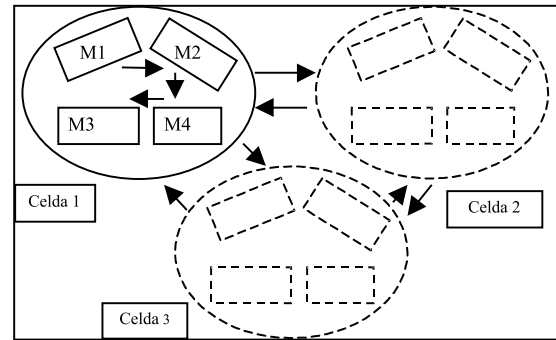
**Tabla 4.** Resumen de la evaluación.

	Costo	Eficacia
<b>1 celda (montaje en línea)</b>	<b>25</b>	<b>0,72</b>
<b>1 celda (montaje en rectángulo)</b>	<b>20</b>	<b>0,72</b>
<b>2 celdas</b>	<b>20</b>	<b>0,56</b>
<b>4 celdas</b>	<b>30</b>	<b>0,35</b>

Si bien el costo de una celda (montaje en rectángulo) es igual que para un montaje con dos celdas, la eficacia del primero es mayor a la del segundo, por tanto se escoge el montaje con una sola celda y su *layout* o montaje en planta se ilustra en la Fig. 4.

En este caso se formó una única celda de manufactura, denominada en la Fig. 4, celda 1. La celda 2 y la celda 3 son ilustrativas e indican la disposición en que se ubica-

rían diferentes celdas de manufactura en la planta, si la matriz así lo hubiera indicado.



**Fig. 4.** Layout del sistema.

Las flechas dentro de la celda 1 indican los movimientos intracelda (*intracell movements*), las flechas que están uniendo las celdas entre sí se denominan movimientos intercelda (*intercell movements*).

### C. Programación de una orden de manufactura

Con la totalidad de productos fabricados en la empresa Mecanizados CNC Ltda. y mediante la gestión utilizando la teoría de tecnología de grupos se definió el tipo de montaje en planta, pero los productos no se fabrican en un orden determinado sino que se elaboran de acuerdo a los requerimientos de ventas y a los lotes solicitados por el cliente. Se ilustra a continuación en la Tabla 5 un ejemplo de la programación de producción del 28 de julio de 2003.

Con la orden de producción, el objetivo se convierte en *realizar los productos en el menor tiempo posible, minimizando el número de montajes de las máquinas y con una adecuada administración de las herramientas.*

Todas las partes para ser elaboradas pasan primero por el proceso de máquina 1 (Tabla 3), pero no necesariamente por los procesos realizados en las máquinas 2, 3 y 4.

**Tabla 5.** Orden de producción

	Código	Diá. Mat. (in.)	Cantidad
P1	010600	5/8	400
P2	020100	1/4	1000
P3	020200	5/16	1000
P4	040102	3/4	200
P5	040302	3/4	50
P6	040201	3/4	200
P7	040301	3/4	50
P8	020105	3/8	100
P9	050101	3/8	100
P10	060200	1	200
P11	090101	1	200
P12	090102	1	100
P13	110103	1	100
P14	110104	1	200

Con base en lo anterior se realizará el análisis del orden de producción inicialmente para el proceso de máquina 1, para lo cual se hace una matriz de partes Vs. herramientas como la que se observa en la Tabla 6.

Se realiza el procedimiento (ROC), ordenando las filas y columnas según su sensibilidad de peso específico tecnológico, obteniendo la matriz ilustrada en la Tabla 7.

La máquina 1 (torno CNC), tiene un magazine de doce puestos de herramientas, de los cuales seis pueden ser barras de torneado exterior y seis para el montaje de herramientas de torneado interior como brocas, machos y barras alesadoras. Analizando la matriz organizada por el método (ROC) se puede dividir la orden de producción en dos lotes, primero se montarían las herramientas (H7, H1, H6, H5, H3, H4, H8, H9, H10, H15 Y H11), para fabricar las partes ( P1, P3, P10, P2, P4, P5, P13, P14), en el segundo lote se montarían las herramientas (H12, H13, H14, H2, H16, H17), para fabricar las partes (P7, P11, P8, P9, P12, P6).

El operario montará entonces el primer lote de herramientas y las dejará debidamente compensadas; realizará entonces el primer lote de partes sin necesidad de volver a montar herramientas durante este periodo; al terminar el primer lote de partes, desmontará de la máquina las herramientas (H1, H3, H4, H9, H10, H15) y las reemplazará por las herramientas (H12, H13, H14, H2, H16, H17), el motivo de este cambio es que el torno cuenta con un magazine para 12 herramientas, no se pueden realizar todos los productos con un solo montaje de herramientas, pero con dos montajes se realizará la totalidad de la producción.

El paso a seguir es ordenar cada lote de partes por orden de diámetro de material (Tabla 5), para disminuir el número de reglajes de la mordaza y cambio de bujes de la máquina. De esta forma el orden de producción del primer lote sería (P2, P3, P1, P4, P5, P10, P13, P14), después del segundo montaje de herramientas el lote de producción se ordenaría de la siguiente forma (P11, P12, P6, P7, P9, P8).

**Tabla 6.** Matriz de partes Vs. Herramientas para el proceso de la máquina 1.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	
	1	1	1							1					14352
						1					1	1			268
	1									1					8208
	1									1					8208
	1			1	1		1	1	1	1	1		1	1	9979
	1		1	1	1								1	1	11779
	1	1	1	1	1		1			1			1	1	16019
		1	1												6144
		1	1												6144
		1	1												6144
				1	1								1	1	1539
							1				1	1			140
							1				1	1			140
							1				1	1			140
										1					16
												1			4
												1			4
	97280	67456	69504	7232	7232	32768	5176	4096	4096	95236	36920	32827	7232	7232	

Para determinar la sensibilidad de peso específico tecnológico se utilizó Microsoft Excel 2002. A continuación se muestra el algoritmo utilizado y corresponde a la casilla de la última columna de la fila H1 (14352):

$$=SI(C2=1;POTENCIA(2;13);0)+SI(D2=1;POTENCIA(2;12);0)+SI(E2=1;POTENCIA(2;11);0)+SI(F2=1;POTENCIA(2;10);0)+SI(G2=1;POTENCIA(2;9);0)+SI(H2=1;POTENCIA(2;8);0)+SI(I2=1;POTENCIA(2;7);0)+SI(J2=1;POTENCIA(2;6);0)+SI(K2=1;POTENCIA(2;5);0)+SI(L2=1;POTENCIA(2;4);0)+SI(M2=1;POTENCIA(2;3);0)+SI(N2=1;POTENCIA(2;2);0)+SI(O2=1;POTENCIA(2;1);0)+SI(P2=1;POTENCIA(2;0);0)$$

En este caso C2 corresponde a la casilla P1, H1.

**Tabla 7.** Matriz ordenada por el método (ROC), de partes Vs. Herramientas para el proceso de la máquina 1.

	P1	P3	P10	P2	P4	P5	P13	P14	P7	P11	P8	P9	P12	P6	
H7	1	1	1	1	1	1	1	1	1						16352
H1	1	1	1	1											15360
H6	1	1			1	1	1	1							13248
H5	1		1		1	1	1	1	1	1	1	1			11260
H3	1		1												10240
H4	1		1												10240
H8		1		1											5120
H9		1		1											5120
H10		1		1											5120
H15			1												2048
H11					1	1	1	1							960
H12									1	1			1		50
H13									1	1			1		50
H14									1	1			1		50
H2										1			1	1	19
H16													1		2
H17													1		2
	129024	11648	11276	10009	90176	9017	9017	90176	73784	8252	8192	8192	63	4	

De esta manera se reducen los tiempos muertos de alistamiento de la máquina, es de tener en cuenta que el tiempo de alistamiento de mordazas y bujes es menor que el utilizado en montar y compensar una herramienta, por este motivo se tomó como prioridad el minimizar los montajes de herramientas.

El objetivo es analizar diferentes opciones de programación de la producción y escoger la que en conjunto dé un tiempo menor de respuesta. Es importante notar que la máquina 1 es la más utilizada y la totalidad de los productos pasan por ella.

Con la nueva organización de las máquinas y el nuevo sistema de la programación de la producción por medio de tecnología de grupos se mejoraron los índices de productividad en un 15%, esta mejora se obtuvo principalmente por la reducción de tiempos muertos en montaje de herramienta y alistamiento de la máquina. Ello equivale a ganar cuatro días de producción mensualmente para la empresa Mecanizados CNC Ltda.

#### IV. Conclusiones

La automatización de un proceso se inicia con la organización de la producción y es necesario que el ingeniero conozca muy bien el problema al cual se está enfrentando, comprenda el proceso de fabricación y la situación actual de la empresa, las expectativas hacia el futuro y el presupuesto con el que se cuenta. De esta forma podrá

dar una solución adecuada y a la medida de la situación industrial específica.

La flexibilidad es la piedra angular de las células integrales de manufactura (CIM), y de acuerdo al grado de flexibilidad requerido se genera la complejidad del sistema automatizado. A mayor grado de flexibilidad, mayor complejidad en la automatización.

La tecnología de grupos (*Group Technology*, GT), es una sencilla y potente herramienta que ayuda a la programación de actividades en una celda de manufactura. Basada en ésta se pueden definir las celdas de manufactura en un proceso, así como lotes de producción y administración de herramientas en un sistema automatizado, logrando el incremento de la productividad y la disminución de costos.

Es muy importante realizar un análisis del montaje en planta y de las implicaciones que éste puede tener en el costo del sistema; un sistema mal distribuido generará gastos innecesarios en transporte de material, así como gastos adicionales en infraestructura.

La programación de la producción en un sistema automatizado es bastante compleja y maneja gran cantidad de variables. A medida que se exijan más requisitos en la programación, por ejemplo, se necesite que el sistema **responda a cambios inesperados en la produc-**

**ción**, a fallo de máquinas, a programaciones de mantenimiento, el sistema se torna más confuso, y para solucionar estos problemas se han aplicado técnicas como **lógica difusa, redes neuronales y algoritmos genéticos**, entre otros.

Este proceso que se acaba de iniciar en Mecanizados CNC Ltda. va enfocado a lograr automatizaciones progresivas como lo son los sistemas flexibles de manufactura (FMS), en un proceso metódico y adecuado al nivel de crecimiento de la empresa.

### Agradecimientos

A Ernesto Córdoba Nieto, profesor de la Universidad Nacional de Colombia y orientador de la materia de manufactura y automatización experimental.

A Mecanizados CNC Ltda, empresa donde se realizó el estudio y se comprobó la eficacia de la aplicación de la tecnología de grupos.

A Cielo Neme, Eduardo Forero Y Fabio Peña, por su valiosa colaboración y aporte en la revisión del documento.

### Bibliografía

[1] David M. Upton, "A 2flexible structure for computer-controlled manufacturing systems", Harvard Business School, 1994, internet [upton@stig.harvard.edu](mailto:upton@stig.harvard.edu)

[2] Kusiak, KBSES: a Knowledge-based System for Equipment Selection, Chapter 7, 1990.

[3] M.K. Tiwari, "Solving machine loading problems in a flexible manufacturing system using a genetic algorithm based heuristic approach", International Journal of Production Research, 2000

[4] Nanua Singh, Systems approach to computer aided manufacturing, chapters 12 y 13, 1996.

[5] Sitio de internet: <<http://www.eng.tau.ac.il/~tzur/Storage-Management.pdf>> Workflow Verification: Finding Control-Flow Errors Using Petri-Net-Based Techniques.

[6] Sitio de internet: <http://www.me.umn.edu/divisions/ie/logistics/lexq.pdf> "Modeling and Analysis of Flexible Queueing Systems".

[7] Sitio de internet: <http://www.socr.uwindsor.ca/~vidyart/IJPR3.pdf> Solving machine loading problems in a flexible manufacturing.