

CAPÍTULO 4

MANUFACTURA CELULAR

4.1 CONCEPTO.

La manufactura celular es una de las aplicaciones de la tecnología de grupo en la manufactura, en la cual un sistema de manufactura ha sido convertido en células de manufactura de manera parcial o total. *Una célula de manufactura*, es un grupo de máquinas o procesos agrupados y dedicados a la manufactura de una familia de partes. Esas partes son similares en sus requerimientos de proceso, tales como operaciones, tolerancias, utilización del herramental de máquinas etc.

Los objetivos principales en la implementación de la manufactura celular, son reducir: 1) los tiempos de preparación del equipo (por manufacturar partes similares o familias de partes con las mismas herramientas y secuencias) y 2) el tiempo dentro del proceso (lográndose al utilizar el tiempo de preparación del equipo en la manufactura de varias partes, al uniformizar el manejo de materiales por la "variedad de las partes") y por lo mismo se reducen inventarios y tiempos de respuesta de mercado. Además, las células representan unidades sociolótécnicas que facilitan el trabajo en equipo. Esto significa que la motivación para el mejoramiento de los procesos, con frecuencia surge como algo natural en las células de manufactura. Las células de manufactura son serios candidatos a la implementación del "justo a tiempo".

4.1.1 Diseño de sistemas de manufactura celular

Diseño de una célula

El diseño de un sistema de manufactura celular es un ejercicio complejo con un amplio impacto para la organización. El proceso de diseño de una célula involucra puntos relacionados, tanto con la estructura del sistema como con la operación (o procedimiento) del mismo.

Los puntos relacionados con la estructura incluyen:

1. Selección de familias de partes y la agrupación de ellas.
2. Selección de máquinas y procesos así como la agrupación de éstos en células.
3. Selección de herramientas, dispositivos y tarimas.
4. Selección de equipo de manejo de material.
5. Elección de la distribución del equipo.

Los puntos relacionados a los procedimientos incluyen:

1. Detalle del diseño de los trabajos.
2. Organización de la supervisión y del personal de apoyo en la estructura celular.
3. Formulación del mantenimiento y políticas de inspección.
4. Diseño de procedimientos para la planeación de la producción, programación control y adquisición de paquetería y equipo.
5. Modificación del sistema de incentivos y de control de costos.
6. Perfiles de procedimientos para la interface con los sistemas restantes de la manufactura (en términos de flujo de trabajo e información, estando o no controladas por computadoras).

No es posible delinear una secuencia estricta de decisiones para realizarlas en conexión con el diseño celular. Uno puede, sin embargo, decir que las decisiones orientadas estructuralmente tienden a preceder a las orientadas al procedimiento. Aún más, la estructura del sistema y los procedimientos puede cambiarse de acuerdo con la experiencia desarrollada según la operación del sistema celular. Por ejemplo, la población de partes, el ruteo de los pedidos e incluso la población de máquinas esta sujeto a cambios durante la fase de implementación o después por las condiciones externas o internas cambiantes. Dentro del grupo de decisiones estructurales, la identificación de familias de partes y grupos de máquinas tienen un significado particular, toda vez que decisiones subsecuentes dependen de éstas selecciones.

4.1.2 Evaluación de las decisiones en el diseño de células

La evaluación de las decisiones del diseño pueden ser clasificadas como relacionadas con la estructura o con la operación del sistema. Consideraciones típicas relacionadas a la estructura del sistema incluyen:

1. Inversión en equipo y herramienta (bajo).
2. Reasignación de los costos del equipo (bajo).
3. Costo de manejo de materiales dentro de las celdas y entre una y otras celdas (bajo).
4. Requerimiento de espacio (bajo).
5. Generalización de que partes son terminadas en una célula (alto).
6. Flexibilidad (alta).

Las evaluaciones del diseño del sistema celular son incompletas y no totalmente comprensibles a menos que éstas se relacionen con la operación del sistema. Una cuantas variables del desempeño relacionadas con la operación del sistema son:

1. Utilización del equipo (alto).
2. Inventarios dentro del proceso (bajo).
3. Longitud de las colas en cada estación de trabajo (corto).
4. Retraso en el trabajo (bajo).

5. Tiempo de producción (bajo).

El mayor problema en todo el proceso de diseño de células, es la necesidad de balancear los objetivos relacionados con los parámetros estructurales y variables de desempeño. Por ejemplo, una mayor utilización de la maquinaria se puede lograr si varias células envían sus partes a través de la misma máquina. Las desventajas son el aumento de la cola y los problemas de control.

El costo y operación del sistema es afectado por cada decisión que esté relacionada con la estructura y operación del sistema. Por lo tanto, es necesario evaluar cada diseño importante y relacionar su desempeño contra criterios preestablecidos. Por ejemplo, variables estructurales tales como números de máquinas que deben estar balanceados contra las variables de operación tal como la utilización de la maquinaria y el tiempo de producción usando procedimientos analíticos y de simulación.

4.2 PROCEDIMIENTOS DE FORMACION DE CÉLULAS

Existen distintos métodos para la formación de células. Aquí cubriremos algunos de éstos.

4.2.1 Análisis del grupo máquina-componente

El análisis del grupo máquina-componente (AGMC) está basado en el análisis del flujo de producción (AFP). Los métodos basados en los grupos máquina-componente son formados permutando renglones y columnas en la tabla de una matriz binaria de ceros y unos.

4.2.2 Análisis del flujo de producción

El análisis de flujo de producción (AFP), es una técnica para analizar la secuencia de operación y la trayectoria de la parte a través de las estaciones de máquinas y trabajo en la planta. La lógica es que las partes con operaciones y rutas en común se agrupen e identifiquen como una familia de partes. De modo similar se agrupan las estaciones de máquinas y trabajo que se utilizan para producir las familias de partes a fin de formar el grupo o célula de máquina.

El AFP comprende cuatro pasos que se describen a continuación:

Paso 1: Clasificación de las máquinas. Las máquinas son clasificadas en base a las operaciones que pueden desarrollarse en ellas. Un número de cierto tipo de máquinas es asignado como máquinas capaces de ejecutar operaciones similares.

Paso 2: Revisión de la lista de partes y de la información de producción. Para cada parte, la información de las operaciones a ser realizadas y las máquinas requeridas para hacerlo deben ser revisadas completamente.

Paso 3: Análisis del Flujo en la Fábrica. Esto requiere una examinación a microniveles del flujo de los componentes a través de las máquinas. Esto a su vez permite que el problema sea descompuesto en un número de máquinas - grupo de partes.

Paso 4: Análisis de Grupo de máquina-componente. Un método manual irintuitivo se propone para manipular la matriz para formar células. Sin embargo, a medida que el problema se hace más grande los procedimientos manuales no funcionan bien. Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar procedimientos analíticos para manejar sistemáticamente sistemas grandes.

Ejemplo: considere el problema de fabricación de 6 partes, 4 máquinas de la tabla 4.1. Modifique la matriz cambiando renglones y columnas para formar las células. El 1 representa que la parte tiene que ser hecha por la máquina marcada. Espacio vacío significa que no se hace la operación.

TABLA 4.1 Datos para el análisis de producción Parte-Máquina

Máquinas	Componentes					
	1	2	3	4	5	6
M1		1		1		1
M2		1		1		1
M3	1		1		1	
M4	1		1		1	

La solución obtenida al mover renglones y columnas indica formar dos grupos. El grupo 1 = familia 1 = partes 2, 4, 6; grupo 2 = familia 2 = partes 1, 3, 5. (Ver tabla 4.2).

Tabla 4.2 Células formadas después de manipular la matriz usando PFA

Máquinas	Componentes					
	2	4	6	1	3	5
M1	1	1	1			
M2	1	1	1			
M3				1	1	1
M4				1	1	1

Observe que para usar eficazmente este método, es necesario asegurarse de que la empresa tiene una fuente confiable de datos de trayectoria o de hojas de operación. Una de las ventajas de éste método es que las familias de partes se pueden integrar con un sistema de clasificación y codificación o sin él, puesto que se forman usando los datos de operación u hojas de ruta o trayectoria.

4.2.3 Algoritmo de Ordenamiento por categorías (AOC)

Es un algoritmo sencillo desarrollado por King en 1980, para formar grupos de máquinas-componentes y está basado en el ordenamiento de los renglones y columnas de la matriz de componentes y máquinas. El algoritmo es el siguiente:

1.- Asigne un peso binario y calcule el peso decimal para cada renglón y columna usando las fórmulas:

$$\text{peso decimal por renglón } i = \sum_{p=1}^m b_{ip} 2^{(m-p)}$$

donde m, es el número progresivo de renglones.

$$\text{peso decimal por columna } j = \sum_{p=1}^n b_{jp} 2^{(n-p)}$$

donde n, es el número progresivo de columnas.

2.- Ordene los renglones en orden decreciente (de mayor a menor) considerando los valores del peso decimal.

3.- Repita el paso 1 y 2 por cada columna.

4.- Continúe con el procedimiento de los pasos hasta que no haya cambios en la posición de cada elemento en cada renglón y columna.

Ejemplo del uso del algoritmo AOC: considere que se manufacturan 10 componentes y cada uno de ellos tiene los requerimientos de producción presentados en la tabla 4.3. Utilice el algoritmo AOC para formar células de máquinas.

Tabla 4.3 Matriz Máquina-Componente

Máquina	Componente									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M1	1	1	1	1	1		1	1	1	1
M2		1	1	1					1	1
M3	1				1	1	1			
M4		1	1	1				1	1	1
M5	1	1	1	1	1	1	1	1		

Solución:

Paso 1: Para cada renglón de la matriz máquina-componente, asigne un peso binario y calcule su equivalente decimal como se muestra en la matriz de la tabla 4.4

Tabla 4.4 Equivalentes decimales para cada renglón

Matriz Máquina-Componente											Equivalente Decimal
Componente											
Máquina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
M1	2 ⁹	2 ⁸	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	1007
M2		1	1	1					1	1	451
M3	1				1	1	1				568
M4		1	1	1				1	1	1	455
M5	1	1	1	1	1	1	1	1			1020

Paso 2: Ordene los renglones, según su peso decimal, en orden decreciente. El resultados se presenta en la tabla 4.5

Tabla 4.5 Arreglo en orden decreciente de los renglones según su equivalente decimal

Matriz Máquina-Componente											Equivalente Decimal
Componente											
Máquina	2 ⁹	2 ⁸	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	
M5 2 ⁴	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1020
M1 2 ³	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1007
M3 2 ²	1				1	1	1				568
M4 2 ¹		1	1	1				1	1	1	455
M2 2 ⁰		1	1	1					1	1	451
Equiv. Decimal	28	27	27	27	28	20	28	26	11	11	

Paso 3: Repita los pasos 2 y 3 para las columnas. Los resultados se presentan en la tabla 4.6

Tabla 4.6 Solución usando el algoritmo AOC

Matriz Máquina-Componente											Equivalente Decimal
Componente											
Máquina	2 ⁹	2 ⁸	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	
M5 2 ⁴	1	5	7	2	3	4	8	6	9	10	1020
M1 2 ³	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1019
M3 2 ²	1	1	1					1			900
M4 2 ¹				1	1	1	1		1	1	123
M2 2 ⁰				1	1	1			1	1	115
Equiv. Decimal	28	28	28	27	27	27	26	20	11	11	

Paso 4: Si no hay cambios en las posiciones de renglones y columnas, el procedimiento termina.

De la diagonal de bloques de la matriz mostrada en la tabla 4.6, hay algunas formas posibles de identificar el número de familias de partes y grupos de máquinas. Una de estas soluciones está dada en la tabla 4.6, resultando 3 células. Otras soluciones pueden resultar en 2 o más células. La pregunta es ¿cuál configuración celular es la mejor?. La selección de la mejor configuración depende tanto del usuario del algoritmo como de factores de tipo de partes, tipo de máquinas y del esfuerzo del manejo de material intra e intercelular, en la sección 4.4 de este trabajo se presentan algunos procedimientos para contestar a esta pregunta.

4.2.4 Análisis de Agrupamiento por enlaces sencillos (AES)

McAuley usó el método de agrupamiento de máquinas jerárquico, conocido como método de análisis de agrupamiento por enlace sencillo (AES) calculando coeficientes de similitud entre máquinas. AES fue originalmente desarrollado por Snealt. El procedimiento consiste en construir un árbol llamado Dendograma. El coeficiente de Similitud entre 2 máquinas está definido como el cociente de las partes que visitan ambas máquinas y el número de partes que visitan una de las dos máquinas, simbólicamente:

$$S_{ij} = \frac{\sum X_{ijk}}{\sum (Y_{ik} + Z_{jk} - X_{ijk})}$$

donde:

X_{ijk} = operación en la parte k realizada en las máquinas i y j.

Y_{ik} = operación en la parte k realizada en la máquina i.

Z_{jk} = operaciones en la parte k realizada en la máquina j.

S_{ij} = coeficiente de similitud entre máquina i y máquina j.

Algoritmo de agrupamiento por enlaces sencillos

Este algoritmo ayuda en la construcción de dendogramas. Esencialmente, un dendograma es una representación pictórica de límites de similitud entre máquinas, medido por el coeficiente de similitud, para presentar los agrupamientos resultantes. Las ramas representan máquinas en las células de máquinas y las líneas horizontales que conectan a las ramas representan el valor mínimo con los cuales las células son formadas. Los pasos del algoritmo son los siguientes:

1. Calcule los coeficientes de similitud para todas las posibles parejas de máquinas.
2. Seleccione las dos máquinas con el coeficiente de similitud más alto.

- Baje el valor del coeficiente de similitud y forme una nueva célula de máquinas, incluyendo todas las máquinas con coeficiente de similitud no menor que el valor límite mínimo.
- Continúe con el paso 3 hasta que todas las máquinas estén agrupadas dentro de una célula sencilla.

Ejemplo del Algoritmo AES

Considérese la matriz de 5 máquinas y 10 componentes dados en la tabla 4.7 para formar células de máquinas usando el algoritmo AES.

Tabla 4.7 Matriz Máquina-Componente

Maquinas	Componentes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M1	1	1	1	1	1		1	1	1	1
M2		1	1	1					1	1
M3	1				1	1	1			
M4		1	1	1				1	1	1
M5	1	1	1	1	1	1	1	1		

Solución:

- Determine los coeficientes de similitud entre todas las parejas de máquinas. El coeficiente de similitud entre la máquina 1 y máquina 2 está determinado por:

$$SC_{12} = \frac{5}{(9 + 5 - 5)} = 0.556$$

en forma similar los demás coeficientes son calculados y están dados en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Coeficientes de similitud del problema

Parejas de Máquinas	M1 M2	M1 M3	M1 M4	M1 M5	M2 M3	M2 M4	M2 M5	M3 M4	M3 M5	M4 M5
Coefficiente de Similitud	0.55	0.3	0.67	0.7	0	0.83	0.3	0	0.5	0.4

- Se seleccionan las máquinas M2 y M4, ya que tienen el coeficiente de similitud más alto que es de 0.83, para formar la primera célula.
- El siguiente coeficiente más alto pero menor al anterior, está entre las máquinas M1 y M5. Use ese coeficiente para formar la segunda célula. ($S_{15} = 0.70$). (se han seleccionado M2, M4, M1 y M5)

4. El siguiente coeficiente de similitud más alto pero menor al anterior es ahora 0.67 entre las máquinas M1 y M4. Este es el valor límite para la máquinas M1, M2, M4 y M5 que formarán un grupo de máquinas. El siguiente coeficiente de similitud es el que tiene el valor de 0.55 entre las máquinas M1 y M2, el cual está dominado por el coeficiente de similitud de 0.67 (ver la figura 4.1). El siguiente coeficiente es el de valor 0.50 entre las máquinas M3 y M5, por lo cual todas las máquinas corresponden a una célula.

La construcción del Dendograma de la figura 4.1 utiliza los coeficientes de similitud dados en la tabla 4.8. Las células pueden ser identificadas a diferentes valores límites por el dibujo de una línea horizontal, por ejemplo, cuatro células { (M2,M4), (M5), (M1), (M3) } serán formadas por el valor límite de 0.80, mientras que solo una célula es formada por el valor límite 0.40.

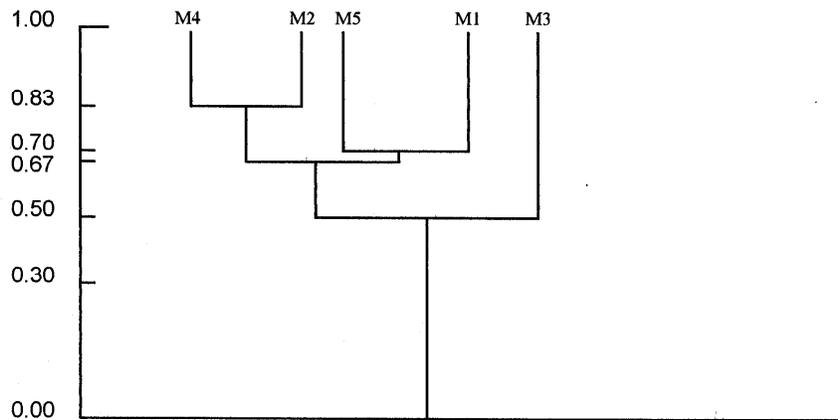


Figura 4.1

4.3 PARTES EXCEPCIONALES Y MÁQUINAS CUELLO DE BOTELLA

La creación de las células de máquinas mutuamente independientes, sin movimiento intercelular (entre una célula y otra), es uno de los objetivos importantes del diseño de células. Sin embargo, no siempre puede ser económico o práctico el obtener células mutuamente independientes. En la práctica algunas partes necesitan ser procesadas en más de una célula, a éstas se les conoce como *partes excepcionales* y a las máquinas que las procesan se conocen como *máquinas cuello de botella*.

Las máquinas cuello de botella son el origen del movimiento intercelular que puede ser eliminado por la duplicación de un número suficiente de máquinas cuello de botella en las células apropiadas. La decisión de duplicar máquinas deberá ser evaluado contra los ahorros a largo plazo que resulten de la reducción de costos por manejos de materiales intercelulares.

El problema de los elementos excepcionales puede posiblemente ser eliminado por:

- La generación de planes alternativos de procesos
- La duplicación de máquinas.
- La subcontratación de operaciones.

4.4 EVALUACION DEL DISEÑO DE CELULAS

Observamos del dendograma que cuatro, tres, dos y una células son formadas con coeficientes de similitud de 0.83, 0.70, 0.67 y 0.55, respectivamente. También 5 células serán formadas si cada máquina es tratada como una célula independiente resultante en un coeficiente de similitud de uno. Estas configuraciones de células son mostradas en la tabla 4.9. Ahora la pregunta es, ¿cuál configuración de célula es la mejor? y ¿cuáles son los factores que influyen para esta decisión?.

Coeficiente de Similitud	Configuración de Células
1	(M1), (M2), (M3), (M4), (M5)
0.83	(M4, M2), (M5), (M1), (M3)
0.7	(M4, M2), (M5, M1), (M3)
0.67	(M4, M2, M5, M1), (M3)
0.5	(M1, M2, M3, M4, M5)

Tabla 4.9. Configuración de células alternativas

Un número de criterios pueden ser usados para decidir sobre la configuración óptima de células. Sin embargo, para elegir un diseño de célula de un grupo de alternativas, un criterio de minimización del costo total del manejo de material de intercélulas (entre una célula y otra) e intracélulas (dentro de las células), para movimientos de partes es particularmente relevante si las partes tienen un número de operaciones que se requieren realizar en un número de máquinas. Sin embargo, los siguientes factores influyen en los costos de estos movimientos de inter e intracelular:

1. La distribución de las máquinas dentro de un grupo.
2. La distribución de los grupos de máquinas.
3. La secuencia de partes a través de las máquinas y entre los grupos de máquinas

La distancia total recorrida por un componente visitando a un número de máquinas en una célula tiene que ser determinado. Expresiones analíticas para la distancia total esperada puede ser determinada si las máquinas en una célula están distribuidas en; (1) una línea recta, (2) rectangular, o (3) un cuadrado.

Las siguientes suposiciones están hechas para calcular las distancias esperadas:

1. En la ausencia de datos reales sobre la secuencia en la cual los componentes visitan las máquinas, estas asumen que las máquinas son distribuidas en una manera aleatoria.
2. Hay una unidad de distancia entre cada máquina en un grupo de N máquinas.
3. Una parte tiene que visitar dos máquinas en un grupo de N máquinas.

La distancia recorrida en la que una parte se mueve entre dos máquinas en una célula que tenga un grupo de N máquinas puede ser expresado como sigue:

$$\text{Distancia esperada para una distribución de línea recta} = \frac{(N+1)}{3}$$

$$\text{La distancia esperada para una distribución rectangular con M renglones de L máquinas} \\ = \frac{(M+L)}{3}$$

$$\text{Distancia esperada para una distribución cuadrada} = 2 \left(\frac{(N)^{1/2}}{3} \right)$$

La distancia total de movimiento en la j-ésima célula para la i-ésima configuración = $\sum d_{ij} K_{ij}$.

donde: d_{ij} = la distancia esperada de movimiento entre 2 máquinas para la i-ésima configuración en la j-ésima célula.

K_{ij} = numero de movimientos entre 2 máquinas por todas las partes para i-ésima configuración en la j-ésima célula.

El costo total inter e intracelular (TC), para la i-ésima configuración:

$$TC_i = C_1 N_i + C_2 \sum d_{ijkij}$$

donde: C_1 = Costo del movimiento intercélula.
 C_2 = Costo por unidad de distancia de un movimiento intracelular.
 N_i = número de movimientos intercelulares para la i-ésima configuración.

La mejor configuración i está dada por el mínimo de TC_i para todas las i.

Para aclarar los procedimientos se ilustran los cálculos para la configuración de 1, 2 y 3 células con el fin de ver el procedimiento de la evaluación del costo de manejo de material inter e intracelular.

Ejemplo:

Considere la matriz máquina-componente usada en el algoritmo de agrupamiento por enlaces sencillos (AES) para evaluar cada una de sus configuraciones y ver cuál es la que

nos ofrece un menor costo. Suponga que el costo del movimiento intercelular (C1) es \$2.00 y el costo por unidad de distancia del movimiento intracelular (C2) es \$1.00

Tabla 4.10 Matriz Máquina-Componente

Máquina	Componente									
	2 ⁹	2 ⁸	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰
Máquina	1	5	7	2	3	4	8	6	9	10
M5 2 ⁴	1	1	1	1	1	1	1	1		
M1 2 ³	1	1	1	1	1	1	1		1	1
M3 2 ²	1	1	1					1		
M4 2 ¹				1	1	1	1		1	1
M2 2 ⁰				1	1	1			1	1

Movimiento intercelular = 10

$$\text{Movimiento intracelular} = 7\left(\frac{2+1}{3}\right) + 0 + 5\left(\frac{2+1}{3}\right) = 12$$

En la célula formada por las máquinas (M4, M2) hay 5 movimientos puesto que las partes 2, 3, y 4 aunque no forman parte de la célula son procesadas en ella.

$$TC_3 = 2(10) + 1(12) = 32$$

Configuración de 2 células

Tabla 4.11. Configuración de 2 células.

Máquina	Matriz Máquina-Componente									
	Componente									
	2	3	4	9	10	8	5	7	1	6
M1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M2	1	1	1	1	1					
M4	1	1	1	1	1	1				
M5	1	1	1			1	1	1	1	1
M2							1	1	1	1

Movimiento intercelular = 4, ya que las partes 5, 7 1 y 6 se mueven de la célula formada por las máquinas (M1, M2, M4 y M5) a la célula formada por (M3).

$$\text{Movimiento intracelular} = 18 \left(\frac{4+1}{3}\right) + 0 = 30$$

Dentro de la célula compuesta por las máquinas (M1, M2, M4 y M5) se observa que existen 15 movimientos dentro de ella que multiplicados por la distancia unitaria obtenida a través de la fórmula propuesta por Singh en una distribución en línea recta $\left(\frac{N+1}{3}\right)$ tenemos que la distancia total como ya se dijo antes es de 30. Ahora el número de movimientos intracelulares en la célula formada por la máquina (M3) es 0 debido a que las partes que ahí

se procesan visitan sólo una máquina por lo que no hay distancia recorrida por las partes que forman esta célula.

El costo total de esta configuración es:

$$TC_2 = 2(4) + 1(30) = 38$$

Configuración de una célula

Tabla 4.12. Configuración de 1 célula.

Matriz Máquina-Componente										
	Componente									
Máquina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M1	1	1	1	1	1		1	1	1	1
M2		1	1	1					1	1
M3	1				1	1	1			
M4		1	1	1				1	1	1
M5	1	1	1	1	1	1	1	1		

Independientemente del arreglo de máquinas y partes, el costo de manejo de material inter e intracelular queda:

Movimiento intercelular = 0, puesto que sólo hay más que una célula.

Movimiento intracelular = $22 \left(\frac{5 + 1}{3} \right) = 44$

El costo total:

$$TC_1 = 2(0) + 1(44) = 44$$

Resumiendo tenemos que:

Configuración	No. de movimientos intercelulares	No. de movimientos intracelulares	Costo total de manejo de material
1 célula (M1, M2, M3, M4, M5)	0	44	$2(0) + 1(44) = 44$
2 células (M1, M2, M4, M5), (M3)	4	30	$2(4) + 1(30) = 38$
3 células (M4, M2), (M5, M1), (M3)	10	12	$2(10) + 1(12) = 32$
4 células (M2, M4), (M5), (M1), (M3)	17	5	$2(17) + 1(5) = 39$
5 células (M1), (M2), (M3), (M4), (M5)	22	0	$2(22) + 1(0) = 44$

Tabla 4.13

En este procedimiento, la distribución de la célula y el coste del manejo de material inter e intracelular se supone que son conocidos. Sin embargo, puede haber situaciones en

las cuales tal información no está disponible. A continuación se presenta un procedimiento de evaluación para la configuración de la célula que no requiere toda esa información

4.4.1 Un procedimiento alternativo para la evaluación de la bondad de soluciones heurísticas

Los algoritmos heurísticos usados para la formación de familias de partes y células de máquinas esencialmente tratan de reacomodar los renglones y las columnas de la matriz para obtener una forma de diagonal de bloques. La situación ideal es tener todos los unos en la diagonal de bloques y los ceros fuera de ella. Sin embargo, la forma de la diagonal de bloques esta usualmente lejos de la forma ideal, debido a las propiedades de los datos, lo inadecuado de el algoritmo, o ambos. Por lo tanto esto es importante tener alguna medida de la bondad de la solución obtenida por algún algoritmo. En la sección anterior se presentó una evaluación de la configuración de células basada en los costos de manejo de materiales inter e intracelular. Ese procedimiento depende de la distribución supuesta de las máquinas en la célula y la estimación de costos.

Kumar y Chandrasekharan (1990) han desarrollado un criterio cuantitativo alternativo para la evaluación de la bondad de la forma de la diagonal de bloques de matrices binarias, llamado *eficacia de grupo*. Esta medida es particularmente útil en la ausencia de información sobre las distribuciones físicas de máquinas en la célula y el costo de manejo de material inter e intracelular. La eficacia de grupo (Γ) es definida como:

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

Donde: $\psi = \frac{\text{número de elementos excepcionales}}{\text{número total de operaciones}}$

$\phi = \frac{\text{número de vacíos en la célula}}{\text{número total de operaciones}}$

Un análisis de la función de la eficacia de grupo (Kumar y chadrasekharan, 1990) revela lo siguiente:

- Un incremento en los movimientos intercelulares o vacíos o ambos conducirán a la reducción en la eficacia de grupo.
- El cambio en el número de elementos excepcionales tiene más influencia que el cambio en el número de vacíos en la diagonal de bloques.

En eficiencias menores los vacíos en la diagonal de bloques se hacen menos significantes. Es importante mencionar que la eficacia de grupo puede resultar en una configuración de

células diferentes que la propuesta por el modelo de costos.

Ejemplo del método de evaluación de la bondad de la solución de Kumar y Chandrasekharan:

Considere los datos de la tabla 4.3 componente-máquina, en el que se tienen 10 componentes y 5 tipos distintos de máquinas que se reproduce como sigue:

Tabla 4.3 Matriz Máquina-Componente

Máquina	Componente									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
M1	1	1	1	1	1		1	1	1	1
M2		1	1	1					1	1
M3	1				1	1	1			
M4		1	1	1				1	1	1
M5	1	1	1	1	1	1	1	1		

A continuación considere las 3 soluciones con las configuraciones de 2, 3 y 4 células obtenidas usando el algoritmo AES y presentadas en la tabla 4.13 y repetida a continuación:

Configuración	No. de movimientos intercelulares	No. de movimientos intracelulares	Costo total de manejo de material
1 célula (M1, M2, M3, M4, M5)	0	44	$2(0) + 1(44) = 44$
2 células (M1, M2, M4, M5), (M3)	4	30	$2(4) + 1(30) = 38$
3 células (M4, M2), (M5, M1), (M3)	10	12	$2(10) + 1(12) = 32$
4 células (M2, M4), (M5), (M1), (M3)	17	5	$2(17) + 1(5) = 39$
5 células (M1), (M2), (M3), (M4), (M5)	22	0	$2(22) + 1(0) = 44$

Tabla 4.13

a) Evalúe el diseño de una configuración de 3 células (solución obtenida del algoritmo AOC, tabla 4.6)

Máquina	Componente									
	2 ⁹	2 ⁸	2 ⁷	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰
M5 2 ⁴	1	1	1	1	1	1	1	1		
M1 2 ³	1	1	1	1	1	1	1		1	1
M3 2 ²	1	1	1					1		
M4 2 ¹				1	1	1	1		1	1
M2 2 ⁰				1	1	1			1	1

No. total de operaciones = 32
 No. de elementos excepcionales = 13
 (9M1, 10M1, 6M5, 2M2, 3M2, 4M2, 2M4, 3M4, 4M4, 8M4, 1M3, 5M3, 7M3)
 No. de elementos vacíos en la diagonal = 0

$$\Gamma = \frac{(1 - \psi)}{(1 + \phi)} = \frac{1 - 13/32}{1 - 0/32} = 0.59375$$

Para el caso de la configuración de 4 células obtenemos lo siguiente:

Tabla 4.14 Configuración con 4 células.

Matriz Máquina-Componente										
Componente										
Máquina	2	3	4	9	10	8	1	5	7	6
M2	1	1	1	1	1					
M4	1	1	1	1	1	1				
M5	1	1	1			1	1	1	1	1
M1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M3							1	1	1	1

$$\Gamma = \frac{(1 - \psi)}{(1 + \phi)} = \frac{1 - 17/32}{1 + 0/32} = 0.46875$$

Haciendo lo mismo para la configuración de 2 células se obtiene lo siguiente:

Tabla 4.15 Configuración con 2 células.

Matriz Máquina-Componente										
Componente										
Máquina	2	3	4	9	10	8	5	7	1	6
M1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
M2	1	1	1	1	1					
M4	1	1	1	1	1	1				
M5	1	1	1			1	1	1	1	1
M3							1	1	1	1

$$\Gamma = \frac{(1 - \psi)}{(1 + \phi)} = \frac{1 - 7/32}{1 + 3/32} = 0.714$$

Tabla 4.16 Resumen de los resultados de la eficacia de grupos.

No. de células	No. de elementos excepcionales	No. de elementos vacíos	Eficacia de grupo (Γ)
2	7	3	0.714
3	13	0	0.59375
4	17	0	0.46875

4.5 MODELOS DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

En las secciones anteriores, discutimos algunos métodos heurísticos para formar familias de partes y grupos de máquinas. En esos procedimientos se supuso que cada parte fue producida usando un plan definido de procesamiento. También se supuso que si una máquina fue asignada a una célula, existiría capacidad suficiente disponible en cada célula para procesar todas las partes asignadas a las células. Además, la duplicación de algunas máquinas fue considerada como una máquina. Aspectos de manufactura tales como la demanda y el costo de procesamiento no son considerados en estos procedimientos de una manera explícita.

En esta sección se describe el diseño de nuevas células para las partes a ser producidas usando programación matemática. De esta manera, el objetivo será identificar las familias de partes y grupos de máquinas seleccionando el plan de procesamiento apropiado para cada parte y tipo de máquina, a la par que se minimiza la inversión total en las máquinas. Para esto, existen dos formas de llevarlo a cabo:

1. Partiendo de la existencia de familias de partes, se forman las células asignando máquinas a las familias de partes.
2. Formando simultáneamente las células, las familias de partes y los grupos de máquinas.

El primer procedimiento es conocido como procedimiento secuencial y el segundo como procedimiento simultáneo. Los dos procedimientos mencionados se pueden realizar usando programación matemática como técnica de modelaje. Este estudio considerará exclusivamente el procedimiento secuencial, según el trabajo publicado por Rajamin, Sing y Aneja (1990). Tenga en cuenta durante el desarrollo que: **1.** Si se tiene un solo plan de procesamiento para cada parte, la posibilidad de formar células mutuamente excluyentes está limitado sin la duplicación de máquinas; **2.** La duplicación de máquinas, obviamente requiere de inversión adicional; **3.** La existencia de planes alternativos de procesamiento de las partes no garantiza la formación de células mutuamente excluyentes. Por lo tanto, si permitimos planes de procesamiento alternativos para una misma parte y asignamos máquinas durante la etapa de formación de células, puede ser posible seleccionar planes de procesamiento que no incurran en una inversión adicional, conduciendo a una reducción en el costo del manejo de material intercelular.

A continuación se ilustra el uso de la programación lineal entera para el desarrollo de un modelo de formación de células para el procedimiento secuencial. Para el procedimiento simultáneo es posible hacer lo mismo, definiendo adecuadamente el objetivo y las restricciones (Singh, Systems approach to computer integrated design and manufacturing, John Wiley, 1996).

4.5.1 Desarrollo de un modelo de diseño de células bajo el procedimiento secuencial usando programación lineal entera

Suponga que mediante la utilización de un sistema de clasificación y codificación, el total de K partes ($k = 1, 2, \dots, K$), se agruparon para formar F familias de partes ($f = 1, 2, \dots, F$). El objetivo es formar las células de manufactura que minimice los costos de inversión de las m máquinas disponibles ($m = 1, 2, \dots, M$), considerando que existe un costo de compra por máquina m dado por C_m , expresado en \$/máquina, así como costos de procesamiento de cada operación por máquina según la parte y plan de procesamiento empleado (C_{mskp}), expresado en \$/operación/parte/máquina. Cada máquina m tiene una capacidad disponible de manufactura b_m expresado en unidades de tiempo/máquina.

La parte k requiere que se le realicen S_k operaciones ($s = 1, 2, \dots, S_k$) usando el plan de procesamiento p ($p = 1, 2, \dots, P_k$) de la parte k. El plan de procesamiento seleccionado se ejecuta totalmente, el ejecutarse en forma parcial y después continuar con otro, equivale a decir que no se hizo un listado total de los posibles planes de procesamiento. Con base a esta información el modelo es el siguiente:

OBJETIVO: Minimizar la inversión en equipo:
si definimos como:

$$C_m = \text{Costo por máquina tipo m (\$/ máquina)}$$

$$Z_{mf} = \text{Total de máquinas m usadas para la familia f (No. de máquinas/familia)}$$

entonces: $C_m Z_{mf}$ = Costo total por el equipo m para la familia f (\$ / familia)
y $\sum_m^M \sum_f^F C_m Z_{mf} = C_1 (Z_{11} + Z_{12} + \dots + Z_{1f}) + \dots + C_M (Z_{M1} + Z_{M2} + \dots + Z_{Mf})$
representa la inversión total en equipo

Objetivo: $\text{Min } f = \sum_m^M \sum_f^F C_m Z_{mf}$	EC1
--	-----

Restricción1: Se ha puesto como condición que cada parte se debe de hacer en un solo plan de procesamiento, es necesario definir un indicador que cumpla con esto como:

$$Y_{kp} = \begin{cases} 1 & \text{Si la parte k se hace con el plan de procesamieneto p} \\ 0 & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

La restricción 1 se cumple con la ecuación siguiente:

$\sum_p^P Y_{kp} = 1, \quad k=1, 2, \dots, K$	EC 2
---	------

Restricción2. Se autoriza la utilización de una máquina por operación, definamos, Considerando las restricciones del proceso como:

$$\alpha_{mskp} = \begin{cases} 1 & \text{Cuando las condiciones tecnológicas permiten que la operación } s \text{ se} \\ & \text{pueda hacer en la máquina } m \text{ para la combinación } kp \\ 0 & \text{Cuando no se permita} \end{cases}$$

Considerando la selección o no de cierta operación para hacerse en alguna máquina, es necesario definir la variable X_{mskp} que representa

$$X_{mskp} = \begin{cases} 1 & \text{Cuando la máquina } m \text{ es seleccionada para hacer la operación } s \\ & \text{para la combinación } kp. \\ 0 & \text{Cuando no se haga la selección} \end{cases}$$

$\sum_m^M \alpha_{mskp} X_{mskp}$ = la relación de las posibles máquinas a seleccionar considerándose tanto los aspectos de operaciones como de partes y planes. Sólo se selecciona una de ellas. Por otra parte para asegurarse que el plan aquí seleccionado sea el que corresponda de acuerdo a la restricción 1, se definirá:

$$a_{skp} = \begin{cases} 1 & \text{Si la operación } s \text{ puede ser realizada con la combinación } kp \\ 0 & \text{Cuando no se pueda.} \end{cases}$$

combinando el coeficiente mencionado con la variable de selección de un solo plan por parte (Y_{kp}) se tiene que $a_{skp} Y_{kp}$ representa la selección permitida por lo tanto la restricción 2 equivale a:

$\sum_m^M \alpha_{mskp} X_{mskp} = a_{skp} Y_{kp}$ que expresada de una manera típica de programación lineal equivale a:

$\sum_m^M \alpha_{mskp} X_{mskp} - a_{skp} Y_{kp} = 0, \quad \begin{matrix} s = 1, 2, \dots, S \\ k = 1, 2, \dots, K \\ p = 1, 2, \dots, P \end{matrix}$	EC3
--	-----

Restricción 3. La producción programada debe cumplir con la capacidad de las máquinas:
Partiendo del hecho de que:

El tiempo de procesamiento para las operaciones hechas por familia en la máquina m, Capacidad disponible en el grupo de máquinas tipo m

definamos la notación siguiente:

t_{mskp} = Tiempo unitario de procesamiento cuando la operación s de la parte k se hace en la máquina m según el plan de procesamiento p.
 d_k = Demanda de la parte k

$\beta_{kf} \begin{cases} 1 & \text{Si la parte } k \text{ es miembro de la familia } f \\ 0 & \text{De no ser así} \end{cases}$

considerando que esto dependerá de si se selecciona X_{mskp} , entonces

$(\beta_{kf} d_k) t_{mskp} X_{mskp}$ = Tiempo total requerido para producir la operación s en la máquina m de la combinación kp de la familia f y como dicho tiempo asignado no se puede pasar de lo que se tenga disponible (b_k).

tiempo disponible = Capacidad de máquina x No. de máquinas por familia
 $= b_k Z_{mf}$

Por lo tanto la ecuación para la restricción 3 es: $\sum_{k,p,s} (\beta_{kf} d_k) t_{mskp} X_{mskp} \leq b_k Z_{mf}$
 para todas las máquinas y todas las familias, formalmente esto es igual a:

$$\sum_{k,p,s} (\beta_{kf} d_k) t_{mskp} X_{mskp} - b_k Z_{mf} \leq 0$$

$m = 1, 2, \dots, M$
 $f = 1, 2, \dots, F$

EC4

Restricción 4. La programación no debe gastar más del dinero programado para su operación.

El gasto total operativo \leq Dinero disponible para los gastos de operación

B = Dinero disponible para los gastos de operación

El gasto total operativo = Costo por operación de acuerdo a lo seleccionado
 $= C_{mskp} X_{mskp}$

Por lo tanto la restricción es: $\sum_{k,p,m,s} d_k C_{mskp} X_{mskp} \leq B$

$$\sum_{k,p,m,s} d_k C_{mskp} X_{mskp} \leq B$$

EC 5

resumiendo, el modelo es:

$$\text{Min } f = \sum_m^M \sum_f^F C_m Z_{mf}$$

s. a.

$$\sum_p^P Y_{kp} = 1, \quad k=1, 2, \dots, K$$

$$\sum_m^M a_{mskp} X_{mskp} - a_{skp} Y_{kp} = 0, \quad s = 1, 2, \dots, S; k = 1, 2, \dots, K; p = 1, 2, \dots, P$$

$$\sum_{k,p,s} (\beta_{kf} d_k) t_{mskp} X_{mskp} - b_k Z_{mf} \leq 0, \quad m = 1, 2, \dots, M; f = 1, 2, \dots, F$$

$$\sum_{k,p,m,s} d_k C_{mskp} X_{mskp} \leq B$$

Y_{kp}, X_{mskp} , Variables binarias enteras

$Z_{mf} \geq 0$ y entera

EJEMPLO:

Considere 4 tipos de partes, usando un sistema de clasificación y codificación, las primeras 2 partes han sido agrupadas dentro de la primera familia de partes y la tercera y cuarta parte quedan dentro de la segunda familia de parte. Las partes pueden ser procesadas en tres tipos de máquinas. Los planes alternativos de procesos han sido desarrollados para todas las partes, los costos de compra por los tres tipos de máquina son \$100, \$200 y \$300, respectivamente, el presupuesto de operación es de \$350. El costo unitario de proceso y los datos de tiempo unitario de proceso son dados en la tabla 4.17.

Determinar la configuración celular y el número de máquinas de cada tipo usando el modelo para minimizar el costo total de inversión en máquinas.

Solución:

Las variables son definidas como se da en el modelo.

Función Objetivo:

$$\text{Min } f = \sum_m^M \sum_f^F C_m Z_{fm}$$

La función objetivo en relación de los datos del problema dados en la tabla 4.17 la expresión queda como sigue:

$$\text{Min } f = 100Z_{11} + 100Z_{12} + 250Z_{21} + 250Z_{22} + 300Z_{31} + 300Z_{32}$$

Sujeta a:

Restricción 1, escoger solo un plan para cada parte.

$$\sum_p^P Y_{kp} = 1, \quad k=1, 2, \dots, K$$

lo anterior expresado en términos del ejemplo queda como sigue:

$$\begin{aligned} Y_{11} + Y_{12} &= 1 \\ Y_{21} + Y_{22} &= 1 \\ Y_{31} + Y_{32} + Y_{33} &= 1 \\ Y_{41} + Y_{41} &= 1 \end{aligned}$$

La restricción 2, nos asegura que solo una máquina es elegida.

$$\sum_m^M \alpha_{mskp} X_{mskp} - a_{skp} Y_{kp} = 0, \quad s = 1, 2, \dots, S; k = 1, 2, \dots, K; p = 1, 2, \dots, P$$

En base a los datos de la tabla esto queda como:

$$\begin{array}{lll} X_{1111} + X_{3111} - Y_{11} = 0 & X_{2212} + X_{3212} - Y_{12} = 0 & X_{2242} + X_{3242} - Y_{42} = 0 \\ X_{1121} + X_{3121} - Y_{21} = 0 & X_{2221} + X_{3221} - Y_{21} = 0 & X_{1312} + X_{2312} - Y_{12} = 0 \\ X_{1131} + X_{3131} - Y_{31} = 0 & X_{2222} + X_{3222} - Y_{22} = 0 & X_{1321} + X_{2321} - Y_{21} = 0 \\ X_{1133} + X_{3133} - Y_{33} = 0 & X_{2231} + X_{3231} - Y_{31} = 0 & X_{1322} + X_{2322} - Y_{22} = 0 \\ X_{1141} + X_{3141} - Y_{41} = 0 & X_{2232} + X_{3232} - Y_{32} = 0 & X_{1332} + X_{2332} - Y_{32} = 0 \\ X_{1142} + X_{3142} - Y_{42} = 0 & X_{2233} + X_{3233} - Y_{33} = 0 & X_{1333} + X_{2333} - Y_{33} = 0 \\ X_{2211} + X_{3211} - Y_{11} = 0 & X_{2241} + X_{3241} - Y_{41} = 0 & X_{1341} + X_{2341} - Y_{41} = 0 \end{array}$$

La restricción 3 nos asegura que la capacidad de cada tipo de máquina no ha sido violada.

$$\sum_{k,p,s} (\beta_{kf} d_k) t_{mskp} X_{mskp} - b_k Z_{mf} \leq 0, \quad m = 1, 2, \dots, M; f = 1, 2, \dots, F$$

$$50X_{1111} + 30X_{1121} + 80X_{1312} + 100X_{3121} + 60X_{1322} - 100Z_{11} \leq 0$$

$$30X_{2211} + 90X_{2212} + 70X_{2221} + 30X_{2222} + 70X_{2312} + 80X_{2321} + 60X_{2322} - 100Z_{21} \leq 0$$

$$70X_{3111} + 40X_{3121} + 40X_{3211} + 70X_{3212} + 70X_{3221} + 20X_{3222} - 100Z_{31} \leq 0$$

$$20X_{1131} + 80X_{1133} + 10X_{1141} + 90X_{1142} + 110X_{1332} + 70X_{1333} + 30X_{1341} - 100Z_{12} \leq 0$$

$$30X_{2231} + 10X_{2232} + 50X_{2233} + 20X_{2241} + 90X_{2242} + 80X_{2332} + 90X_{2333} + 20X_{2341} - 100Z_{22} \leq 0$$

$$20X_{3131} + 90X_{3133} + 20X_{3141} + 80X_{3142} + 40X_{3231} + 20X_{3232} + 30X_{3233} + 20X_{3241} + 100X_{3242} - 100Z_{32} \leq 0$$

La restricción 4 nos restringe que el costo operativo de todas las partes quede dentro del presupuesto

$$\sum_{k,p,m,s} d_k C_{mskp} X_{mskp} \leq B$$

expresado matemáticamente:

$$\begin{aligned} & 30X_{1111} + 40X_{1121} + 80X_{1312} + 90X_{1321} + 50X_{1322} + 50X_{2211} + 80X_{2212} + 80X_{2221} + 30X_{2222} \\ & + 70X_{2312} + 90X_{2321} + 60X_{2322} + 20X_{3111} + 30X_{3121} + 30X_{3211} + 90X_{3212} + 70X_{3221} + 30X_{3222} \\ & + 20X_{1131} + 10X_{1133} + 20X_{1141} + 70X_{1142} + 70X_{1332} + 40X_{1333} + 50X_{1341} + 30X_{2231} + 20X_{2232} \\ & + 90X_{2233} + 30X_{2241} + 80X_{2242} + 80X_{2332} + 50X_{2333} + 60X_{2341} + 20X_{3131} + 20X_{3133} + 10X_{3141} \\ & + 90X_{3142} + 40X_{3231} + 40X_{3232} + 100X_{3233} + 40X_{3241} + 90X_{3242} \leq 350 \end{aligned}$$

Resumiendo el modelo es:

$$\text{Min } f = 100Z_{11} + 100Z_{12} + 250Z_{21} + 250Z_{22} + 300Z_{31} + 300Z_{32} + 300Z_{33}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} Y_{11} + Y_{12} &= 1 \\ Y_{21} + Y_{22} &= 1 \\ Y_{31} + Y_{32} + Y_{33} &= 1 \\ Y_{41} + Y_{42} &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{lll} X_{1111} + X_{3111} - Y_{11} = 0 & X_{2212} + X_{3212} - Y_{12} = 0 & X_{2242} + X_{3242} - Y_{42} = 0 \\ X_{1121} + X_{3121} - Y_{21} = 0 & X_{2221} + X_{3221} - Y_{21} = 0 & X_{1312} + X_{2312} - Y_{12} = 0 \\ X_{1131} + X_{3131} - Y_{31} = 0 & X_{2222} + X_{3222} - Y_{22} = 0 & X_{1321} + X_{2321} - Y_{21} = 0 \\ X_{1133} + X_{3133} - Y_{33} = 0 & X_{2231} + X_{3231} - Y_{31} = 0 & X_{1322} + X_{2322} - Y_{22} = 0 \\ X_{1141} + X_{3141} - Y_{41} = 0 & X_{2232} + X_{3232} - Y_{32} = 0 & X_{1332} + X_{2332} - Y_{32} = 0 \\ X_{1142} + X_{3142} - Y_{42} = 0 & X_{2233} + X_{3233} - Y_{33} = 0 & X_{1333} + X_{2333} - Y_{33} = 0 \\ X_{2211} + X_{3211} - Y_{11} = 0 & X_{2241} + X_{3241} - Y_{41} = 0 & X_{1341} + X_{2341} - Y_{41} = 0 \end{array}$$

$$50X_{1111} + 30X_{1121} + 80X_{1312} + 100X_{3121} + 60X_{1322} - 100Z_{11} \leq 0$$

$$30X_{2211} + 90X_{2212} + 70X_{2221} + 30X_{2222} + 70X_{2312} + 80X_{2321} + 60X_{2322} - 100Z_{21} \leq 0$$

$$70X_{3111} + 40X_{3121} + 40X_{3211} + 70X_{3212} + 70X_{3221} + 20X_{3222} - 100Z_{31} \leq 0$$

$$20X_{1131} + 80X_{1133} + 40X_{3211} + 10X_{1141} + 90X_{1142} + 110X_{1332} + 70X_{1333} + 30X_{1341} + 40X_{3211} - 100Z_{12} \leq 0$$

$$30X_{2231} + 10X_{2232} + 50X_{2233} + 20X_{2241} + 90X_{2242} + 80X_{2332} + 90X_{2333} + 20X_{2341} - 100Z_{22} \leq 0$$

$$20X_{3131} + 90X_{3133} + 20X_{3141} + 80X_{3142} + 40X_{3231} + 20X_{3232} + 30X_{3233} + 20X_{3241} + 100X_{3242} - 100Z_{32} \leq 0$$

$$\begin{aligned} &30X_{1111} + 40X_{1121} + 80X_{1312} + 90X_{1321} + 50X_{1322} + 50X_{2211} + 80X_{2212} + 80X_{2221} + 30X_{2222} \\ &+ 70X_{2312} + 90X_{2321} + 60X_{2322} + 20X_{3111} + 30X_{3121} + 30X_{3211} + 90X_{3212} + 70X_{3221} + 30X_{3222} \\ &+ 20X_{1131} + 10X_{1133} + 20X_{1141} + 70X_{1142} + 70X_{1332} + 40X_{1333} + 50X_{1341} + 30X_{2231} + 20X_{2232} \\ &+ 90X_{2233} + 30X_{2241} + 80X_{2242} + 80X_{2332} + 50X_{2333} + 60X_{2341} + 20X_{3131} + 20X_{3133} + 10X_{3141} \\ &+ 90X_{3142} + 40X_{3231} + 40X_{3232} + 100X_{3233} + 40X_{3241} + 90X_{3242} \leq 350 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{kp}, X_{mskp} &= 0, 1 \quad \forall \text{ kpms} \\ Z_m &\geq 0 \text{ y entera} \end{aligned}$$

Este modelo puede resolverse fácilmente mediante un paquete de computación para programación lineal entera como LINDO, programación matemática, STORM, etc. Los resultados usando un paquete de computadora se dan en el apéndice No. 1

4.6 ECONOMIA EN EL AGRUPAMIENTO DE HERRAMIENTAS EN LA MANUFACTURA CELULAR

4.6.1 Análisis comparativo de costo

Costo por grupo de la disposición herramental

Una de las ventajas de las aplicaciones de la tecnología de grupo es la racionalización de los diseños de herramientas y la reducción de las preparaciones de herramientas, por lo cual se reducen los costos del conjunto de herramental y producción. El análisis de costos de disposición herramental en grupo (soportes y accesorios de grupos) en comparación con el de los métodos convencionales de disposición de herramientas, se convierte en fundamental para justificar las aplicaciones de la tecnología de grupo en la disposición herramental.

1. Método convencional de la disposición herramental

$$C_{tw1} = \sum_{i=1}^p C_{w1}(i)$$

donde C_{w1} = costo de un soporte o accesorio del método de disposición herramental convencional, \$

C_{tw1} = costos totales de disposición herramental de métodos convencionales usando p diferentes soportes o accesorios, \$

p = total de soportes o accesorios diferentes utilizados (también, posiblemente, número de partes que se usan al producir)

2. Método de disposición herramental de grupo

$$C_{tw2} = \sum_{i=1}^q C_a(i) + C_{w2}$$

donde C_{w2} = costo de soporte o accesorio en grupo, \$

C_{tw2} = costos totales para el herramental de grupo usando soportes o accesorios en grupo con q diferentes adaptadores, \$

C_a = costo de un adaptador, \$

q = total de adaptadores usados para la producción de una familia de partes

3. Costo unitario de disposición herramental**a. Método convencional de disposición herramental**

$$C_{u1} = \left[\frac{C_{tw1}}{N} \right] = \left[\frac{\sum_{i=1}^p C_{w1}(i)}{N} \right]$$

donde C_{u1} = costo unitario de disposición de herramientas para el método convencional de disposición herramental, \$/pieza

N = número de partes producidas

b. Método de disposición herramental de grupo

$$C_{u2} = \left[\frac{C_{tw2}}{N} \right] = \left[\frac{\sum_{i=1}^q C_a(i) + C_{w2}}{N} \right]$$

donde C_{u2} = costo unitario de herramientas para el método de grupo, \$/pieza

Los datos de la tabla 4.17 sirven para comparar un método de disposición herramental convencional, usando accesorios de maquinado convencional y un nuevo método de grupo, que utiliza un accesorio maestro de grupo y adaptadores. En la tabla 4.18 se calculan y listan los costos totales de herramientas (C_{tw}) y los costos unitarios de herramientas (C_u) del método convencional y los del método de grupo, en relación con el número de partes diferentes dentro de una familia de partes o del grupo.

En las figuras 4.2 y 4.3 se grafican los costos totales de herramientas (C_{tw}) y los costos unitarios (C_u), respectivamente, como una función del número de partes de una familia o grupo.

Tabla 4.17. Datos sobre costos para el análisis comparativo.

<i>Partida</i>	<i>Método convencional de disposición herramental</i>	<i>Método de disposición herramental por grupo</i>
Costo del conjunto de taladro	\$815	\$2208
Número de conjuntos necesarios	6	1
Costo de un adaptador	----	\$450
Número de adaptadores necesarios	----	5
No. de piezas que se van a producir	240	240

Tabla 4.18. Ejemplo calculado de los costos de disposición herramienta para comparar.

No. de partes de la familia	Método convencional		Método de mecanización de grupo	
	C_{m1}	C_{u1}	C_{m2}	C_{u2}
1	\$ 815	\$ 3,40	\$ 2,568	\$ 11.08
2	1,630	3,40	3,108	6.48
3	2,445	3,40	3,558	4.94
4	3,260	3,40	4,008	4.18
5	4,075	3,40	4,458	3.72
6	4,890	3,40	4,908	3.41
7	5,705	3,40	5,358	3.19
8	6,520	3,40	5,808	3.03
9	7,335	3,40	6,258	2.90
10	8,150	3,40	6,708	2.80
11	8,965	3,40	7,158	2.71
12	9,780	3,40	7,608	2.64
13	10,595	3,40	8,058	2.58
14	11,410	3,40	8,508	2.53
15	12,225	3,40	8,958	2.49
20	16,300	3,40	11,208	2.34

Como se ve en estas ilustraciones, la tasa de incremento en los costos totales para el método herramienta convencional es mucho más alta que la del método de grupo. Desde el punto de vista de los costos unitarios, cuando aumenta el número de partes de una familia, los costos unitarios de los métodos de grupo son mucho más económicos en comparación con los del método convencional, sobre el cual no influye el número de componentes de la familia. Sin embargo, la pendiente decrece en los niveles de costo unitario después de cierto número de partes del grupo. Esto indica que existe un límite hasta el cual la reducción del costo unitario es efectiva. Así mismo, las gráficas de costos totales y la de costos unitarios, indican los puntos críticos en que se debe tomar la decisión para seleccionar el método adecuado de disposición de herramientas.

Figura 4.2. Costos totales de disposición
herramental de los métodos convencional
y de grupo. (Ver tablas 4.9 y 4.10)

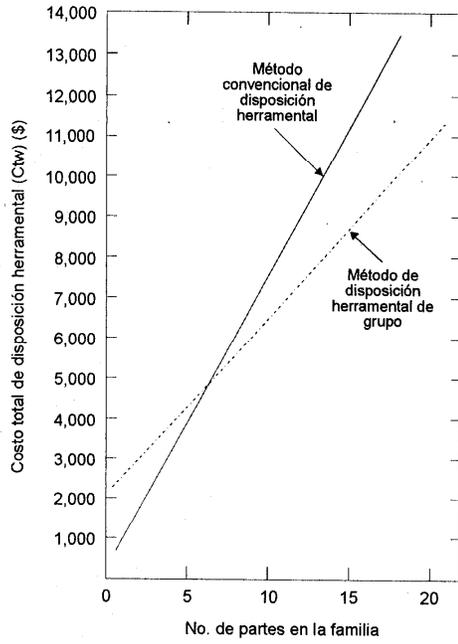
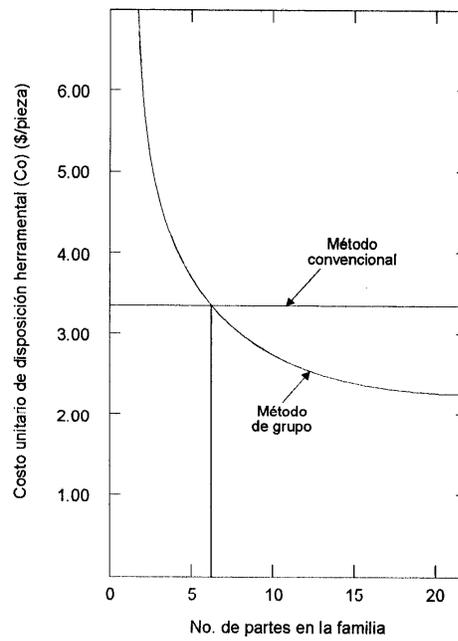


Figura 4.3. Costos unitarios de
mecanización de los métodos convencional
y de grupo. (Ver tablas 4.9 y 4.10)



Costos de maquinado de grupo

El maquinado de grupo es uno de los aspectos más importantes de las aplicaciones de la tecnología de grupo. Aunque el maquinado de grupo es ventajoso desde diversos puntos de vista técnicos, resulta conveniente confirmar las ventajas del método de maquinado por grupo, en relación con el método convencional de maquinado desde un punto de vista económico. En este sentido se presentan 3 fórmulas útiles para calcular los costos de maquinado convencional y por grupo.

1. El costo total de maquinado para un solo lote de una parte con herramental individual especial se puede expresar como:

$$C_{tm} = C_o(T_c N_\lambda + T_s) + D_t$$

donde C_{tm} = costo total de maquinado, \$

C_o = tasa de trabajo, \$/min

T_c = tiempo unitario de maquinado por pieza, min/pieza

N_λ = tamaño de lote, no. de piezas/lote

T_s = tiempo de preparación por un lote, min/lote

D_t = depreciación de herramental por lote, \$/lote

2. Los costos totales de maquinado para n lotes o n partes diferentes de la familia de partes, tanto para el maquinado convencional como para el de grupo, se puede expresar como sigue:

a. Maquinado convencional (individual)

$$C_{tm1} = C_o \left[\sum_{i=1}^n T_{c1(i)} N_{\lambda1(i)} + \sum_{i=1}^n T_{s1(i)} \right] + \sum_{i=1}^n D_{t1(i)}$$

donde C_{tm1} = costo total de maquinado para el maquinado convencional, \$

n = número de lotes o número de partes diferentes a producir

T_{c1} = tiempo unitario de maquinado por pieza por maquinado convencional, min/pieza

T_{s1} = tiempo de preparación por lote para maquinado convencional, min/lote o parte

D_{t1} = depreciación promedio de herramientas por lote para maquinado convencional, \$ lote o parte

b. Maquinado en grupo

$$C_{tm2} = C_o \left[\sum_{i=1}^n T_{c2(i)} N_{\lambda2(i)} + T_{s2} + \sum_{i=1}^{n-1} T_{sa(i)} \right] + \left[D_{t2} + \sum_{i=1}^{n-1} D_{ta(i)} \right]$$

donde C_{tm2} = costo total de maquinado para maquinado en grupo, \$

n = número de partes de la familia de partes

T_{c2} = tiempo unitario promedio de maquinado por pieza por maquinado de grupo, \$/pieza

T_{s2} = tiempo de preparación por lote (por familia de partes) para maquinado en grupo, min/lote o familia de partes

T_{sa} = tiempo de preparación por adaptador para maquinado en grupo, min/adaptador

D_{t2} = depreciación de herramientas por lote o familia de partes para maquinado en grupo, \$/lote o familia de partes