

PROBLEMA DE PROGRAMACION DE OPERACIONES Y HERRAMIENTAS EN UN SISTEMA DE MANUFACTURA FLEXIBLE: HEURISTICA DE CARGA FASE II

Programming Problem of Operations and Tools in a Flexible Manufacturing System: Loading Heuristic Phase II

RESUMEN

Esta fase toma los resultados obtenidos en la fase I de la Heurística de Carga, cuyo objetivo es el de asignar operaciones y herramientas a máquinas dentro de un Sistema de Manufactura Flexible (FMS) con el objetivo de balancear cargas de trabajo entre tipos de máquinas, generar flexibilidad en las rutas de producción y disminuir el intercambio de material entre máquinas. La Fase I se enfoca en la asignación de operaciones a tipos de máquinas de tal manera que se logre un balance de las cargas de trabajo entre estos. Por otro lado la Fase II busca lograr los objetivos de disminución de los intercambios de material y la flexibilización de las rutas de producción.

PALABRAS CLAVES: Balanceo de Cargas de Trabajo, Cluster, Flexibilidad de Flujos de Producción, Heurística de Carga, Sistemas de Manufactura Flexible.

ABSTRACT

This phase takes the results obtained in Phase I of the Loading Heuristics, which aims to allocate operations tools and machines within a Flexible Manufacturing System (FMS) with the objective of balancing workloads between machine types, generate flexibility on the routes of production and decrease the exchange of material between machines. Phase I focuses on the allocation of operations to machine types in a way that achieves the objective of balancing work loads. Moreover Phase II seeks to achieve the objectives of decline in the exchange of materials and the increased routing flexibility.

KEYWORDS:

Balancing Work Loads, Cluster, Routing Flexibility, Loading Heuristics, Flexible Manufacturing Systems.

1. INTRODUCCIÓN

El Hombre siempre ha sentido la necesidad de producir elementos que permitan satisfacer sus requerimientos, de tal manera que su adaptación al contexto ambiental sea más eficiente. Los sistemas de producción de estos elementos, han sufrido una substancial evolución, al evolucionar de procesos netamente artesanales a procesos altamente automatizados basados en soporte computacional [1].

En este artículo se toma como punto de partida la solución obtenida en la aplicación de la Fase I, para la aplicación de la Fase II de la heurística de carga cuyo resultado final es la asignación de herramientas y operaciones a grupos del mismo tipo de máquinas. Se plantea inicialmente una descripción del problema general de carga para continuar con una descripción de la Fase II y finalizar con su aplicación en la solución de un caso.

2. EL PROBLEMA

Fecha de Recepción: 25 de Enero de 2008
Fecha de Aceptación: 7 de Mayo de 2008

PEDRO DANIEL MEDINA V.

Ingeniero Mecánico, Ms.C
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
pemedin@utp.edu.co

EDUARDO ARTURO CRUZ T

Ingeniero Industrial, Ms.C
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
ecruz@utp.edu.co

JORGE HERNAN RESTREPO

Ingeniero Industrial, Ms.C
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
jhrestrepoco@utp.edu.co

El problema de carga en el contexto de un Sistema de Manufactura Flexible (FMS), tiene como objetivo principal el de asignar las operaciones y herramientas necesarias para la fabricación de diferentes piezas a máquinas, de tal manera que se minimice el costo de realización de las tareas [2]. En el planteamiento del problema se supone que el lote de partes que se producirán en el periodo es conocido. Para el planteamiento del modelo que representa al problema se definen las siguientes variables de decisión:

x_{ij} , representa la proporción de la operación i que es asignada a la máquina j .

y_{jl} , representa una variable binaria que tomará un valor de 1 si la herramienta l es asignada a la máquina j y un valor de 0 si ocurre lo contrario.

Teniendo en cuenta que los parámetros relevantes son:

c_{ij} , es el costo de realizar la operación i en la máquina j .

$l(i)$, es la herramienta requerida para la operación i

n_b , es el número de herramientas tipo l disponibles.

p_{ij} , Tiempo de realización de operación i en la máquina j .

P_j , Tiempo disponible de operación de la máquina j .

k_{ij} , portaherramientas necesarios si la operación i es asignada a la máquina j .

K_j , portaherramientas disponibles en la máquina j .

En un contexto productivo, las rutas de fabricación de cada parte está comprendida por un conjunto de operaciones interrelacionadas que tendrán como resultado final una pieza terminada. A su vez cada operación requiere de una herramienta específica y cuenta con un conjunto de máquinas a las cuales puede ser asignada. El parámetro c_{ij} refleja el hecho de que aunque varias máquinas pueden desempeñar una operación específica, ciertas máquinas pueden ser más eficientes que otras. El modelo que minimiza el costo será:

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{ij} x_{ij}$$

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad \forall i$$

$$\sum_{i=1}^I p_{ij} x_{ij} \leq P_j \quad \forall j$$

$$\sum_{i=1}^I k_{ij} y_{ij} \leq K_j \quad \forall j$$

$$x_{ij} - y_{l(i)j} \leq 0 \quad \forall i, j$$

$$\sum_{j=1}^J y_{ij} \leq n_i \quad \forall i$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1 \quad y \quad y_{ij} = 0 \text{ o } 1$$

La función objetivo indica que el objetivo es la minimización del costo variable de producción. La primera restricción asegura que cada operación es asignada a mínimo una máquina, si se agrega la restricción de que x_{ij} sea entera, se forzaría a que el modelo asigne cada operación a solo una máquina. La segunda restricción indica que el tiempo de operación de las tareas asignadas a cada máquina no sea mayor el tiempo disponible durante el periodo de planificación. La tercera restricción asegura el suficiente espacio en el magazine de herramientas para almacenar las herramientas asignadas a la máquina j . La cuarta restricción asegura que las herramientas están realmente montadas en la máquina necesaria. Finalmente, la quinta restricción plantea un límite para el número de herramientas disponibles por cada tipo.

Existen reglas heurísticas que pueden ser útiles en la obtención de soluciones que cumplan con múltiples criterios sin requerir un gran esfuerzo de cálculo. El problema de carga busca la asignación de operaciones y herramientas a máquinas, teniendo en cuenta objetivos simultáneos como balancear las cargas de trabajo, minimizar movimiento entre máquinas, generar flexibilidad en las rutas de producción y minimizar inversión en herramientas.

En la aplicación de técnicas heurísticas al problema de carga, el primer objetivo perseguido es el de balancear las cargas de trabajo, para esto es de recordar que la teoría del shedulling plantea que ordenar las tareas en orden decreciente de acuerdo a sus tiempos de procesamiento para ser asignadas de manera secuencial a la primer máquina disponible tiende a balancear las cargas de trabajo. Si el objetivo es el de minimizar los movimientos entre máquinas, una buena estrategia podría ser secuenciar las operaciones a realizar sobre cada parte de manera que puedan desempeñarse largas cadenas de tareas sobre la misma máquina. Es así que se puede usar una regla que plantee que una vez que una parte sea asignada a una máquina, se deberán llevar tantas operaciones como sean posibles antes de retirar la pieza.

Si se considera como objetivo la flexibilidad en la ruta de producción, una estrategia sería el de tratar de que tantas máquinas como sean posible sean capaz de llevar a cabo una operación. Se podrían dividir las máquinas de cada tipo en el menor número de grupos posible y asignar el mismo conjunto de herramientas a cada máquina dentro de un grupo, de esta manera los recursos dentro del mismo conjunto serán intercambiables. Si la inversión en herramientas es el criterio que domina, simplemente se debe limitar el número de las herramientas de cada tipo., de esta manera algunas máquinas pueden tener porta herramientas vacíos. Cada una de estas reglas es simple de implementar y útil para lograr los objetivos, por lo tanto, es posible generar un procedimiento heurístico enlazándolas.

La heurística de carga se divide en dos fases. La fase I asigna operaciones a tipos de máquinas. Esta fase solo se necesita cuando las operaciones se pueden realizar en más de un tipo de máquina y busca balancear las cargas de trabajo. Las operaciones deben de ser ordenadas de acuerdo al número de tipos de máquinas diferentes a los que se pueda asignar. De las operaciones con el menor número de alternativas se selecciona la operación con el mayor tiempo total de procesamiento (tiempo total de proceso para el lote) y se asigna al tipo tendría la más baja utilización después de asignada la tarea.

La fase II envuelve tres pasos. En la primera etapa las operaciones son combinadas para formar una pseudo-operación que se denomina cluster de tal manera que se reduzca el manejo y transferencia de materiales entre máquinas. El cluster es manejado como una sola operación que requiere de todas las herramientas necesarias para llevar a cabo las tareas que lo forman, haciendo así, que las partes no se muevan entre máquinas excepto cuando todas las operaciones del cluster hayan finalizado. En el segundo paso, se forman grupos de máquinas montando las mismas herramientas en recursos del mismo tipo, la formación de grupos de máquinas provee flexibilidad de flujo de producción pero incrementa el costo asociado a las herramientas necesarias. El número de grupos es determinado por el

número de portaherramientas necesarios por las operaciones asignadas a ese tipo de máquina. Por último los cluster son asignados a grupos de máquinas dentro de cada tipo de tal manera que se logre balancear la carga de trabajo. Esta secuencia de decisiones provee un mecanismo para dividir el problema de carga en un conjunto de problemas mas simples que pueden ser resueltos en secuencia.

La notación que se seguirá en la descripción de la heurística será:

- m_j*, número de máquinas tipo *j* en el FMS
- k_{ij}*, espacio de herramientas requerido si el cluster de operaciones *i* es asignado al tipo de máquina *j*.
- κ_j*, portaherramientas no asignados por máquina tipo *j* por periodo.
- τ*, tiempo máximo permitido para las operaciones en un cluster.
- ψ_j*, tiempo disponible sin asignación por máquina tipo *j* por periodo.
- Δk_{ij}*, número de tipos diferentes de herramientas que deben de asignarse a la máquina tipo *j* para llevar a cabo las operaciones del cluster *i*.
- p_{ij}*, Tiempo total de procesamiento si operación *i* se asigna a máquina tipo *j*
- P_j*, Tiempo de procesamiento disponible por máquina tipo *j* por periodo.
- K_j*, Espacio de herramienta disponible por máquina tipo *j* por periodo.

La segunda fase de esta heurística cuenta con tres pasos que son:

Paso 1: Las operaciones son combinadas en cluster, de tal manera que se reduzca el intercambio de material entre máquinas. Un cluster es un conjunto de operaciones secuenciales sobre una parte que puede manejadas como una sola operación.

Paso 2: Son formados grupos de máquinas, identificando máquinas del mismo tipo.

Paso 3: Cluster son asignados a grupos de máquinas dentro de cada tipo para balancear las cargas de trabajo.

Pasos que se describen de la siguiente manera:

Paso 1: Generación de cluster¹ de operaciones:

Para el tipo de parte de *n=1* a *N*, inicie en la primera operación y continúe hasta la última, agregue la próxima operación al cluster actual (combine las operaciones con la última), a menos que se necesite un nuevo tipo de máquina, se exceda el tiempo permitido del cluster (*τ*) o se sobrepase el espacio disponible para herramientas.

Paso 2: Formación de grupos de máquinas:

Para cada tipo de máquinas, sea *σ_j* el número de portaherramientas requeridas por el conjunto de herramientas necesarias para producir todas las operaciones asignadas al tipo de máquina *j*. Encuentre el número mínimo factible de grupos $g_j = \lceil \sigma_j / K_j \rceil^2$. Asigne secuencialmente máquinas de tal manera que se iguale su tamaño, esto significa que, por ejemplo al grupo 1 se asignará las máquinas 1, *g_j* + 1, 2*g_j* + 1,

Paso 3: asignación de cluster:

Ordene los cluster de operaciones para cada tipo de máquina *J* en orden decreciente según el tiempo total de procesamiento $P(1)_j \geq P(2)_j \geq P(3)_j \geq \dots \geq P(n)_j$. Para el cluster de operaciones de (1) a (n), considere el grupo de máquinas con suficientes portaherramientas libres y asigne cluster al grupo con la menor carga de trabajo por máquina después de seleccionar el cluster según la regla LPT³.

3. EL CASO

Un grupo de máquinas va a ser cargada para producir tres tipos de partes. Los datos relevantes son mostrados en la tabla siguiente. Ciertas operaciones pueden ser llevadas a cabo por más de un tipo de máquina. Solo un tipo de máquina será elegido para cada operación. El grupo de máquinas tiene dos máquinas de tipo A, dos de tipo B y una de tipo C. Las máquinas de tipo A, B y C pueden almacenar tres, una y cuatro herramientas respectivamente. Se espera que cada máquina este disponible durante 800 minutos en este periodo. Es necesario desarrollar un programa de asignación de herramientas y operaciones a máquinas.

Tipo de parte	Demanda	Operación	Tiempo de procesamiento por unidad			Herramienta
			A	B	C	
1	40	1	12	11	10	a
		2	13	15	?	b
		3	14	14	?	c
2	100	1	2	4	?	a
		2	2	6	6	c
3	100	1	4	?	?	d
		2	5	?	8	e
		3	?	?	4	f

Tabla 1. Datos

Planteamiento de la solución

Después de aplicada la Fase I [6], se obtiene la solución especificada en la Tabla 2.

¹ Cluster se define como, Conjunto de operaciones secuenciales sobre la misma parte que son combinadas en una sola operación.

² Menor entero mayor que.

³ LPT: Longest Processing Time (Mayor tiempo de procesamiento).

Operación	Tipo de máquina asignado	Herramienta asignada
11	C	a
12	B	b
13	B	c
21	A	a
22	A	c
31	A	d
32	A	e
33	C	f

Tabla 2. Programación Fase I.

A partir de aquí empieza la aplicación de la Fase II en búsqueda de una solución que disminuya los intercambios entre máquinas y genere rutas flexibles de fabricación para las piezas asignadas al FMS.

Teniendo en cuenta que la fase aquí analizada se de aplicará a cada tipo de máquina, en la siguiente tabla se muestra un resumen de las operaciones y herramientas asignadas al tipo de máquina A:

PARTE	OPERACION	CODIGO	HERRAMIENTA	TIEMPO DE OPERACIÓN
2	1	21	a	200
2	2	22	c	200
3	1	31	d	400
3	2	32	e	500

Tabla 3. Operaciones y Herramientas asignadas a tipo de máquina A.

Paso 1. Formación de Cluster

En este caso se toma el parámetro de control τ con un valor igual a la disponibilidad de las máquinas para el periodo que corresponde a 800 minutos. Tomando en consideración la parte 2, se tendría la siguiente configuración del primer cluster correspondiente a las operaciones necesarias para la fabricación de esa pieza.

Cluster 1

Línea de tiempo



Línea de herramientas



El cluster 1 asociado al tipo de Máquina A estará formado por las operaciones 1 y 2 correspondientes a la pieza tipo 2, con un tiempo total de procesamiento de 400 minutos y necesidad de 2 herramientas (a y c). Como este cluster garantiza la realización de todas las operaciones necesarias para la producción de la parte 2, se abre un nuevo conjunto de operaciones para la realización de las tareas asociadas a la parte 3.

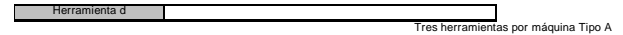
Cluster 2

Las dos operaciones de fabricación de la pieza 3 asignadas al tipo de máquina A, necesitan un total de 900 minutos, tiempo que supera la disponibilidad por periodo que corresponde a 800 minutos. Lo anterior imposibilita que las operaciones 31 y 32 sean asignadas al mismo cluster, que deben por lo tanto, programarse en conjuntos distintos, de aquí que se necesiten los cluster 2 y 3 para albergarlas.

Línea de tiempo



Línea de herramientas

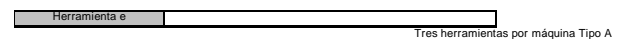


Cluster 3

Línea de tiempo



Línea de herramientas



Después de haber aplicado el paso 1 de la fase II de la heurística de carga para el tipo de máquina A, los resultados obtenidos son:

Cluster	Código	Operaciones	Herramientas	Tiempo	Orden
1	C1	21-22	a - c	400 min	2
2	C2	31	d	400 min	3
3	C3	32	e	500 min	1

Tabla 4. Resultado de la formación de cluster de acuerdo a las operaciones asignadas al tipo de máquina A.

Donde la columna orden indica la secuencia en la que serán programados en el momento de la asignación de cluster a grupos de máquinas (paso 3). Para obtener la secuencia de programación se usa la regla LPT, en donde existen empates respecto a esta regla se toma como segundo criterio de elección el número de operaciones que hace parte del cluster.

Paso 2. Formación de grupos de máquinas

En este paso lo que se plantea es la determinación de los grupos de máquinas dentro de cada tipo de ellas. El procedimiento es:

Tipo de herramientas diferentes necesarias (σ_A) = 4
 Número de portaherramientas disponibles por máquina tipo A (K_A) = 3
 Número mínimo de grupos $\lceil \sigma_A / K_A \rceil = \lceil 4 / 3 \rceil = 2$

Debido a que se requieren dos grupos de máquinas y solo existen dos del tipo A, cada una de ellas formará un grupo por si misma.

GRUPO DE MAQUINAS TIPO A No 1 = Máquina tipo A # 1

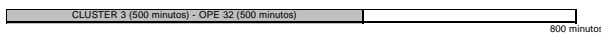
GRUPO DE MAQUINAS TIPO A No 2 = Máquina tipo A # 2.

Paso 3. Asignación de cluster a grupos de máquinas

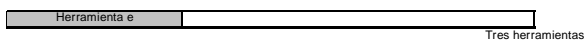
Teniendo en cuenta el paso 3 descrito en la presentación de la Fase II de la Heurística de Carga, la primer operación que se asigna es la 32 con un tiempo total de operación de 500 minutos y herramienta (e), programándose en la máquina A1. Posteriormente se ubican las operaciones 21 y 22 correspondientes al cluster 1, con un tiempo combinado de operación de 400 minutos y herramientas (a y c), este cluster es asignado a la máquina A2. Finalmente el cluster 2 formado por la operación 31 es asignado a la máquina que posea el menor tiempo total de procesamiento después de asignada la tarea, para este caso la máquina A2 es la única opción posible debido a que el otro grupo no tendría el suficiente tiempo de operación disponible para acoger el cluster. En resumen la solución obtenida sería.

Grupo 1- Máquina A1

Línea de tiempo



Línea de herramientas

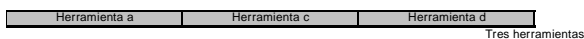


Grupo 2- Máquina A2

Línea de tiempo



Línea de herramientas



El proceso continua mediante la aplicación del mismo procedimiento a los otros dos tipos de máquina. Para el tipo de máquina B se partiría de la información mostrada en la Tabla 5.

PARTE	OPERACION	CODIGO	HERRAMIENTA	TIEMPO DE OPERACIÓN
1	2	12	b	600
1	3	13	c	560

Tabla 5. Operaciones y Herramientas asignadas a tipo de máquina B.

Paso 1: Formación de cluster

Debido a que a las máquinas tipo B se asignan dos operaciones las cuales no se pueden asignar conjuntamente a un cluster por generar un tiempo acumulado mayor al permitido, se asigna cada una a cluster independientes generándose la siguiente solución. Además que el número de portaherramientas disponibles

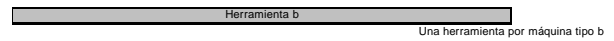
en las máquinas tipo B es de solo uno y las operaciones requerirían la asignación de dos herramientas diferentes.

Cluster 4

Línea de tiempo

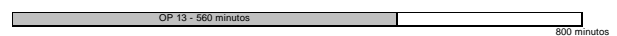


Línea de herramientas

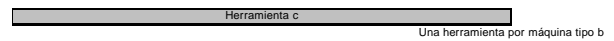


Cluster 5

Línea de tiempo



Línea de herramienta



Después de haber aplicado el paso 1 de la fase II de la heurística de carga para el tipo de máquina B, los resultados obtenidos son:

Cluster	Código	Operaciones	Herramientas	Tiempo	Orden
4	C4	12	b	600 min	1
5	C5	13	c	560 min	2

Tabla 6. Resultado de la formación de cluster de acuerdo a las operaciones asignadas al tipo de máquina B.

Paso 2. Formación de grupos de máquinas

En este paso lo que se plantea es la determinación de los grupos de máquinas dentro de cada tipo de ellas. El procedimiento es:

Tipo de herramientas diferentes necesarias $(\sigma_B) = 2$
 Número de portaherramientas disponibles por máquina tipo B $(K_B) = 1$
 Número mínimo de grupos $\lceil \sigma_A / K_B \rceil = \lceil 2 / 1 \rceil = 2$

Debido a que se requieren dos grupos de máquinas y solo existen dos del tipo B, cada una de ellas formará un grupo por si misma.

GRUPO DE MAQUINAS TIPO B No 1 = Máquina tipo B # 1

GRUPO DE MAQUINAS TIPO A No 2 = Máquina tipo B # 2.

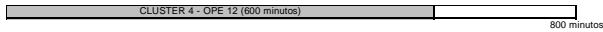
Paso 3. Asignación de cluster a grupos de máquinas

Teniendo en cuenta el paso 3 descrito en la presentación de la Fase II de la Heurística de Carga, la primer operación que se asigna es el cluster C4 - operación 12 con un tiempo total de tarea de 600 minutos y

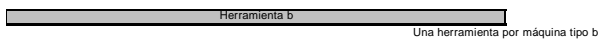
herramienta (b), programándose en la máquina B1. Posteriormente se ubica el cluster C5 – operación 13, con un tiempo de operación de 560 minutos y herramienta (c), el cual es asignado a la máquina B2. En resumen la solución obtenida sería.

Grupo 1 – Máquina B1

Línea de tiempo



Línea de herramientas

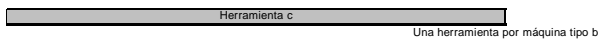


Grupo 2 – Máquina B2

Línea de tiempo



Línea de herramientas



Para finalizar, en cuanto al recurso tipo C, debido a que solo se cuenta con una sola máquina de ese tipo, las operaciones asignadas a ella (11 y 33) y las herramientas correspondientes (a y f), se asignan directamente a la única máquina. Por lo tanto el resultado sería:

Máquina tipo C

Línea de tiempo



Línea de herramienta



4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de aplicada la heurística a este caso, se tendría la programación final de las operaciones necesarias y de las herramientas correspondientes resumida en la siguiente tabla:

Máquina	Operaciones asignadas	Herramienta asignada	Herramientas disponibles	% de portaherramientas usado	Tiempo de operación asignado	Tiempo de operación disponible	% de tiempo usado
A1	32	e	3	33,33%	500	800	62,50%
A2	21 - 22 - 31	a - c - d	3	100,00%	800	800	100,00%
B1	12	b	1	100,00%	600	800	75,00%
B2	13	c	1	100,00%	560	800	70,00%
C	11 - 33	a - f	4	50,00%	800	800	100,00%

De los resultados anteriores se determina que el porcentaje de utilización promedio de las máquinas llega a un 81.50% con una desviación estándar de 17.46%, la dispersión respecto al valor promedio de utilización del uso de cada recurso de 1.09, 1.06, 0.37, 0.66, 1.06 desviaciones estándar para las máquinas A1, A2, B1, B2 y C respectivamente. De lo anterior se concluye que la heurística produjo una solución en la que se obtuvo una

asignación de tareas entre las máquinas con aproximadamente la misma carga de trabajo entre ellas.

En cuanto al intercambio de material entre máquinas se puede observar en los resultados que la pieza 2 será fabricada totalmente en la máquina A2, mientras las otras dos partes se verían sujetas a intercambios entre los recursos productivos. Esta condición, analizando detenidamente los datos originales del problema no se debe a una falla en la heurística, sino a los parámetros iniciales respecto a tiempos disponibles de operación, tiempos de operaciones y disponibilidad de portaherramientas, que no facilitan la formación y asignación de cluster más grandes.

Finalmente en cuanto a la flexibilidad de ruta, que requeriría el manejo de máquinas redundantes (máquinas dentro de un mismo grupo), a las que se les asignarían las mismas operaciones y herramientas, es observable que esta para lograr esto es necesario contar con más de dos máquinas por tipo de tal manera que los grupos estén formados por mas de dos máquinas que estarían en capacidad de realizar las mismas tareas y albergar las mismas herramientas. Lo anterior generaría la necesidad de incrementar el costo de las herramientas, pero en este caso se hace indispensable evaluar la mejor opción para la empresa entre flexibilidad y costos para la adquisición de herramientas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- (1) ASKIN, Ronald G. y GOLDBERG, Jeffrey B. Design and Analysis of Lean Production Systems. Jhon Wiley & Sons. 2001.
- (2) ASKIN, Ronal G. y STANDRIDGE, Charles R. Modeling and Analisis of Manufacturing Systems. Jhon Wiley & Sons. 1998.
- (3) FERRE MASIP, Rafael. La Fábrica Flexible. Productica. Marcombo Boixareu Editores. 1988.
- (4) IRANI, Shahruk. Hanbook of Cellular Manufacturing Systems. Jhon Wiley & Sons. 2002.
- (5) LEVASSEUR, Gerald. An Applications-Oriented Procedure for Cell Formation. Production and Inventory Management Journal. First Quarter 1996. pages 7 – 11.
- (6) THE PRODUCTIVITY DEVELOPMENT TEAM. Cellular Manufacturing: One-Piece For for Workteams. Shopfloor Series. Productivity Press. 1999.
- (7) SCHONBERGER, Richard. Manufactura de Clase Mundial: Aplicación de las Ultimas Técnicas para Optimizar la Producción. Grupo Editorial Norma. 1989.