

TESIS

26.751 ✓

Biblioteca

519131

PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN A CORTO PLAZO
EN SISTEMAS DE FABRICACIÓN FLEXIBLE (FMS)

POR

JOSÉ TEBA FERNÁNDEZ

Ingeniero Industrial por la E.S.I.I.

de la UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Departamento
de
Organización Industrial
y
Gestión de Empresas

Escuela Superior de Ingenieros Industriales

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

T. 115

PRESENTADA PARA LA OBTENCIÓN DEL

GRADO DE DOCTOR INGENIERO INDUSTRIAL

MAYO 1994

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
BIBLIOTECA DE SEVILLA

229

35

26 MAR 1994

Firma del Director de Tesis,

Fleora Raffetto

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Depositado en

de la

de esta biblioteca el día

hasta el día

de

EL DIRECTOR DE

de 19

El Doctorando

Jose Toba Fernández

JOSE TOBA FERNÁNDEZ

VºBº El Director de la tesis

S. Lozano

Sebastián Lozano Segura

A mis Padres

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al Profesor D. Sebastián Lozano Segura por la labor de Dirección desarrollada, su interés por este trabajo de investigación y la ayuda y apoyo prestado durante estos años.

A los compañeros del Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas por sus críticas y comentarios.

A todos ellos gracias.

INDICE

1. Introducción.....	9
2. Problemática de un SFF y estado de la cuestión.....	13
2.1 Clasificación de la problemática.....	14
2.2 Estado de la cuestión.....	18
2.2.1 Trabajos genéricos.....	19
2.2.2 Trabajos sobre el nivel estratégico.....	21
2.2.3 Trabajos sobre el nivel táctico.....	23
2.2.4 Trabajos sobre el nivel operacional.....	27
2.2.5 Esquema resumen.....	30
3. Planteamiento del trabajo de investigación.....	31
3.1 Objetivo de la investigación.....	31
3.2 Descripción del enfoque propuesto.....	32
3.3 Motivación de la investigación realizada.....	34
3.4 Consideraciones generales sobre la experimentación realizada.....	35
4. Primer escenario.....	36
4.1 Descripción de la situación.....	36
4.2 Implementación.....	39
4.2.1 Caracterización del sistema.....	39
4.2.2 Evolución del estado del sistema.....	41
4.3 Experimentación.....	42
4.3.1 Primer grupo de experimentos.....	43
4.3.1.1 Experimento inicial.....	47
4.3.1.1.1 Resultados.....	47
4.3.1.1.2 Análisis de los resultados.....	48
4.3.1.2 Variante del experimento inicial.....	49
4.3.1.2.1 Resultados.....	49
4.3.1.2.2 Análisis de los resultados.....	50
4.3.1.3 Consideración de rutas flexibles.....	50
4.3.1.3.1 Resultados.....	50
4.3.1.3.2 Análisis de los resultados.....	51
4.3.2 Segundo grupo de experimentos.....	52
4.3.2.1 Experimentos con rutas rígidas.....	56
4.3.2.1.1 Resultados.....	56
4.3.2.1.2 Análisis de los resultados.....	59
4.3.2.2 Experimentos con rutas flexibles.....	60
4.3.2.2.1 Resultados.....	60
4.3.2.2.2 Análisis de los resultados.....	63
4.4 Resumen del primer escenario.....	64
5. Segundo escenario.....	65
5.1 Descripción de la situación.....	65
5.2 Implementación.....	69
5.2.1 Caracterización del sistema.....	69
5.2.2 Evolución del estado del sistema.....	70
5.3 Experimentación.....	72

5.3.1	Primer grupo de experimentos. Sin roturas de máquina.....	73
5.3.1.1	Experimentos con rutas rígidas.....	74
5.3.1.1.1	Resultados.....	74
5.3.1.1.2	Análisis de los resultados.....	78
5.3.1.2	Experimentos con rutas flexibles.....	79
5.3.1.2.1	Primera variante para rutas flexibles....	80
5.3.1.2.1.1	Resultados.....	80
5.3.1.2.1.2	Análisis de los resultados.....	84
5.3.1.2.2	Segunda variante para rutas flexibles....	85
5.3.1.2.2.1	Resultados.....	85
5.3.1.2.2.2	Análisis de los resultados.....	89
5.3.1.2.3	Tercera variante para rutas flexibles....	90
5.3.1.2.3.1	Resultados.....	90
5.3.1.2.3.2	Análisis de los resultados.....	94
5.3.1.3	Experimentos con número de transportes variables.....	95
5.3.1.3.1	Resultados.....	95
5.3.1.3.2	Análisis de los resultados.....	97
5.3.1.4	Resumen para el primer grupo de experimentos..	98
5.3.2	Segundo grupo de experimentos. Con roturas de máquinas.....	98
5.3.2.1	Efecto de las roturas de las máquinas sobre la metodología.....	98
5.3.2.2	Experimentos para el caso de que se produzcan roturas.....	99
5.3.2.2.1	Resultados.....	100
5.3.2.2.2	Análisis de los resultados.....	102
5.4	Resumen del segundo escenario.....	103
6.	Tercer escenario.....	105
6.1	Descripción de la situación.....	105
6.2	Implementación.....	107
6.2.1	Caracterización del sistema.....	107
6.2.2	Evolución del estado del sistema.....	109
6.3	Experimentación.....	110
6.3.1	Primer grupo de experimentos.....	111
6.3.1.1	Funcionamiento del sistema sin roturas de máquinas.....	112
6.3.1.1.1	Resultados.....	112
6.3.1.1.2	Análisis de los resultados.....	114
6.3.1.2	Funcionamiento del sistema con roturas de máquinas.....	114
6.3.1.2.1	Resultados.....	115
6.3.1.2.1	Análisis de los resultados..	116
6.3.2	Segundo grupo de experimentos. Implementación paralelo.....	117
6.3.2.1	Justificación.....	118
6.3.2.2	Experimentación.....	119
6.3.2.2.1	Efecto del número de pallets.....	119
6.3.2.2.1.1	Resultados.....	119
6.3.2.2.1.2	Análisis de los resultados.....	120
6.3.2.2.2	Estudio comparativo de los tiempos de respuesta. Paralelo y monoprogramación..	121
6.4	Resumen del tercer escenario.....	123

7.- Resumen y conclusiones.....	125
7.1 Tesis.....	125
7.2 Experimentos.....	125
7.3 Conclusiones finales.....	127
8.- Futuras líneas de investigación.....	128
9.- Bibliografía.....	129

LISTA DE TABLAS

- Tabla 2.1 Clasificación de los trabajos por niveles y herramientas utilizadas
- Tabla 4.1 Mix de piezas. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos
- Tabla 4.2 Rutas rígidas. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos
- Tabla 4.3 Rutas flexibles. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos
- Tabla 4.4 Tiempos. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas rígidas
- Tabla 4.5 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas rígidas
- Tabla 4.6 Tiempos. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas rígidas. Menor distancia
- Tabla 4.7 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas rígidas. Menor distancia
- Tabla 4.8 Tiempos. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas flexibles
- Tabla 4.9 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas flexibles
- Tabla 4.10 Mix de piezas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos
- Tabla 4.11 Orden de entrada de las piezas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos
- Tabla 4.12 Rutas rígidas adicionales. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos
- Tabla 4.13 Rutas flexibles adicionales. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos
- Tabla 4.14 Políticas de selección de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos
- Tabla 4.15 Políticas complementarias selección de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos
- Tabla 4.16 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. FIFO
- Tabla 4.17 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. FIFO
- Tabla 4.18 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. SPT
- Tabla 4.19 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. SPT
- Tabla 4.20 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. BPD
- Tabla 4.21 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. BPD

Tabla 4.22 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles. FIFO

Tabla 4.23 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles. FIFO

Tabla 4.24 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles. SPT

Tabla 4.25 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles SPT

Tabla 4.26 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles. BPD

Tabla 4.27 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles BPD

Tabla 5.1 Distancias. 2^o escenario

Tabla 5.2 Tiempos. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. FIFO

Tabla 5.3 Mix de rutas. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. FIFO

Tabla 5.4 Tiempos. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. SPT

Tabla 5.5 Mix de rutas. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. SPT

Tabla 5.6 Tiempos. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. BPD estación 3

Tabla 5.7 Mix de rutas. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. BPD estación 3

Tabla 5.8 Tiempos. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. BPD estación 1

Tabla 5.9 Mix de rutas. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. BPD estación 1

Tabla 5.10 Tiempos. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1^a variante. FIFO

Tabla 5.11 Mix de rutas. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1^a variante. FIFO

Tabla 7.12 Tiempos. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1^a variante. SPT

Tabla 5.13 Mix de rutas. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1^a variante. SPT

Tabla 5.14 Tiempos. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1^a variante.
BPD estación 3

Tabla 5.15 Mix de rutas. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1^a variante.
BPD estación 3

Tabla 5.16 Tiempos. 2^o Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1^a variante.
BPD estación 1

- Tabla 5.17 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1ª variante. BPD estación 1
- Tabla 5.18 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. FIFO
- Tabla 5.19 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. FIFO
- Tabla 5.20 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. SPT
- Tabla 5.21 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. SPT
- Tabla 5.22 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. BPD estación 3
- Tabla 5.23 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. BPD estación 3
- Tabla 5.24 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. BPD estación 1
- Tabla 5.25 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. BPD estación 1
- Tabla 5.26 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. FIFO
- Tabla 5.27 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. FIFO
- Tabla 5.28 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. SPT
- Tabla 5.29 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. SPT
- Tabla 5.30 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. BPD estación 3
- Tabla 5.31 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. BPD estación 3
- Tabla 5.32 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. BPD estación 1
- Tabla 5.33 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. BPD estación 1
- Tabla 5.34 Tiempos de residencia. 2º Escenario. Sin roturas. Variando nº de transportes. FIFO
- Tabla 5.35 Tiempos fin lote. 2º Escenario. Sin roturas. Variando nº de transportes. FIFO

Tabla 5.36 Ratio utilización máquinas. 2º Escenario. Sin roturas. Variando nº de transportes. FIFO

Tabla 5.37 Datos roturas máquinas. 2º Escenario

Tabla 5.38 Tiempos. 2º Escenario. Con roturas. Metodología Mejorada. Rutas rígidas. FIFO

Tabla 5.39 Tiempos. 2º Escenario. Con roturas. Metodología Mejorada. Rutas flexibles. FIFO

Tabla 6.1 Tiempos. 3º Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. Sin ordenación en colas

Tabla 6.2 Mix de rutas. 3º Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. Sin ordenación en colas

Tabla 6.3 Tiempos. 3º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles. Sin ordenación en colas

Tabla 6.4 Mix de rutas. 3º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles. Sin ordenación en colas

Tabla 6.5 Tiempos. 3º Escenario. Con roturas. Metodología Mejorada. Rutas rígidas. Sin ordenación en colas

Tabla 6.6 Tiempos. 3º Escenario. Con roturas. Metodología Mejorada. Rutas flexibles. Sin ordenación en colas

Tabla 6.7 Tiempos. 3º Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. Variando el número de pallets. Sin ordenación en colas

Tabla 6.8 Tiempos. 3º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles. Variando el número de pallets . Sin ordenación en colas

Tabla 6.9 Tiempos de respuesta. 3º Escenario. Monoprogramación / Paralelo. Sin roturas. Rutas rígidas. Variando el número de pallets en el sistema. Sin ordenación en colas

Tabla 6.10 Tiempos de respuesta. 3º Escenario. Monoprogramación / Paralelo. Sin roturas. Rutas Flexibles. Variando el número de pallets en el sistema. Sin ordenación en colas

Tabla 7.1 Resumen y comentarios

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Relación entre flexibilidad y productividad en los sistemas productivos
- Figura 1.2 Características de la fabricación tradicional y de las nuevas tendencias
- Figura 2.1 Parte operativa y parte de control en los SFF
- Figura 2.2 Clasificación de la problemática en los SFF
- Figura 3.1 Esquema de la metodología propuesta
- Figura 4.1 Esquema de los elementos del primer escenario
- Figura 4.2 Descripción de las rutas flexibles
- Figura 4.3 Distancia entre estaciones del primer escenario
- Figura 5.1 Esquema de los elementos del segundo escenario y su distribución
- Figura 6.1 Esquema de los elementos del tercer escenario y su distribución
- Figura 6.2 Esquema del funcionamiento en paralelo

1.- INTRODUCCIÓN.

Las tendencias mas recientes del mercado como el aumento de la variedad de productos demandados, acortamiento de los ciclos de vida de los productos y el aumento de la competencia, hacen que las empresas para sobrevivir tengan que responder con agilidad a estos cambios en el mercado. El acelerado desarrollo de las tecnologías de la información (electrónica, informática, robótica, etc), han permitido implementar sistemas productivos automatizados flexibles, capaces de responder de forma efectiva a estos cambios mencionados.

Los Sistemas de Fabricación Flexible (SFF) se enmarcan dentro de la tendencia general a automatizar los procesos productivos. Los SFF son capaces de producir eficientemente series cortas de una gran variedad de productos y con una gran versatilidad en las operaciones a realizar y en las cantidades a producir, permitiendo una rápida adaptación a las situaciones cambiantes del mercado. Intentan recoger la flexibilidad de los talleres convencionales y de las Máquinas de Control Numérico (MCN) y la gran eficiencia de las líneas transfer. Como puede verse en la figura 1.1, y atendiendo a criterios de flexibilidad y productividad, se pueden encajar cada una de las tecnologías como se indica.

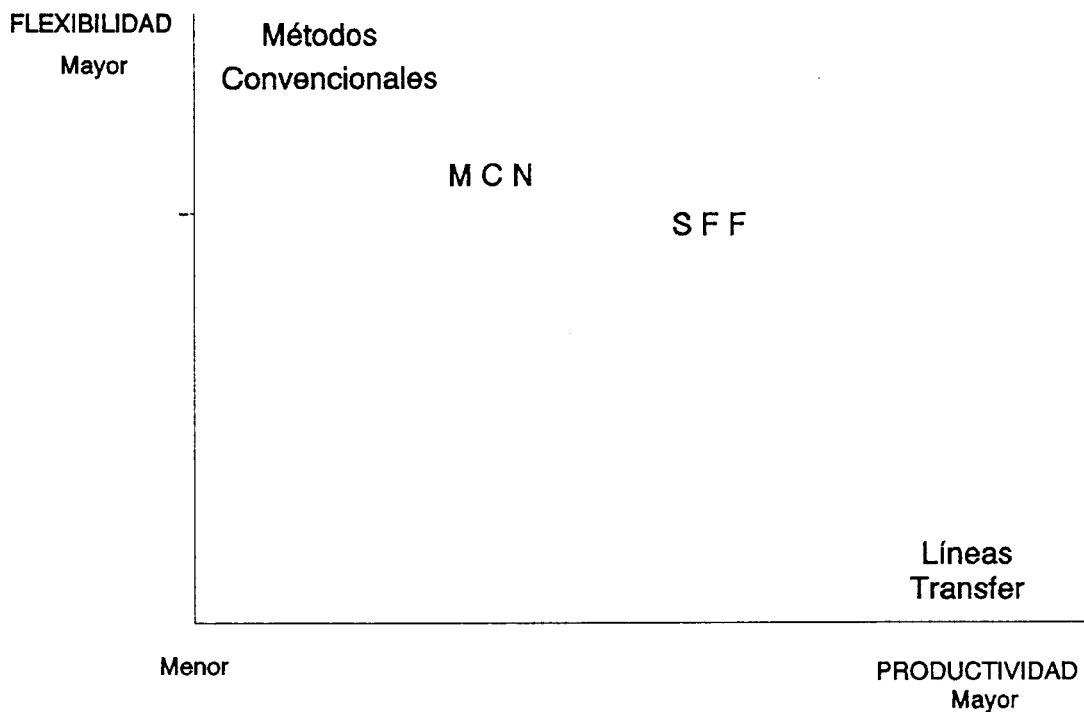


Figura 1.1 Relación entre flexibilidad y productividad en los sistemas productivos

Un sistema de fabricación flexible es un sistema integrado por un conjunto de máquinas herramientas, un sistema de transporte y almacenaje de material y ordenadores de control. Así pues, en un SFF existen:

1. Estaciones de trabajo (en la mayoría de los casos, máquinas herramientas de corte de material o estaciones de inspección) que tienen un cierto grado de flexibilidad. En particular, no requieren un tiempo significativo para el cambio de configuración del sistema (puesta a punto) entre trabajos diferentes.

2. Sistema de transporte automatizado, y lo suficientemente flexible para permitir a los trabajos en curso moverse a través de cualquier secuencia deseada de estaciones de trabajo, a este sistema se le denomina también sistema de manipulación de materiales (SMM), que incluye: sistema de transporte de piezas y herramientas, Sistema de almacenaje de piezas y herramientas y elementos auxiliares de manutención (paletización de piezas y fijación de herramientas).

3. Una red de ordenadores de control, entre cuyas tareas se pueden incluir las de monitorizar y controlar el flujo de trabajos y el estado de los mismos dentro del sistema.

Por otro lado, puede decirse que un SFF es un sistema productivo automatizado que muestra un notable grado de flexibilidad en su funcionamiento. La cuestión es lo que se entiende por flexibilidad. El concepto de flexibilidad es difícil de definir. Diferentes autores definen de forma distinta los diferentes aspectos que afectan a la flexibilidad de un sistema productivo, pero básicamente los conceptos a considerar pueden ser:

Flexibilidad de máquina: la facilidad de realizar los cambios en las máquinas (cambio de herramientas, etc), para realizar distintas operaciones sobre las mismas o distintas piezas.

Flexibilidad de proceso: la posibilidad de fabricar simultáneamente diferentes tipos de piezas.

Flexibilidad de operaciones: la posibilidad de intercambiar el orden de varias operaciones para la producción de una pieza.

Flexibilidad de producto: la posibilidad de producir un nuevo producto de forma económica y rápida.

Flexibilidad de rutas: la posibilidad de fabricar las piezas en diferentes estaciones, pudiendo continuar la fabricación de una pieza aún en el caso de que se produzca la rotura de una máquina.,

Flexibilidad de volumen: La posibilidad de utilizar eficientemente el sistema bajo diferentes volúmenes de producción.

Flexibilidad de expansión: la facilidad o posibilidad de expandir a largo plazo el sistema si las circunstancias lo requieren.

Flexibilidad del manejo de materiales: el conjunto de posibilidades de transporte y almacenaje de los materiales en el taller.

Flexibilidad de producción: esta relacionada con el universo de diferentes piezas que el sistema puede producir.

Flexibilidad de programación: la capacidad del sistema de funcionar de forma desasistida durante un determinado intervalo de tiempo.

Flexibilidad de mercado: la capacidad de la empresa de adaptarse a las condiciones cambiantes del mercado.

Entre los sistemas automatizados de fabricación de tipo flexible, se pueden distinguir según Browne et al (1984):

- Célula de Fabricación Flexible (CFF), que es el caso más simple y que consta de una maquina de control numérico, de propósito general, conectada con un SMM.

- Sistema de Fabricación Flexible (SFF), que debe permitir el control on-line y en tiempo real de la producción del sistema y la existencia de rutas alternativas.

- Línea Transfer Flexible: esta configuración es similar a la líneas transfer, pero se le dota de cierto grados de flexibilidad, aunque suelen tener una única ruta de fabricación por pieza y el tratamiento de las roturas de máquinas-es muy limitado.

- Múltiples Líneas Transfer Flexibles: que son varias líneas transfer, como las mencionadas en el caso anterior, interconectadas entre sí.

Para entender mejor cual es el entorno y las características de la fabricación flexible, es útil compararla con la fabricación convencional. La figura 1.2, extraído de Ferré (1988), muestra las diferencias más significativas. La comparación de las dos columnas da una idea del profundo (y acelerado) proceso de cambio que están sufriendo los sistemas productivos en este último cuarto del siglo XX, cuyas causas ya se han comentado anteriormente.

Fabricación Tradicional

Variedad limitada de productos
Diseños de larga vida para los productos
Grandes factorías
Plantas centralizadas
Stock para desacoplar etapas del proceso
Proceso por lotes
Flujos regulares
Cadenas equilibradas
No dejar que se pare el trabajo
Inspección de calidad
Enriquecimiento del puesto de trabajo
La concentración como concepto organizativo
Gestión con información por excepción
Economía de escala
Costes variables
Mano de obra intensiva

Fabricación Nuevas Tendencias

Gran variedad de línea de productos
Rápido cambio del diseño de los productos
Plantas más pequeñas
Plantas descentralizadas
Stock cero
Flujo continuo
Flujos irregulares
Producción bajo demanda
Mantener los equipos
Hacerlo bien la primera vez
Operaciones sin personal
Plantas multimisión
Gestión intensiva en información
Economía de variedad
Costes de conjunto
Capital intensivo

Figura 1.2 Características de la fabricación tradicional y de las nuevas tendencias

Por otro lado, las profundas diferencias entre ambos escenarios, sugieren que probablemente las herramientas y enfoques de gestión que se adoptan en un caso, no van a ser directamente transplantables a los SFF.

A tenor de las características específicas de los SFF, y de su forma de comportamiento, las ventajas potenciales que presenta la introducción de un SFF, y que pueden justificar su introducción en una empresa pueden ser:

- Aumento de la capacidad de respuesta ante cambios de la demanda.
- Facilita la introducción de nuevos productos.
- Aumento de la tasa de producción.
- Reducción de inventarios.
- Reducción de los tiempos de fabricación.
- Aumento de la calidad.
- Disminución del coste de personal.

2.- PROBLEMÁTICA DE UN SFF Y ESTADO DE LA CUESTIÓN.

Los SFF plantean problemas tanto técnicos como organizativos que requieren un gran esfuerzo tanto en la implementación como en la operación. Según Froment y Lesage (1988), de forma general, todo sistema automatizado se puede descomponer en dos partes complementarias, y a las que denomina respectivamente control y operación como puede verse en la figura 2.1.

La operación es el proceso físico que actúa sobre los productos a fabricar. El control es el dispositivo que elabora las ordenes destinadas al proceso y las señales de visualización, en función de la realimentación del sistema, para controlar el mismo.

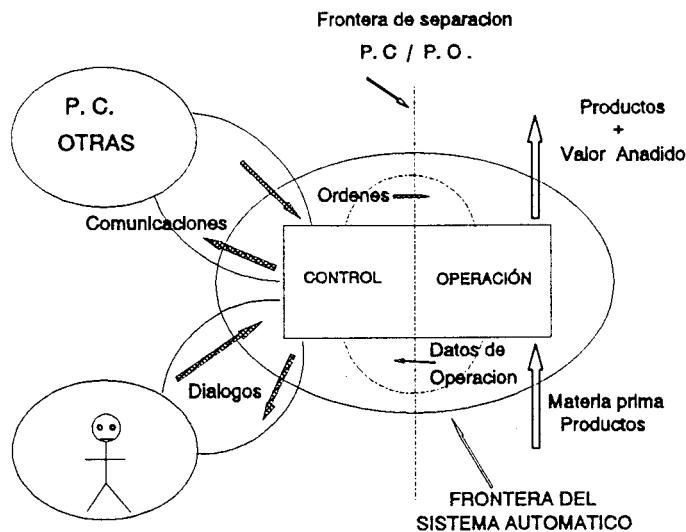


Figura 2.1 Parte operativa y parte de control en los SFF

El trabajo de investigación que se ha realizado se incluye dentro de la faceta que se ha mencionado como control, en el entorno "software" del sistema automatizado.

Dada la cantidad de decisiones interrelacionadas que se han de tomar para implantar y gestionar un SFF, es necesario hacer una clasificación de estas decisiones.

En este capítulo, se va a estudiar en primer lugar las diferentes clasificaciones de la problemática propuesta por diferentes autores y en segundo lugar se hará un repaso a la bibliografía disponible sobre SFF.

2.1 CLASIFICACIONES DE LA PROBLEMÁTICA.

Según Van Looveren et al (1986) la gestión de un SFF puede descomponerse en tres niveles, cada uno de los cuales va a imponer restricciones a los niveles de orden inferior como puede verse en la figura 2.2.

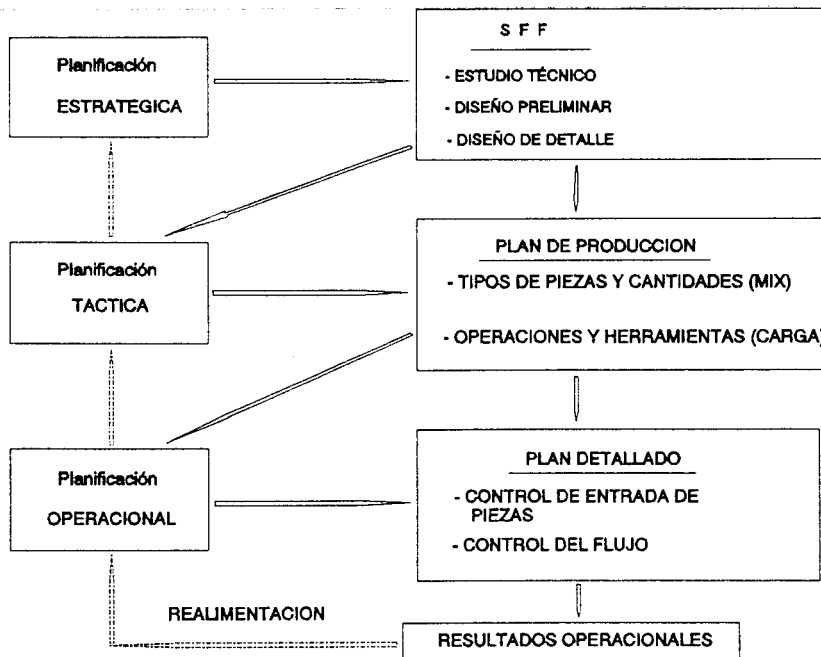


Figura 2.2 Clasificación de la problemática en los SFF

Nivel estratégico: en este nivel se pueden distinguir entre diseño técnico y diseño económico. Los criterios técnicos se inician con la definición del espectro de familias de piezas que se desea producir y que definirían los requerimientos iniciales que van a afectar a la instalación de un sistema, es por lo tanto un aspecto vital, ya que compromete a la empresa cara al futuro. Se trata pues de requerimientos técnicos para asegurar la factibilidad del sistema (espectro de piezas a fabricar, requerimientos mecánicos, características técnicas, ...).

No es suficiente asegurar la factibilidad técnica del sistema, ya que dado el gran coste que supone la implantación de un sistema de esta clase habrá que tener en cuenta criterios económicos, que afectan al diseño final del mismo.

Dentro de los criterios económicos se pueden distinguir dos fases: la primera fase denominada fase de **diseño preliminar**, consiste en una selección preliminar donde se especificarían factores económicos, ratios de producción, etc. Después de este proceso de selección inicial sólo nos quedarían unas cuantas alternativas.

En la segunda fase, fase de **diseño de detalle**, se elige una de las alternativas que se han elaborado, y que cumple de manera mas completa los objetivos que la empresa se marca. El diseño preliminar es completado y refinado hasta que su nivel de definición permita la contratación de la implementación del sistema.

Nivel táctico: Está relacionado con las decisiones a medio plazo. Se refiere a organizar la producción para satisfacer la demanda. Se puede subdividir en dos fases:

En la primera fase, **se seleccionan las piezas y cantidades a producir** (mix de piezas). Se trata de dar respuestas a cuestiones como: que tipos de piezas producir, que cantidad de los diferentes tipos de piezas, que porcentaje o número de veces se debe seguir cada posible ruta de fabricación, etc.

En la fase de **selección de operaciones y herramientas**, se trata de asignar las operaciones que se van a realizar en cada una de las máquinas y consecuentemente las herramientas con las que se debe dotar cada máquina.

Nivel operacional: estudia las decisiones de corto plazo a tomar normalmente en tiempo real. Se pueden distinguir dos tipos de problemas:

El **control de entrada de piezas**, controla el flujo de entrada de piezas en el sistema, teniendo presente la asignación que se ha realizado previamente de los recursos disponibles del sistema, para las piezas que hay que fabricar y según el estado del sistema en cada instante.

El **control de flujo**, trata de controlar el flujo de las distintas piezas una vez que están dentro del sistema. Se deberán tomar algunas decisiones tales como: qué máquina seleccionar en caso de que haya varias máquinas alternativas que puedan realizar la próxima operación, qué buffers seleccionar en caso de que una pieza deba esperar, qué robot o dispositivo de transporte se asigna para mover una pieza en un momento determinado, etc.

Kusiak (1986) basándose en los componentes tecnológicos y la interrelación entre los mismos, clasifica todos los SFF posibles en cinco categorías:

- Modulo de Fabricación Flexible.
- Célula de Fabricación Flexible.
- Grupo de Fabricación Flexible.
- Sistema de Producción Flexible.
- Línea de Fabricación Flexible.

Y la problemática que en ellos se presenta las clasifica en dos grandes grupos:

Problemas de diseño:

- Justificación económica
- Selección de piezas a fabricar
- Selección de máquinas herramientas
- Selección del sistema de almacenaje
- Selección de Pallets y utillajes
- Selección del Software y hardware
- Distribución en planta e integración

Problemas de planificación:

- Nivel 1. Programación de detalle:
 - Máquinas
 - Vehículos de transporte
 - Pallets y utillajes
 - Herramientas
 - Robots

- Nivel 2. Planificación desagregada:
 - Tipos de piezas y cantidades
 - Operaciones y herramientas en máquinas

- Nivel 3. Agrupación de recursos:
 - De piezas en familias
 - De máquinas en células de Fabricación

- Nivel 4. Planificación agregada

Kouvelis (1992) propone la clasificación de los diferentes problemas en dos grandes grupos:

Problemas de Diseño:

- Configuración óptima de diseño (determinación del número y tipo de máquinas, nivel de inventario en proceso ...)
- Especificaciones de la distribución en planta.
- Especificaciones del sistema de almacenamiento (tamaño de los Buffers locales y/o almacenamiento central).
- Especificaciones del tipo y capacidad del sistema de manejo de materiales (vehículos guiados automáticamente, robots, etc).
- Determinación de otros importantes recursos del sistema (nº de pallets, nº y tipos de elementos de fijación, etc).

Problemas de Planificación:

- Selección del tipo de piezas y cantidades.
- Agrupación de máquinas.
- Problema de asignación de operaciones y herramientas de corte asociadas, etc).
- Problema de selección de rutas para los diferentes tipos de piezas.
- Otros problemas de planificación (asignación de pallets y elementos de fijación entre las piezas seleccionadas, almacenamiento de piezas, etc).

Stecke (1981) considera únicamente el nivel táctico correspondiente a la planificación de la producción de un SFF. Según esta autora se pueden definir los siguientes problemas:

1. Problema de selección de los tipos de piezas: Consistente en determinar el grupo o conjunto de piezas a procesar más inmediatamente.

2. Problema de agrupación de máquinas. Consistente en dividir las máquinas en grupos, de tal forma que cada máquina de un grupo particular está capacitada para realizar el mismo conjunto de operaciones.

3. Problema de ratios de producción, esto es determinar las proporciones relativas en las que deben producirse los diferentes tipos de piezas que se han seleccionado en el primer paso.

4. Problema de asignación de recursos: Asignar los recursos limitados del sistema (por ejemplo pallets, fijaciones) en base a los ratios de producción que se han fijado en el paso anterior.

5. Problema de carga: Asignar las operaciones que van a realizar cada máquina o grupo de máquinas y las herramientas que estas operaciones requieren, en función de las piezas que se van a producir y según la agrupación de máquinas que se había definido en el paso 2, sujetos a las restricciones tecnológicas y de capacidad del SFF.

Gross (1987) considera tanto problemas tácticos como operacionales. Establece tres niveles:

1º Nivel: se plantea el objetivo de conseguir la producción de las piezas demandadas, en un tiempo mínimo. En función de este objetivo obtiene la puesta a punto del sistema y cual es la proporción relativa de cada tipo de pieza a fabricar.

2º Nivel: control de la entrada de piezas. Se determina el orden en que las piezas van a entrar en el sistema.

3º Nivel: carga de piezas en el sistema, esto es, decidir que piezas van a tener preferencia cuando compitan por recursos del sistema con otras piezas existentes.

Gunasekaran et al (1993) aparte de presentar las clasificaciones que sobre la problemática de los SFF hacen algunos autores de los mencionados anteriormente, hace un repaso de la bibliografía sobre SFF, proponiendo la siguiente clasificación de la problemática de los mismos:

- Selección de equipos
- Sistema de manejo de materiales
- Cuestiones relacionadas con la mano de obra en los SFF
- Cuestiones relacionadas con la implementación de un SFF
- Planificación agregada de la producción
- Problema de agrupación de recursos
- Determinación del ratio de producción
- Problema de asignación de recursos y de carga de máquinas
- Medida de la flexibilidad y del rendimiento operativo

2.2 ESTADO DE LA CUESTIÓN.

Debido a la extensa literatura publicada sobre SFF, y con el ánimo de seleccionar y estructurar aquella que se ha considerado más interesante, se van a establecer cuatro grandes grupos, dentro de los cuales, se van a catalogar las distintas publicaciones.

Así, se considera un primer grupo, constituido por publicaciones de carácter divulgativo y otras que tratan temas muy variados y de carácter general. Se ha procurado incluir los más recientes, ya que serán los que den una visión mas actualizada de cómo se encuentra en la actualidad este área.

En un segundo grupo, vamos a encuadrar aquellas que abordan a fondo la problemática relacionada con lo que se denominó en el epígrafe anterior como nivel estratégico, y que estudian problemas tales como el diseño de la configuración física y selección del sistema a implantar. En un tercer grupo, las publicaciones que se centran en las cuestiones de nivel táctico. Y por último, un cuarto grupo que abarcará aquellos trabajos dedicados a profundizar en el nivel operacional, es decir la problemática relacionada con el control del flujo del taller.

Esta clasificación, aunque útil, no es perfecta, ya que existen artículos, que tratan de forma conjunta varios problemas de decisión, especialmente tácticos y operacionales.

2.2.1 Trabajos genéricos.

Zelenovic (1982) fue uno de los primeros investigadores en abordar los cambios que se han producido tanto en las necesidades de los consumidores, como en la estructura de los sistemas de producción. Las exigencias hacen de la flexibilidad en todas las áreas de la estructura del sistema productivo una necesidad imperiosa. Propone formas de medir el grado de flexibilidad y la incidencia de esta sobre la productividad.

Browne et al (1984) analizan el concepto de flexibilidad aplicado a distintos aspectos. Asimismo presentan una clasificación de los sistemas productivos basados en automatización flexible.

Gustavsson (1984) presenta una visión del impacto de las nuevas tendencias del mercado sobre los procesos de producción tradicionales, que implican una mayor automatización y mecanización. Propone diversos métodos para evaluar el grado de flexibilidad y las estrategias para poder conseguir esta flexibilidad. Así mismo menciona el conflicto que puede presentarse entre flexibilidad y productividad.

Hutchinson (1984) estudia la influencia de las nuevas tendencias del mercado y las necesidades de nuevos sistemas de producción, para responder a estas tendencias con gran capacidad de adaptación. Aborda la posibilidad de mejorar los resultados de los sistemas convencionales, en los cuales estima que sólo se aprovecha un 6 % de la capacidad potencial, debido a vacaciones, infrautilización del segundo y tercer turno, etc.

Warnecke et al (1985) presentan la influencia que las nuevas tendencias del mercado, han tenido en las nuevas formas de producir, y la solución que representan los SFF. Describe brevemente algunas aplicaciones en particular, tanto en el ámbito de la fabricación como del ensamblaje.

Goldhar (1985) estudia el impacto de la introducción del CIM (Computer Integrated Manufacturing) y de los computadores en general, sobre los procesos tanto productivos como de gestión. También aborda el estudio de los cambios en los conceptos tradicionales de producción. Expone las ventajas potenciales de la economía de variedad (producir series cortas de productos de forma económica), que se produce en los SFF frente a la economía de escala.

Según Branam (1985) la introducción de los SFF mejora la productividad de un taller, reduce el tiempo de puesta a punto, reduce el tamaño del lote y el tiempo del ciclo de producción de la pieza. La reducción del tamaño del lote a uno supone la simplificación del plan maestro de producción y del programa de requerimientos de materiales, así como la programación y seguimiento del taller. Esta simplificación, dada la propia naturaleza de los SFF, elimina las necesidades de ordenes de trabajo. Elimina la mayor parte del trabajo directo, la economía de escala y las desviaciones de tiempos respecto a los previstos.

Van Looveren et al (1986), proponen una clasificación muy útil de la

problemática que se presenta en los SFF y hace un repaso de las herramientas que han utilizado distintos autores hasta esa fecha, para resolver distintos problemas.

Buzacott y Yao (1986) hacen un breve repaso a los modelos analíticos que se habían desarrollado hasta ese momento sobre SFF. Opinan que mientras los modelos de simulación son más valiosos cuando se trata de evaluar un sistema concreto y específico, los modelos analíticos son superiores por las conclusiones más generales que pueden suministrar.

Jaikumar (1986) presenta un trabajo en el que analiza los efectos de la introducción de los SFF en empresas japonesas y Americanas. En Japón, la gestión y planificación de los nuevos sistemas se ha hecho teniendo presente las características específicas (sobre todo en lo referente a la flexibilidad) de las nuevas tecnologías. En USA se han seguido aplicando los métodos convencionales de talleres con alto grado de automatización o de líneas transfer, desaprovechando las ventajas potenciales que conllevan los SFF. Observa que para los SFF, tanto el personal asignado a los nuevos sistemas, como la gestión y planificación de las nuevas tareas relacionadas con los mismos, deben realizarse con un nuevo estilo y según nuevos métodos específicos relacionados con las capacidades y posibilidades de las nuevas tecnologías.

Kusiak (1986) presenta una clasificación de los sistemas de fabricación de tipo flexible. Además elabora un esquema de los problemas que se han de resolver en todos los SFF y hace un breve repaso de las herramientas que han utilizado distintos autores para abordar estos problemas.

Branam (1986), plantea la oportunidad de introducir el JIT (Just In Time) o los SFF. El JIT es una filosofía de organización aplicable a la mayoría de los sistemas existentes, mientras que el SFF incorpora esta filosofía pero con un alto grado de automatización e integración. La implantación del JIT requiere la formación y el entrenamiento del personal, mientras que el SFF requiere además una fuerte inversión inicial. Concluye que las ventajas que aporta el SFF a largo plazo pueden forzar a las empresas a su introducción por presión competitiva.

Ferré (1988) aborda el estudio de los SFF, desde un punto de vista general. Se entra más a fondo sobre los distintos componentes y la problemática que presentan dichos sistemas, tanto desde un punto de vista mecánico como de planificación, pero tratados de forma meramente descriptiva.

Froment et al (1989) hacen un enfoque similar al de Ferré (1988), pero de una forma más estructurada y haciendo especial hincapié en los aspectos mecánicos, describiendo de una forma mas detallada los distintos dispositivos y mecanismos que intervienen en este tipo de sistemas.

Gupta y Somers (1992) pasan revista a los trabajos publicados hasta esa fecha sobre la flexibilidad en un SFF. Presentan algunas consideraciones sobre las ventajas competitivas que representa la flexibilidad de los SFF y las nuevas estrategias que pueden adoptarse a la hora de competir. Resalta que las ventajas

que representan estos sistemas no se aprovechan en su totalidad.

Martínez (1993), presenta un trabajo sobre diversas experiencias en empresas españolas, que han optado por introducir robots o SFF en sus procesos productivos. Presenta los resultados obtenidos en un trabajo de campo y el análisis estadístico del mismo, haciendo énfasis en el efecto que sobre las variables más importantes: productividad, costes, nivel tecnológico, etc han tenido la introducción de dichas tecnologías.

Gunasekaran et al (1993) hacen una revisión de la literatura publicada hasta esta fecha sobre la problemática y su clasificación en los SFF, así como los diferentes modelos que se han utilizado para abordar dicha problemática. Ponen de manifiesto las limitaciones que presentan los modelos teóricos desarrollados a la hora de aplicarlos a sistemas reales, debido a la carencia de integración suficiente entre los distintos subsistemas que integran un SFF. Propone algunas líneas de trabajo para superar estas deficiencias.

2.2.2 Trabajos sobre el nivel estratégico.

Vinod y Solberg (1984) estudian el comportamiento de un SFF, en el que se pueden producir roturas de máquinas. Utilizan para este estudio un modelo de red cerrada de colas.

Arbel y Seidmann (1984) abordan el problema de seleccionar el SFF mas conveniente de entre los posibles candidatos. Utilizan para ello un modelo jerárquico, que va desde un nivel agregado a otros niveles más desagregados. En cada uno de los niveles se tienen en cuenta los parámetros mas importantes. Al final de las sucesivas evaluaciones, quedarán los dos sistemas mejor situados. Este modelo permite tener presente las opiniones de expertos de distintas áreas de la empresa, aunque no tengan una gran experiencia específica en este tipo de tecnologías.

Steudel y Berg (1986) tratan de evaluar el efecto de la implementación de una CFF dentro de un taller convencional. Utilizan un modelo de simulación para observar el efecto de algunas variables importantes (ratio de llegada de trabajos, niveles de mano de obra, etc.).

Dallery y Frein (1988) estudian la cuestión, de encontrar la configuración de coste mas bajo, esto es, determinar el número de recursos de cada tipo (máquinas, transportes, pallets,...), de forma que se satisfaga una tasa agregada de producción. Modela el problema mediante una red cerrada de colas. El procedimiento propuesto, parte de una solución heurística y a partir de ésta se obtiene la solución óptima.

Alberti et al (1988) abordan la necesidad de una planificación efectiva de los costes, así como el control del sistema, en un entorno de producción altamente competitivo. El tratamiento habitual de economía de escala para el análisis de costes no es muy adecuado para la nueva estructura de costes de producción en entornos altamente automatizados. Proponen un procedimiento para la estimación del coste

unitario de fabricación en los SFF.

Dallery y Stecke (1989) intentan determinar la configuración óptima de un taller. Para ello utilizan un modelo de red cerrada de colas, con un enfoque de descomposición del problema global en un subconjunto de problemas más sencillos de resolver.

Alberti et al (1989) presentan una estimación del coste de producción en un SFF. Definen para ello un índice de eficiencia y utilizan un algoritmo de red cerrada de colas como soporte para una rápida evaluación de este índice definido. Recalcan la necesidad de integrar planteamientos técnicos y económicos.

Heungsonn et al (1991) consideran el problema de determinar el mínimo coste de configuración (número de máquinas, de pallets, ...) para un SFF, para un rendimiento exigido y con una carga de trabajo determinado para cada máquina.

Gupta et al (1993) abordan el problema de satisfacer la demanda de dos tipos de productos, que pueden producirse mediante un sistema flexible, o con dos sistemas dedicados a cada uno de esos tipos de productos, o bien, utilizando ambos tipos de sistemas, flexible y dedicados. Plantea ambos modelos para el caso de demanda determinista y estocástica. Emplea para su resolución herramientas analíticas y de programación matemática. Propone las decisiones a adoptar en función de los valores de los parámetros más importantes que definen los distintos escenarios.

Rajagopalan (1993), utiliza la programación lineal mixta para abordar la elección de tecnología flexible o dedicada, a la hora de expandir un sistema de producción en un entorno con varios tipos de familias de productos y con demanda no decreciente. De los resultados de la experimentación, deduce que a igualdad de condiciones, la adquisición de tecnología flexible se incrementa con la disminución de la economía de escala, correspondiente a series más cortas de producción.

Raghav et al (1993) proponen un modelo para diseñar y evaluar sistemas de automatización flexibles. El problema es modelado mediante programación matemática y a partir de una serie de datos de entrada como: familia de piezas, datos sobre la configuración física, etc, suministra una solución con distintos grados de detalle y que contiene múltiples criterios de evaluación de inversiones, análisis de sensibilidad. etc.

Tetzlaff (1994) se plantea el problema de determinar la configuración que debe tener un SFF. Modela el problema mediante teoría de redes de colas, considerando el throughput como el objetivo a maximizar, teniendo en cuenta una restricción presupuestaria asociada al coste de los recursos (máquinas, vehículos de transporte y pallets). Analiza diferentes escenarios y propone usar un criterio de asignación marginal.

2.2.3 Trabajos sobre el nivel táctico.

Nof et al (1979) presentan un estudio de simulación que muestra el efecto que las decisiones referentes a cuestiones tácticas y operacionales tienen sobre la eficiencia de un SFF.

Stecke y Solberg (1981) presentan un estudio, aplicado a un sistema real, de las políticas de carga de máquinas (asignación de operaciones y herramientas a las máquinas) y del control del flujo en tiempo real.

Kobayashi y Gerla (1983) proponen un algoritmos para asignación óptima de rutas mediante un modelo de red cerrada de colas. El objetivo es maximizar la tasa de producción total del sistema. Aunque lo aplica a un sistema de red de telecomunicaciones, el algoritmo es directamente aplicable a un SFF.

Stecke (1983) plantea varias formulaciones alternativas (de tipo Programación no lineal mixta) del problema de agrupación de máquinas y asignación de operaciones y herramientas a cada máquina. Proponiendo algunos métodos para linealizar el problema en orden a facilitar su resolución.

Shanker y Tzen (1985) consideran que el problema de programación de un SFF esta constituido por el problema de asignación de operaciones a máquinas y el control del flujo posterior dentro del sistema. Plantea el problema de asignación de operaciones con dos objetivos: equilibrar la carga de trabajo y minimizar el número de trabajos retrasados. Modela el problema mediante programación mixta y proponen sendos algoritmos heurísticos, comparando mediante simulación dichas heurísticas en conjunción con diferentes reglas de envío de trabajos (fifo, spt, etc.)

Carrie y Perera (1986) presentan un estudio de las consideraciones acerca de la utilización de utillaje. Muestran las restricciones que sobre la planificación de un SFF presenta la necesidad de una gran variedad de herramientas. Utilizan modelos de programación lineal y de simulación para el estudio del problema que abordan. Y lo aplican sobre un SFF real.

Maimon y Choong (1986) estudian un SFF formado por varias líneas flexibles de producción que pueden fabricar en paralelo un mismo tipo de pieza. Se plantean el objetivo de mejorar la eficiencia del taller y para ello se inclinan por equilibrar la carga de trabajo de las diferentes líneas. Para conseguir dicho equilibrio proponen un modelo de programación dinámica que seleccione en tiempo real cual de esas líneas de producción se debe seleccionar para fabricar cada pieza en función del estado del taller (máquinas averiadas, carga en cada instante de cada línea, coste asociado al transporte de las piezas dentro del sistema, etc).

Berrada y Stecke (1986) abordan el problema de asignar a cada máquina el conjunto de operaciones, y herramientas asociadas, para producir un conjunto de piezas previamente seleccionadas. De entre los objetivos alternativos con los que se pueden plantear el problema, eligen el de equilibrar la carga de trabajo de todas las máquinas. Modelan el problema mediante programación entera y proponen un

método de exploración dirigida para resolverlo.

Greene y Sadowski (1986) abordan el problema de asignación de trabajos y la correspondiente planificación de la producción de un conjunto de células de fabricación flexible que reciben las piezas de una cola común. Modelan el problema mediante programación mixta, variando el criterio de optimización con el que se resuelve el modelo (minimizar el tiempo de producción, minimizar el tiempo de flujo medio y minimizar el tiempo medio de retardo).

Yao y Pei (1988) proponen un procedimiento de selección dinámica de rutas que siguen las piezas en un SFF. Para cuantificar la flexibilidad, desarrollan una medida de la entropía, que incorpora la ruta a seguir por la pieza y las características de las máquinas que contribuyen a la flexibilidad de la ruta. Basado en esta medida propuesta y en el principio de mínima reducción de entropía, establecen dos reglas operativas, una de selección de operaciones y otra de selección de máquinas.

Kumar (1988) utiliza la teoría de la información para medir la flexibilidad de un SFF. Estudia la relación entre flexibilidad y entropía (definida como una medida de la incertidumbre o impredecibilidad del estado del sistema). Modela el problema mediante la teoría de red cerrada de colas. Utiliza la entropía para seleccionar la próxima operación a realizar a una pieza.

Schriber y Stecke (1988) abordan el problema de seleccionar el mix de piezas que equilibra las cargas de trabajo y que mejoran la utilización del sistema. Utilizan modelos de simulación de varios SFF ficticios y comparan los resultados con los que se obtenían en otro estudio anterior y en el que se resolvía el problema de forma estática mediante programación matemática.

Avonts et al (1988) estudian el problema que se presenta en un entorno real, donde existen un SFF y un taller convencional. La cuestión radica en decidir que piezas se deben producir en el SFF, sabiendo que el resto de las piezas se deberán producir en el taller convencional. Modelan el problema mediante programación lineal y realizan un extenso conjunto de experimentos variando la función objetivo del problema.

Moreno y Ding (1989) abordan el problema de asignación de herramientas y selección del tipo de piezas para un SFF. Propone un método heurístico.

Afentakis et al (1989) abordan el problema que se presenta cuando el número de tipos de piezas a fabricar en un SFF es muy grande y para cada uno de estos tipos se demanda una gran cantidad de las mismas. En estas condiciones puede ocurrir que la mejora esperada con la introducción de un SFF no se produzca. La solución que proponen para este caso es utilizar los conceptos de tecnología de grupo. Abordan la formación de lotes de piezas que se debe hacer y utilizan dos métodos heurísticos para resolver este problema.

Mazzola et al (1989) examinan como se integra la planificación de la producción en un SFF en un entorno MRP. Presentan modelos de programación

matemática para resolver los problemas que presenta esta integración.

Schweitzer y Seidman (1989) abordan la optimización de un SFF, en el que se producen repetidas visitas de una misma pieza a una estación para que se realicen sobre ella trabajos diferentes. Utilizan para ello el modelo analítico del análisis del valor medio (MVA). El modelo matemático que plantea, busca minimizar el coste total esperado por unidad de tiempo, sujeto a una serie de restricciones tecnológicas, como el tiempo máximo y mínimo de cada operación, el máximo número de trabajos en curso que pueden estar en situación de espera en cada estación, etc.

Shanker y Rajamarthandan (1989) estudian el problema de carga en un SFF, con el objetivo de minimizar el movimiento de las piezas entre centros de mecanizado. Tratan de determinar el número de herramientas y el número de las diferentes clases de herramientas a ubicar en el almacén de herramientas de cada centro de mecanizado. El problema es formulado mediante programación no lineal entera y explota ciertas características especiales del problema. Utilizan la metodología de exploración dirigida para obtener la solución.

Sherali et al (1990) consideran un SFF e intenta resolver el problema, similar al que se presenta en un taller convencional, cuando al menos un cierto número de cada uno de los diversos tipos de trabajos, pueden realizarse en máquinas diferentes. Se intenta seleccionar un conjunto de trabajos para ser realizados con sus correspondientes rutas asociadas y programar sus operaciones en las máquinas minimizando el tiempo de fabricación. Proponen un modelo de programación matemática y un método heurístico.

Sawik (1990) propone la planificación jerarquizada de un SFF, que incluye los problemas de: selección del tipo de piezas, asignación de las operaciones a las máquinas y las herramientas requeridas, determinar la secuencia y el tiempo en que cada pieza entra al sistema, programación detallada de las operaciones. Los dos primeros problemas los resuelve mediante programación matemática. Para resolver los dos últimos problemas, que los considera más interrelacionados, utiliza algunas herramientas de programación matemática junto con algunas reglas heurísticas.

Kumar et al (1991) formulan un modelo de programación no lineal para la toma de decisiones con múltiples objetivos, aplicándola al problema de agrupación de máquinas y al problema de carga de un SFF.

Werra y Widmer (1991) abordan la cuestión de encontrar una adecuada carga de trabajo para cada máquina en cada período. Consideran el horizonte temporal dividido en un número de períodos, en los que no se produce ningún cambio de herramientas. La reasignación de herramientas se producen sólo al final de cada período. Modelan el problema mediante programación entera.

Schweitzer et al (1991) abordan diferentes problemas de decisión que se presentan en un SFF (nivel de trabajos en curso, selección de velocidad de corte de las herramientas, asignación de rutas a las piezas y de operaciones a máquinas,

etc). El problema de asignación de rutas y operaciones a las máquinas lo modelan utilizando la teoría de redes cerradas de colas, evaluando el throughput del sistema mediante análisis de valores medios.

Kouvelis y Lee (1991) se plantean simplificar el modelado del problema de asignación de operaciones a cada máquina y las herramientas que precisan. En principio la no linealidad y la naturaleza entera del problema, hacen que se requiera un tiempo excesivo de resolución incluso cuando se utiliza la exploración dirigida y para problemas de tamaño moderado. Por ello reformulan el problema desapareciendo la no linealidad, aunque aumenta el número de variables de decisión. La nueva formulación presenta estructuras angulares de bloques que permiten una resolución eficiente mediante exploración dirigida.

Chandra y Tombak (1992) evalúan la incidencia que puede tener la flexibilidad de ruta y de máquina en el diseño y gestión de los SFF, mediante un modelo de programación matemática.

Gómez (1992) plantea la elección de las diferentes rutas por la que se pueden fabricar los distintos productos en un SFF. Desarrolla un modelo heurístico basado en algoritmos genéticos y el análisis del valor medio y compara los resultados con los que se obtienen al aplicar el modelo desarrollado por Kobayashi y Gerla (1983).

Ghosh y Maimon (1992) plantean la planificación de un SFF mediante un modelo de flujo en red de múltiples etapas, períodos y productos. Modelan el problema mediante programación matemática, pero para la mayoría de los SFF más habituales resultan de una gran dimensión, por lo que utilizan la estructura de red para resolver el problema planteado de forma más eficiente, utilizando un procedimiento especial de descomposición.

Bernardo y Mohamed (1992) presentan un modelo de programación entera para determinar la carga de máquinas. Proponen dos funciones objetivos alternativas: minimizar los costes de inventario y maximizar las tasas de producción.

Wilson (1992) estudia el problema de asignación de herramientas para un SFF. Propone un algoritmo heurístico para la resolución de problemas de grandes dimensiones, modelados mediante programación entera.

Kirkavak et al (1993) parten de que es difícil implementar cualquier sistema de fabricación sin resolver sus problemas de diseño operacionales. Partiendo de esta hipótesis, modelan de forma integrada el problema de la configuración del sistema y la asignación de herramientas simultáneamente, mediante programación lineal mixta, utilizando para su resolución algunas reglas heurísticas.

Kim et al (1993) abordan el problema de asignación de operaciones y herramientas asociadas a cada máquina, con el objeto de maximizar el throughput del sistema para un mix de piezas dado. Proponen para su resolución un algoritmo basado en reglas heurísticas.

Liang et al (1993) proponen, para planificar la producción de un Sistema Flexible de Fabricación, un modelo de programación matemática que integra los problemas de selección de piezas y asignación de herramientas, ya que consideran que ambos problemas están íntimamente relacionados.

2.2.4 Trabajos sobre el nivel operacional.

Kimemia y Gershwin (1978) abordan la optimización del flujo de trabajos en una red, con el objeto de elegir el mejor mix de estrategias de operaciones. Definen una estrategia como la secuencia de operaciones requeridas para producir una pieza. Presentan un modelo, que resuelve el problema por descomposición del problema global en un conjunto de subproblemas. La solución consiste en la proporción óptima de cada tipo de pieza que debe ser producida bajo cada una de las estrategias posibles.

Seidmann y Schweitzer (1984) analizan el problema de selección de piezas en una CFF, que puede producir diferentes tipos de piezas. Formula el problema como un problema semimarkoviano no continuo de decisión.

Russel y Tanchoco (1984) evalúan varias reglas de envío de vehículos guiados automáticamente. Las medidas del comportamiento global incluyen tiempo de flujo medio y el ratio de utilización de las máquinas. Utilizan un modelo de simulación.

Yao (1985) estudia el flujo de material a través del sistema y los requerimientos para que una ruta se pueda considerar flexible. Aporta una medida de la flexibilidad de la ruta, definiendo el concepto de entropía de ruta y propone, que la elección de ruta siga el principio de menor reducción de entropía de ruta.

Carrie y Petsopoulos (1985) estudian el problema de la secuenciación de trabajos en un SFF. Estudian el impacto que sobre la eficiencia del sistema tienen varios parámetros. El primer parámetro es la flexibilidad que supone el que alguna o algunas máquinas puedan realizar un tipo de trabajo u otro, en un determinado intervalo de tiempo. El otro conjunto de parámetros que prueba son: la selección de una u otra ruta para fabricar una misma pieza, la disciplina de cola de los buffers intermedios, etc. El resultado que obtienen es que la flexibilidad que aporta el primer parámetro mejora de forma notable la eficiencia del sistema, mientras que el impacto del segundo grupo de parámetros no es tan grande.

Wilhelm y Shin (1985) presentan un estudio donde evalúan la influencia que podría tener la existencia de operaciones alternativas. Considera la posibilidad de que una operación alternativa pueda ser elegida, por ejemplo para evitar una larga cola de espera, aunque esta operación pueda ser efectuada por una máquina de una menor capacidad, lo que supondría en principio una penalización de tiempo. Utilizan un modelo de simulación para ver la incidencia que tienen distintas reglas de selección de las operaciones alternativas y compara los resultados con los que se obtienen en el caso de que no existan estas operaciones alternativas.

Maimon y Gershwin (1987) presentan un modelo de secuenciación en tiempo real para el envío de piezas en un SFF. Se basa en un trabajo realizado anteriormente por Kimenia y Gershwin (1978) en el que ya se incluía en los modelos las caídas de máquinas de forma aleatoria, y tiempo de puesta en marcha de las máquinas averiadas también aleatorio. En este estudio se completa además con la posibilidad de que diferentes máquinas puedan realizar las mismas operaciones pero empleando para ello tiempos distintos. El resultado será obtener en cada momento la pieza que entra al sistema, en función del estado de éste.

Gross (1987) utiliza herramientas de simulación y de inteligencia artificial para resolver diversas cuestiones que se presentan en un SFF: previsión de la demanda para su acomodo en el programa de producción del sistema, posibles políticas alternativas para ser aplicadas en el control del comportamiento del sistema, valoración de las potenciales consecuencias de cada política y selección de políticas a corto plazo a usar en la operación del SFF.

Sabuncuoglu y Hommertzheim (1989) estudian el efecto del número de piezas permitidos simultáneamente en un SFF. Examinan dicha cuestión suponiendo diferente número de máquinas, diferente número de vehículos de transporte y diferentes reglas de secuenciación. Utilizan el lenguaje de simulación SIMAN para modelar el sistema y el criterio de optimización consiste en minimizar el tiempo medio de residencia de las piezas.

Hutchison et al (1989) proponen un algoritmo de programación lineal mixta para la obtención de la secuencia de entrada de piezas y el momento en que deben de introducirse cada pieza en un entorno estático. Comparan los resultados obtenidos con los que se obtenían mediante el esquema de descomposición propuesto por este mismo autor en un trabajo anterior.

Davis y Jones (1989) estudian el papel de la simulación on-line en los SFF, como herramienta útil para elegir entre diferentes reglas alternativas de secuenciación. Observan que a menudo los resultados que ofrecen reglas alternativas son insignificantes, sobre todo cuanto más se aumenta el nivel de detalle y la complejidad del sistema simulado y disminuyen el número de reglas de secuenciación posibles.

O'Keefe y Rao (1992) aportan un estudio sobre métodos de entrada de piezas en un SFF. Comparan dos métodos dinámicos: el primero consiste en una simulación que se adelanta al funcionamiento futuro real del sistema y el segundo método es un método heurístico difuso, basado en reglas. Demuestran que ambos métodos son apropiados, pero cuando se producen cambios en el estado del sistema (caídas de máquinas, cambios en los requerimientos de producción, etc), la simulación que se adelanta en el tiempo supera al método basado en reglas heurísticas.

Chen y Sule Alfa (1992) estudian la selección de rutas de fabricación de las piezas dentro de un SFF con demanda dinámica. Proponen un algoritmo heurístico basado en el método de medias sucesivas y que ha sido usado con éxito en

problemas de asignación de rutas de transporte.

Agnētis et al (1993) abordan el estudio del flujo de un tipo de pieza, que requieren para su fabricación una secuencia de operaciones y recursos asociados. El problema que estudian es asignar los recursos y programar las operaciones para maximizar el throughput. Proponen como solución un algoritmo polinomial y lo aplican a algunos casos concretos.

Ishii y Talavage (1994) presentan un procedimiento basado en simulación off-line, para modificar de forma dinámica las disciplinas de cola utilizadas en un taller, haciéndolas además independientes para cada máquina. Compara los resultados que presenta este procedimiento con los que se obtienen si se utilizan siempre y en todas las máquinas la misma disciplina de cola para el período simulado.

Seidmann y Tenenbaum (1994) desarrollan políticas de asignación de piezas a un SFF con el objetivo de maximizar el Throughput del sistema. Plantean el problema mediante un modelo de red cerrada de cola y proponen varias políticas heurísticas.

2.2.5 Esquema resumen.

Para terminar vamos a presentar en un pequeño esquema todo el material que se ha referido en los párrafos anteriores, ordenado tanto por el área de estudio como por la metodología empleada. Los números que aparecen en cada cuadro hacen referencia al número con el que aparecen las publicaciones en el último apartado de este trabajo dedicado a las referencias bibliográficas.

	Programación Matemática	Teoría de colas	Simulación	Otros
Nivel estratégico: - Estudio Técnico - Diseño Físico - Selección del Sistema	32 33 60 61	3 5 19 80 78	77	4 18 79 88
Nivel táctico: - Tipos de Piezas y Cantidades(Mix) - Operaciones y Herramientas (Carga)	6 7 8 14 16 27 40 46 49 50 55 65 67 68 71 72 73 76 84	42 45 66 74 75	58	1 24 26 36 41 43 56 86
Nivel Operacional (Dispatching): - Control de Entrada de Piezas - Control de Flujo	35 52	70	20 28 51 59 62 63 64 85	2 13 17 37 39 53 69 87
Artículos divulgativos:	⊕ 10 11 12 15 21 22 23 25 29 30 32 34 38 44 47 48 54 57 80 82 83 89			

Tabla 2.1 Clasificación de los trabajos por niveles y herramientas utilizadas

3.- PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.

La investigación realizada se centra en la asignación a cada pieza de una ruta de fabricación, entre las posibles rutas alternativas para ese tipo de pieza. El problema se plantea a nivel operacional, ya que parece razonable retrasar tal asignación hasta el último momento, esto es, hasta su entrada en el sistema, para poder tener en cuenta el estado del sistema en ese instante. Se supone que previamente se ha determinado el orden de entrada de las piezas, así como los instantes en que ello va a ocurrir. La cuestión es cómo decidir entre las rutas alternativas que una pieza concreta pueda seguir. Es de esperar que el funcionamiento, en términos de eficiencia, del taller no sea insensible a tales decisiones, si bien es lógico pensar que las decisiones de nivel táctico (qué piezas y en que cantidades fabricar, como asignar las herramientas, etc) suponen restricciones que limitan la eficiencia que se puede conseguir a nivel operacional.

3.1 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.

El objetivo de la investigación realizada es desarrollar un procedimiento, que permita asignar las rutas de fabricación "en tiempo real", en base al impacto que sobre la evolución inmediata del sistema tal decisión tendría.

La metodología que se propone consiste en construir un modelo detallado de simulación del taller y utilizarlo para evaluar, partiendo de datos reales de la situación inicial y para cada ruta alternativa, cual sería la evolución del sistema si se elige dicha ruta. Este enfoque, que puede describirse con el concepto de "mirar hacia adelante", permite evaluar, usando un modelo de simulación, el impacto potencial a corto plazo de cada una de las rutas alternativas y elegir la más conveniente.

Aunque esta forma de asignar las rutas es claramente miope, se postula que su aplicación reiterada, aunque subóptima, permite una operación eficiente del taller a medio plazo. La mayor parte del trabajo experimental, que se describe en los siguientes capítulos, está orientado a comprobar esta hipótesis.

Antes de describir en más detalle el enfoque que se propone, conviene hacer algunas consideraciones:

1.- El empleo de la técnica de simulación supone que cada taller ha de tener un tratamiento específico, que refleje validamente las características concretas de su funcionamiento. Esto implica que no va a ser posible validar la metodología de forma general. Lo que se ha hecho es considerar tres escenarios experimentales distintos, que pueden considerarse simples y representativos de los SFF. Esta forma de validar la metodología desarrollada, si bien no da una validez general a la misma sí es en cambio utilizada por algunos autores (Ishii y Talavage 1994).

2.- La pretensión de retrasar la asignación de rutas hasta el instante más tardío posible y que la decisión se base en el estado del taller en ese momento, exige que, a cambio, el proceso de evaluación de las alternativas sea muy rápido. En este sentido, puesto que las diferentes alternativas son independientes entre sí,

es posible realizar las diferentes simulaciones en paralelo, partiendo, eso sí, todas ellas, de la misma situación inicial.

3.- No es que se proponga no planificar la selección de las rutas a nivel táctico, sino que, al ser dicha asignación agregada en el tiempo, es preciso decidir qué ruta concreta sigue cada pieza concreta. Tal asignación detallada conviene que se haga teniendo en cuenta sus efectos (necesariamente a corto plazo) sobre el funcionamiento del sistema.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL ENFOQUE PROPUESTO.

Como se ha mencionado anteriormente, se trata de un enfoque repetitivo, puesto que se hace para cada pieza que tiene que entrar en el sistema y en el momento en que accede al mismo. En la figura 3.1 los instantes en que dos piezas sucesivas acceden al sistema se han denominado t_1 y t_2 .

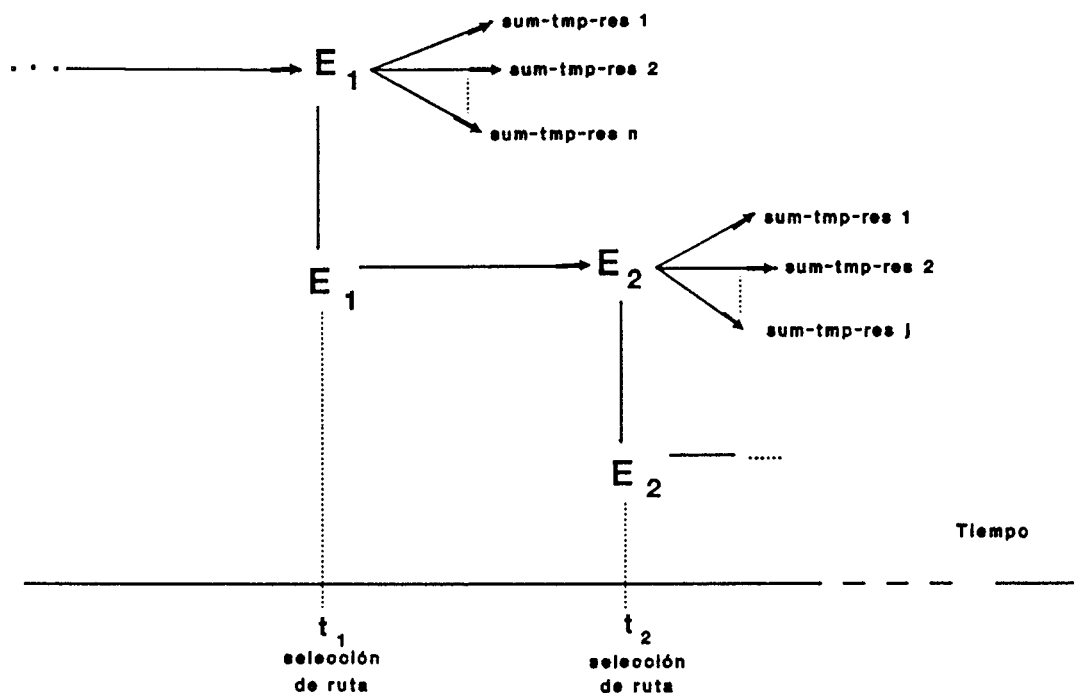


Figura 3.1 Esquema de la metodología propuesta

En estos instantes t_i se toma de la base de datos real del sistema los valores de las variables que caracterizan su estado. Estos serán los datos iniciales que tomará el modelo de simulación para probar cada una de las rutas alternativas posibles para la pieza concreta que entre en ese instante.

En cada una de las simulaciones, no se consideran las piezas que entran en el sistema con posterioridad a la pieza cuya ruta se desea asignar en ese momento. Como las piezas que en ese instante inicial estaban en el sistema van saliendo del mismo a medida que van acabando su recorrido, llegará un momento en que todas las piezas abandonen el sistema. Esto permite determinar el horizonte de las simulaciones. Concretamente, la simulación de cada posible evolución del sistema, en el caso de que se asigna una ruta de fabricación determinada, acaba cuando han salido todas las piezas del taller y, por tanto, el sistema queda vacío.

Como se ha dicho, el considerar que la pieza que entra en cada instante es como si fuese la última que se va a incorporar al sistema, supone un enfoque de selección de rutas secuencial, ya que no permite considerar las combinaciones de rutas para varias piezas, sino que se consideran las piezas de una en una, seleccionándose cada vez la ruta más eficiente, en las condiciones supuestas. Sin embargo, se ha adoptado este enfoque de elección de las rutas, debido a que simplifica el problema y si bien no permite obtener la ruta óptima, sí parece razonable esperar que se mejore la eficiencia a medio plazo del sistema, ya que la ruta que se ha seleccionado, de las posibles rutas para la pieza que entra en un instante, es aquella que mejora la eficiencia del sistema en el intervalo considerado y en función del criterio de eficiencia elegido.

Para cada pieza que abandona el sistema se va registrando el tiempo de residencia (también denominado flow-time, lead-time o throughput-time), esto es, la duración del intervalo de tiempo desde el instante en que entró hasta el instante en que lo abandona. Dichos tiempos de residencia se suman para todas las piezas que había en el instante inicial, incluida la pieza que entra. Se seleccionará aquella ruta cuya simulación obtenga un menor valor para dicho sumatorio de los tiempos de residencia.

Se pueden considerar, sin pérdida de generalidad, otros criterios diferentes que se pueden tomar como medida de la eficiencia de un SFF, (por ejemplo basados en el retraso de los trabajos, el valor mínimo de la suma de los tiempos de residencia más los tiempos de retraso, etc). Para simplificar, en esta investigación no se consideran fechas de entrega, por lo que el criterio más racional de eficiencia parece ser el relacionado con los tiempos de residencia.

Los instantes en que se produce la entrada de una pieza se determinarán de forma exógena. No obstante, para los experimentos que se han realizado, se ha considerado que el número de pallets en el sistema es constante, suposición que se aproxima bastante a lo que ocurre en la mayoría de los SFF reales, y por tanto, se ha considerado la salida de una pieza como el instante en que se va a poder introducir una nueva pieza. El tiempo de descarga de la pieza que sale proporciona el orden de magnitud del tiempo con que cuenta el sistema informático para ejecutar el proceso de simulación y selección de rutas.

3.3 MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA

El problema de asignación de rutas de fabricación suele plantearse a nivel táctico, y/o en forma de asignación de operaciones individuales a máquinas concretas. Así ocurre en los trabajos de autores como Yao y Pei (1988), Sherali et al (1990), Gómez (1992), etc.

Cuando además se considera simultáneamente con la asignación de herramientas, recibe el nombre de problema de carga de las máquinas, el cual ha sido abordado exhaustivamente en trabajos como Stecke y Solberg (1981), Moreno y Ding (1989), Shanker y Rajamarthandan (1989), Kirkavak (1993), Kim y Yano (1993), etc.

Desde un principio nos pareció intuitivo y apropiado considerar la asignación de rutas a nivel operacional, ya que si se considera a nivel táctico, por un lado, tal asignación va en contra del concepto de flexibilidad, al comprometer los recursos antes de que sea estrictamente necesario, y, por otro lado, la consideración a nivel táctico de dicha decisión para cada una de las piezas da lugar a modelos con un tamaño y grado de detalle excesivos, poco coherentes con la concepción del nivel táctico.

Así pues, había que concentrarse en el nivel operacional. Ahora bien, con esta perspectiva existen diversos enfoques, algunos bastante sofisticados (basados en Teoría de Control y Programación Dinámica), pero todos ellos se centran en asignar operaciones individuales. Nos parecía que el impacto sobre la eficiencia del sistema de cada una de dichas decisiones individuales iba a ser difícil de evaluar correctamente y, por tanto, iba a dar lugar a decisiones no siempre acertadas. Era preciso un enfoque más "holístico", que tuviera en cuenta las relaciones entre las sucesivas operaciones necesarias para fabricar cada pieza. De ahí que se llegara a la conclusión de que había que asignar rutas de fabricación completas, no operaciones individuales. Es cierto que, dado el carácter combinatorio de las asignaciones de las diferentes operaciones a sus posibles máquinas, el número de rutas de fabricación alternativas resultante podría ser a veces grande. Para afrontar este problema se han usado dos vías que se comentan más detalladamente en sus correspondientes apartados: la ejecución en paralelo de las simulaciones correspondientes a las diferentes rutas alternativas y la consideración de rutas flexibles, en las que el orden de las operaciones no está totalmente determinado.

Así pues, el presente trabajo de investigación busca controlar el funcionamiento del taller mediante la oportuna elección de entre las diferentes posibilidades de fabricar cada pieza, de forma que se mantenga una presión constante sobre la tasa de producción del sistema con el ánimo de usar sus recursos de la forma más eficiente posible.

3.4 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA EXPERIMENTACIÓN REALIZADA.

En este apartado se van a exponer una serie de consideraciones generales y comunes para todos los sistemas a los que se le va a aplicar la metodología propuesta. Así, dado que no se dispone de un SFF real sobre el que experimentar y validar la metodología, se ha utilizado el mismo modelo de simulación como sustituto del sistema real para seguir la evolución del sistema desde el instante t_1 hasta el instante t_2 que aparece en la figura 3.1. Este período contempla el intervalo de tiempo que va desde que una pieza nueva entra en el sistema, hasta el momento en que alguna pieza acaba su procesado y abandona el mismo.

En los experimentos que se han realizado se ha supuesto que se va a fabricar un número de piezas previamente determinado y también se conoce a priori el orden y tipo de pieza que entra. El instante en que cada pieza entra vendrá determinado por los sucesivos instantes t_i en que alguna pieza acaba su recorrido y abandona el sistema. Para cada una de las piezas que se debe producir, se realizará el proceso de simulación para seleccionar su correspondiente ruta en el instante mencionado.

Las pruebas se han realizado para distintas hipótesis de comportamiento de los sistemas estudiados, entre dichas hipótesis se han considerado distintas reglas de secuenciación para ver la incidencia de dichas reglas sobre la bondad de la metodología.

Dado el problema de acceso a recursos hardware y software con capacidad de proceso en paralelo puro, se ha utilizado para llevar a cabo la simulación en paralelo una red local. La experimentación en paralelo es exactamente la misma que la que se realiza en monoprogramación. De hecho los resultados que se han obtenido en las pruebas realizadas en monoprogramación han servido para validar la implementación en paralelo. Puesto que el objetivo de la experimentación en paralelo es reducir al máximo el tiempo de ejecución de las simulaciones y selección de rutas y observar la relación entre los tiempos de respuesta en monoprogramación y en paralelo, la experimentación en paralelo se ha realizado sólo para uno de los talleres simulados. Los resultados obtenidos pueden extenderse a los otros talleres.

Para llevar a cabo la confección de los programas de simulación de los diferentes escenarios se han utilizado lenguajes de programación de propósito general (Pascal, Clipper y Qbasic respectivamente). Se han elegido estas alternativas frente a otros lenguajes específicos de simulación (Siman por ejemplo), ya que presentan una mayor flexibilidad de programación y estructuración de datos. No obstante en una aplicación real se puede utilizar cualquier lenguaje de programación, con la condición de que la interfase con los datos del sistema real sea efectiva.

4.- PRIMER ESCENARIO.

La característica más específica de este escenario, es que no va existir ningún tipo de restricción en cuanto al dispositivo de transporte de las piezas a través del sistema. Se supone, pues, que el número de transportes disponibles va a ser infinito. Aunque obviamente ningún taller cuenta con infinitos vehículos de transporte, digamos que cuando el número de los mismos está sobredimensionado, el comportamiento del sistema puede ser aproximado suponiendo que no existe limitación.

En el primer apartado se van a tratar las características que definen el comportamiento del sistema a estudiar. En un segundo apartado se enumeran brevemente el conjunto de variables, matrices y vectores que describen el sistema, así como la lógica que sigue la implementación del mismo. En un último y extenso apartado se van a tratar los distintos conjuntos de experimentos realizados sobre este sistema.

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN.

Se considera un Sistema de Fabricación Flexible en el que existen varias estaciones de trabajo cada una de las cuales puede tener una o varias máquinas. Por definición, las máquinas que forman una estación son operativamente equivalentes, es decir, pueden realizar exactamente el mismo conjunto de operaciones.

Cada estación tiene asociada una cola que corresponde al conjunto de piezas en espera de ser procesadas. No puede ocurrir que existan piezas en la cola y que alguna de las máquinas de esa estación este ociosa. Cuando una pieza que está siendo procesada acaba, se colocará en la cola de la siguiente estación que le corresponda según su ruta.

Los experimentos se realizan para el caso de que existan tres estaciones, cada una de ellas compuesta de una sola máquina y con su propio buffer de piezas en proceso, como puede verse en la figura 4.1.

Se han considerado las siguientes hipótesis de trabajo:

- Para cada ruta que pueda seguir una pieza se suponen conocidas todas las operaciones que componen esa ruta, las estaciones en que se realizan y la duración de las mismas.
- Se supone que no existen limitaciones de medios de transporte entre las distintas estaciones. Esta es una hipótesis simplificativa del modelo de simulación pero que no afecta a la metodología.

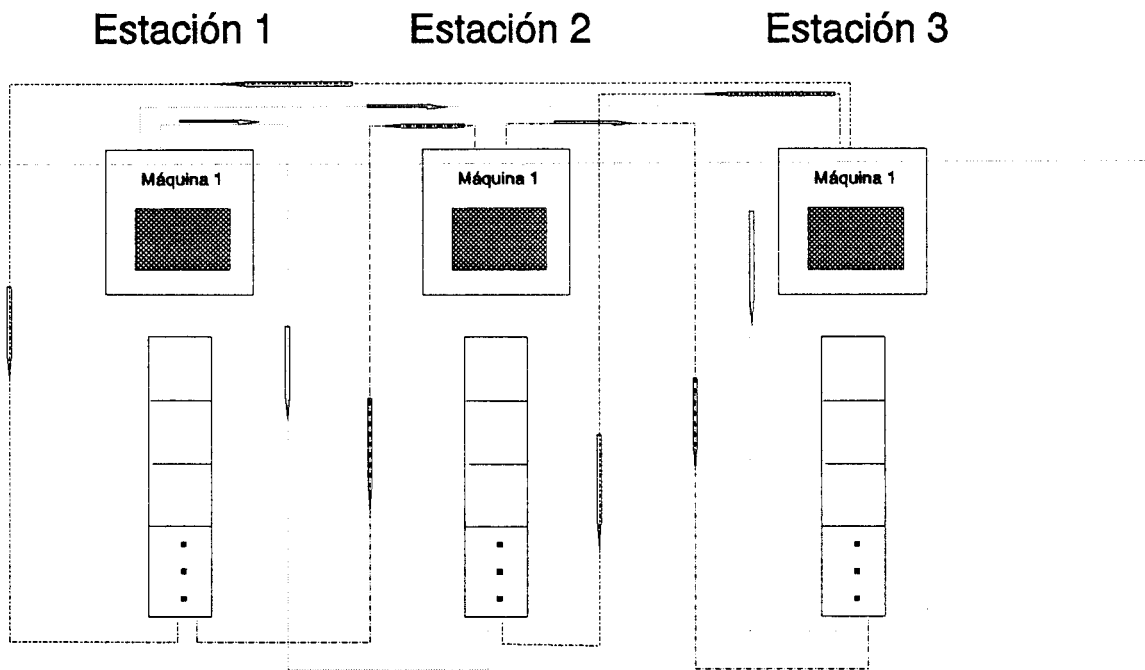


Figura 4.1 Esquema de los elementos del primer escenario

- Los datos del problema son deterministas. Suponer tiempos de procesado y de transporte aleatorios, aunque fácil de incorporar en el modelo de simulación, afectaría profundamente a la metodología, ya que en este caso el comportamiento del sistema frente a cada una de las alternativas sería aleatorio y su correcta estimación requeriría un mayor esfuerzo computacional prohibitivo si se desea tomar la decisión en tiempo real.
- Las máquinas y herramientas no son susceptibles de rotura. Estas últimas tampoco llegarán a sufrir desgastes que obliguen a su reposición durante el horizonte de tiempo contemplado.
- Se supone que el cambio de herramientas en cada máquina se realiza en un tiempo tan pequeño (relativo a los tiempos de procesado) que podemos considerarlo despreciable.
- El tiempo que tarda una pieza en pasar desde la cola de espera a una máquina para ser procesada se considera igualmente despreciable. Esto implica que los buffers de almacenamiento de trabajos en proceso están físicamente próximos a las máquinas. Suponer almacenamiento centralizado complica el modelo de simulación del sistema pero no afecta a la metodología.

- No se puede producir bloqueo, por existir suficientes medios de transporte disponibles en cada instante y no haber límite de capacidad para las distintas colas de espera de las estaciones. Esta hipótesis no supone pérdida de generalidad de la metodología aunque sí afecta positivamente a la complejidad del modelo de simulación.

Se plantea el problema de codificar la información relativa a los procesos de producción. Para ello se va a definir el concepto de ruta de producción. Una ruta va a estar compuesta por un conjunto de operaciones individuales, cada una de estas operaciones tienen asignada una máquina en la cual debe de realizarse un procesado concreto y también tiene asignado un tiempo de duración de dicho procesado.

A su vez se va a considerar la posibilidad de que existan rutas rígidas y rutas flexibles, en función de que exista o no flexibilidad a la hora de realizar antes unas operaciones que otras. En las rutas rígidas, se va a considerar que para fabricar una pieza existen un grupo de operaciones y entre las operaciones existe un orden de prelación, de forma que hasta que una operación no se ha realizado, no se puede acometer la siguiente operación. A su vez, se van a considerar rutas flexibles aquellas rutas en las que no existe prelación a nivel de operaciones sino a nivel de grupos de operaciones, como puede verse en la figura 4.2. Pero dentro de cada grupo no existirá ningún tipo de prelación.

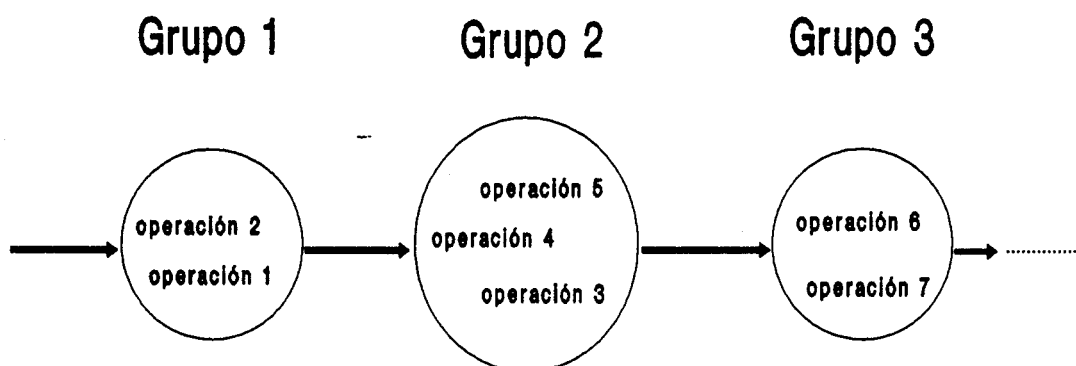


Figura 4.2 descripción de las rutas flexibles

La forma de seleccionar una u otra operación de un grupo es la siguiente: cuando una pieza ha terminado una operación, busca dentro del grupo cuáles son las operaciones que aún hay que realizar y en qué estación se debe realizar dicha operación. Se elige como próxima operación a realizar, aquella que tiene asignada la estación con menor porcentaje de utilización para ese instante.

Conviene tener en cuenta dos consideraciones más:

Las rutas rígidas son un caso límite de las flexibles y corresponden al caso en el que cada grupo de operaciones está integrado por una única operación.

En los experimentos que se realizan, las operaciones individuales que forman las rutas flexibles son las mismas que las que integran las rutas rígidas, pero consideradas formando grupos de operaciones.

4.2 IMPLEMENTACIÓN

En este apartado se va a describir brevemente las matrices, vectores, variables y ficheros más importantes que se han definido para caracterizar el estado del sistema y la evolución del mismo. Una información más exhaustiva del mismo aparece en Rubio (1992).

4.2.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA.

Para caracterizar el sistema vamos a tener diferentes conjuntos de matrices y ficheros. Un primer conjunto de ficheros describirán las rutas del sistema: operaciones que componen cada ruta, estación donde se realiza y tiempo de cada una de ellas en la correspondiente estación. En un segundo grupo tendremos las diversas matrices, vectores y variables que definen el estado del sistema, que debe contemplar: identificación y localización de cada pieza que actualmente esté en el sistema, ruta asignada a cada pieza, operación que se está realizando a cada pieza, estado actual y próximos eventos que afectan a las máquinas y transportes. Un tercer grupo está constituido por el conjunto de matrices, variables y ficheros que contienen un registro histórico de los valores de algunas de las matrices y vectores mencionados.

Dentro del primer grupo tenemos:

- El fichero de secuencias rígidas contiene el conjunto de operaciones que hay que realizar sobre una pieza (un registro de este fichero está constituido por los siguientes campos: código de pieza, código de secuencia, número de operaciones, código de operación 1, código operación 2, ...)

- El fichero de secuencias flexibles contiene el conjunto de grupos de operaciones que forman cada ruta flexible, cada campo es un grupo de operaciones (un registro de este fichero contiene los campos: código de pieza, código de secuencia, número de grupos de operaciones, código del grupo 1, código del grupo 2, ...).

- El fichero de grupos de operaciones contiene las operaciones que integran cada grupo (un registro está compuesto por: código de grupo, número de operaciones, operación 1, operación 2, ...).

- El fichero de operaciones es común tanto para rutas rígidas como para rutas flexibles y contiene la estación donde se realiza la operación y el tiempo que tarda en realizarse (un registro esta compuesto por los campos: código de operación, número de estación, tiempo de proceso).

Dentro del segundo grupo, las piezas y la localización de las mismas esta definida por las matrices:

- La matriz de piezas en la posición inicial PIE_P_I contiene el tipo de pieza que hay al inicio de cada período en la posición inicial (esta matriz no variará en el intervalo de tiempo que va desde que entra una pieza al sistema y sale la siguiente).

- La matriz de número de piezas en cola N_P_COLA contiene el número de piezas que contiene en cada instante las distintas colas.

- La matriz del número de piezas en el instante inicial contiene el número de piezas que hay inicialmente en cada estación.

- La matriz de piezas en posición actual PIE_P_ACT contiene la pieza que en cada instante hay en cada posición.

- Las matrices de cola son un conjunto de matrices que contienen las diferentes piezas que están en la cola de una estación ordenadas según la disciplina de cola de cada estación.

- La matriz de tiempos de residencia contiene en cada instante el tiempo que lleva cada pieza en el sistema.

- Para definir la ruta asignada a cada pieza se dispone de: la matriz de rutas elegidas en la posición inicial SEC_P_I, que contiene la secuencia correspondiente para la pieza que estaba inicialmente en cada posición inicial (esta matriz no variará en el intervalo de tiempo que va desde que entra una pieza al sistema y sale la siguiente).

- Para identificar la operación que se esta realizando en cada instante se dispone para las rutas rígidas de la matriz de avance de operaciones AVA_P_I, que en cada instante contiene el indicador de la operación que se está realizando o que se va a realizar y para rutas flexibles de la matriz de avance de grupo AVA_GRU, que indica el grupo que se esta realizando de la ruta flexible. Existen otras matrices y variables secundarias que exige el tratamiento informático de las anteriores matrices.

Las matrices relacionadas con las máquinas, tiempos de acabado y tiempos de transporte son:

- La matriz de número de máquinas por estación N_M_E, contiene el número de máquinas que componen cada estación.

-La matriz del tiempo de proceso de cada estación TMP_PRO_EST contiene el próximo tiempo en que una máquina acaba el procesado de la pieza que esta mecanizando.

- La matriz de tiempo de traslado entre estaciones contiene el tiempo que tarda una pieza en ir de una a otra estación.

- La matriz del tiempo de llegada de las piezas en transporte TMP_LLEG_TRANS contiene los próximos instantes en que llega una pieza a su destino.

El tercer grupo está constituido por el conjunto de matrices, variables y ficheros de resultados de la simulación, y dentro del mismo se encuentran:

- El fichero de sesión que registra el tiempo en que salió cada pieza del sistema, el tiempo de residencia, porcentaje de utilización de las máquinas, etc.
- El fichero de secuencia elegida que contiene que secuencia se ha elegido cada vez que se ha realizado el proceso de selección de ruta, etc.
- Etc.

4.2.2 EVOLUCIÓN DEL ESTADO DEL SISTEMA

En el sistema existen dos tipos de eventos significativos en los que se produce algún cambio en el estado del mismo:

- Cuando una máquina acaba el procesado de una pieza (puede ocurrir que varias máquinas acaben simultáneamente).
- Cuando una pieza que estaba en transporte llega a su cola de destino (también puede ocurrir que en un determinado instante lleguen a su destino más de una pieza).

La lógica de la simulación se basa en la búsqueda en las matrices correspondientes del instante de tiempo más próximo en el cual ocurre un evento. Pueden presentarse tres situaciones: a) que una máquina acabe su procesado, b) que llegue alguna pieza que estaba en transporte y c) ambas cosas.

Pasemos a analizar estas tres situaciones.

a) Si este tiempo más próximo pertenece a la matriz de tiempos de acabado, con la información de la pieza que acaba su procesado se accede al resto de matrices y vectores y se actualizan (se incrementa su contador de avance, se accede al fichero de secuencia para ver la próxima operación, se actualiza la matriz de tiempos de llegada, se reemplaza el hueco dejado en la máquina, ...).

b) Si pertenece a la matriz de tiempos de llegada, esto implica que una pieza llega a su cola de destino (esto supone quitar esa pieza de la matriz de llegadas y reordenar las restantes, poner la pieza en la cola que corresponda, en caso de que la cola este vacía colocarla en la máquina,...).

c) En el caso de que exista algún tiempo común en la matriz de acabado y en la matriz de tiempos de llegada, se realizaran ambos procesos sin avanzar a ningún nuevo instante del sistema, realizando primeramente los cambios asociados a la finalización de una operación en una máquina y después los asociados a la llegada de una pieza que estaba en transporte.

4.3 EXPERIMENTACIÓN.

Para evaluar la metodología propuesta se van a realizar una serie de experimentos que se corresponden con la fabricación de un lote de piezas cuya composición se supone definida a nivel táctico. Se ha dividido la experimentación en dos grandes grupos, la distinción entre ellos se ha hecho según el tamaño del lote y también se han introducido algunas diferencias en lo que se refiere al número de rutas alternativas por las que se puede producir cada pieza y el número de tipos diferentes de piezas.

Realmente se simula y se selecciona las rutas correspondientes para la mayor parte del lote que se supone que se va a producir, ya que inicialmente las 10 primeras piezas que hay en el sistema, se considera que tienen una ruta asignada, y esta asignación de las rutas se ha hecho de forma aleatoria.

Estamos interesados en el estudio de una serie de variables que se consideran relevantes para evaluar la eficiencia del sistema. Entre estas se resaltarán:

- La suma total de los tiempos de residencia de todas las piezas del lote.
- El tiempo de finalización de la última pieza fabricada del lote.
- Los niveles de utilización de las máquinas, definidos como el tiempo en que se ha utilizado cada máquina, partido por el intervalo de tiempo hasta que la última pieza que debía de realizar una operación en esa máquina ha salido de la misma. Se ha elegido dicho hito de tiempo (dependiente de la máquina), ya que a partir de este instante la máquina podría estar disponible para su puesta a punto (renovación de su almacén de herramientas, mantenimiento, etc) con vistas a la fabricación del siguiente lote.

Además se ha registrado otra variable que aunque no corresponde a una medida de la eficiencia del sistema, es importante. Se trata de:

- La frecuencia relativa de selección de las diferentes rutas.

Se va a observar cómo se comportan estas variables ante distintas situaciones del sistema, en particular ante diferentes tipos de disciplinas de cola en los buffers de cada estación de trabajo. Las disciplinas de cola que se van a probar en la experimentación son:

BPD: En la cola de cualquier estación las piezas se ordenan en orden creciente del número de operaciones en aquella estación que previamente se haya identificado a priori como cuello de botella.

SPT: Las piezas en una cola se ordenan dando más prioridad aquellas piezas que tengan un menor tiempo de proceso en la estación donde se encuentran en ese momento.

TTE: Se ordenan las piezas asignando más prioridad a aquella pieza a la que le resta un menor tiempo total de traslado entre las futuras estaciones que restan por visitar.

STRST: Se asigna mayor prioridad a aquella pieza a la que le resta un menor tiempo total de proceso en las futuras estaciones que debe visitar.

FIFO: Se ordenan las piezas por orden cronológico de llegada a la estación.

Se han elegido las cuatro primeras disciplinas debido a que son las que a priori se espera que presenten un mejor comportamiento en la mayoría de los casos y la FIFO se elige porque es un tipo de disciplina de cola que aunque a priori no parezca muy prometedora, si es en cambio bastante usual.

La elección de una u otra disciplina de cola no es un aspecto relevante de este trabajo, ya que no se trata de elegir aquella que hace que el sistema se comporte de una forma más eficiente. Lo que se persigue es comprobar si la metodología que se desarrolla es efectiva ante cualquier disciplina de cola, independientemente de la bondad que a priori puedan aportar una u otra disciplina de cola.

4.3.1 PRIMER GRUPO DE EXPERIMENTOS.

Se muestran a continuación los datos de un taller ficticio, con tres estaciones, cada una de ellas con una máquina solamente. EL tamaño del lote que deseamos producir es de 50 piezas (más las 10 que se consideran como carga inicial del sistema y que tienen asignada previamente la ruta de fabricación de forma aleatoria). El mix de piezas que viene indicado en la Tabla 4.1

Nº de Pallets	Mix de Piezas
10	tipo A 50 % tipo B 20 % tipo C 30 %

Tabla 4.1 Mix de piezas. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos

4.3. Los tiempos de traslado entre estaciones son los que se muestra en la figura

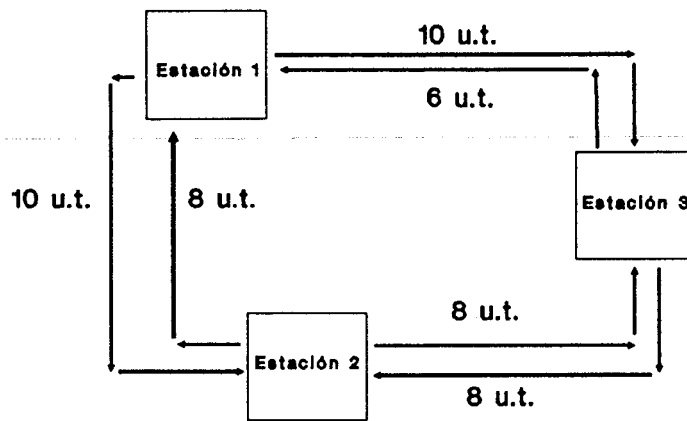


Figura 4.3 Distancia entre estaciones del primer escenario

Las secuencias según las cuales se pueden producir las diferentes piezas según las rutas rígidas, son las que aparecen en la tabla 4.2. En esta tabla en la primera columna tenemos el tipo de pieza a fabricar. En la segunda columna tenemos las diferentes rutas por las que se pueden producir los diferentes tipos de piezas. Desde la tercera a la décima columna tenemos las diferentes operaciones que integran cada ruta. Cada una de estas operaciones está integrada por dos valores: que corresponden a est (que nos indica la estación en la que se realiza) y tmp (que nos indica el tiempo que debe de permanecer en esa estación para su procesado). En la penúltima columna se recoge el número total de operaciones, y en la última columna se recoge el tiempo total de procesado que precisa cada pieza en las distintas estaciones.

Así por ejemplo, la pieza B puede fabricarse según dos posibles rutas: la ruta 1 que consta de 4 operaciones y que visita primero la estación 2 durante 8 unidades de tiempo, después va a la 3, donde está 5 unidades de tiempo, después va a la 2 de nuevo y permanece 25 unidades de tiempo y por último va a la estación 3 donde emplea 10 unidades de tiempo; y también se puede producir mediante la ruta 2 que consta de 6 operaciones, y que visita las estaciones que se observan en la tabla 4.2, durante los tiempos que se indican.

TIPO PIEZA	TIPO SECUEN	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6	OP7	OP8	total	total
		est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	operac	tiemp
A	1	1 10	3 10	2 5	2 8	1 5				5	38
	2	3 10	3 15	1 5	2 8	1 20	1 2			6	60
	3	2 8	3 5	1 2	3 15	3 5	1 2	1 3	2 1	8	41
B	1	2 8	3 5	2 25	3 10					4	48
	2	3 15	3 10	2 1	3 5	1 1	2 3			6	35
C	1	3 15	2 5	2 8						3	28
	2	3 5	2 5	3 15	3 3	1 5				5	33
	3	2 8	3 10	3 3	1 2	2 1	2 2			6	26

Tabla 4.2 Rutas rígidas. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos

Las rutas flexibles por las que pueden producir las diferentes piezas son las que aparecen en la tabla 4.3. Como se puede observar, los datos de la tabla 4.3 son los mismos que los de la tabla 4.2, la única diferencia es que las operaciones se agrupan en grupos de operaciones, ya que se trata de rutas flexibles.

Así por ejemplo para la pieza A, que puede fabricarse según tres rutas de producción distintas, la ruta 1 consta de dos grupos de operaciones, definidos como grupo A11, que consta de tres operaciones (las tres primeras que se habían definido para la ruta rígida A1), y el grupo A12, que esta constituido por dos operaciones (las dos últimas que se habían definido para la correspondiente ruta rígida A1).

Hay que insistir en que las rutas flexibles representan el caso más general, ya que las rutas rígidas no son mas que el caso particular de que, cada grupo de operaciones este constituido por una única operación. Este hecho se ha utilizado para validar los resultados para el caso de las rutas flexibles.

TIPO	TIPO	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6	OP7	OP8	total	total
PIEZA	SECUEN	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	opera	tiemp
A		Grupo A11			Grupo A12						
	1	1 10	3 10	2 5	2 8	1 5			5	38	
		Grupo A21		Grupo A22			Grup A23				
	2	3 10	3 15	1 5	2 8	1 20	1 2			6	60
		Grupo A31			grupo A32			Grupo A33			
3	2 8	3 5	1 2	3 15	3 5	1 2	1 3	2 1	8	41	
B		Grupo B11		Grupo B12							
	1	2 8	3 5	2 25	3 10					4	48
		Grupo B21		Grupo B22							
2	3 15	3 10	2 1	3 5	1 1	2 3			6	35	
C		Grupo C11									
	1	3 15	2 5	2 8					3	28	
		Grupo C21		Grupo C22							
	2	3 5	2 5	3 15	3 3	1 5			5	33	
		Grup C31	Grupo C32			Grupo C33					
3	2 8	3 10	3 3	1 2	2 1	2 2			6	26	

Tabla 4.3 Rutas flexibles. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos

Como se ha mencionado anteriormente, el orden de entrada es exógeno, y se define previamente. Así se establece que cuando una pieza acaba su procesado y abandona el sistema, se producirá la entrada de otra pieza del mismo tipo, pero la ruta se elige para su fabricación viene determinada de dos formas distintas:

SECLOOK: la ruta que se elige para su producción, será aquella que seleccione la metodología propuesta. Cuando se haya acabado con la producción de todas las piezas de un mismo tipo, el pallet que queda libre pasa a ser ocupado por una pieza de otro tipo distinto que aún quede por fabricarse, eligiendo la pieza de forma que se introduce una pieza del tipo que queden más cantidad a producir.

SEC1: la ruta de fabricación, que se selecciona es la misma que la ruta de fabricación de la pieza que había salido en ese instante. Cuando se haya acabado con la producción de todas las piezas de un mismo tipo para elegir la siguiente pieza a introducir se sigue el mismo criterio que en SECLOOK, y se le asigna la ruta que tenga más operaciones en la máquina que en ese instante está mas desocupada.

Por último para la disciplina de cola BPD se realizó la experimentación tras haber realizado las pruebas para el resto de las disciplinas de cola y en función de los resultados obtenidos se identificó la estación que es cuello de botella. Se ha seleccionado como cuello de botella la estación 3 debido a que para los

experimentos que se realizaron previamente para las otras disciplinas de cola, la estación 3 era la más sobrecargada.

4.3.1.1 EXPERIMENTO INICIAL.

Los datos utilizados en este experimento, son los que se han expuesto en el apartado 4.3.1, para el caso de rutas rígidas.

4.3.1.1.1 RESULTADOS.

Los resultados que se obtienen son los que aparecen en las tablas 4.4 y 4.5. La primera columna de la tabla 4.4, presenta las diferentes disciplinas de cola utilizada en los buffers intermedios de cada estación del sistema. La segunda columna contiene las políticas de selección de rutas, tal como se definió en el apartado 4.3.1. La cuarta columna presenta la suma de los tiempos de residencia para el conjunto de las 50 piezas que integran el lote de fabricación más las 10 que inicialmente había en el sistema. La cuarta columna presenta la relación de tiempos de los resultados obtenidos por la metodología propuesta y la definida como SEC1. La quinta columna presenta el tiempo en que se produce la última pieza del lote y la última columna la relación entre los tiempos de finalización de la última pieza del lote según la metodología propuesta y SEC1.

DISCIPLINA COLAS	POLÍTICAS	TMP-RESIDEN-TOTAL	SEC1 / SECLOOK	TMP-FIN-LOTE	TMP-FIN-1/TMP-FIN-2
BPD	SEC1	6.965	1,05	807	1,08
	SECLOOK	6.638		749	
SPT	SEC1	7.002	1,03	775	1,01
	SECLOOK	6.774		766	
TTE	SEC1	7.413	1,12	836	1,13
	SECLOOK	6.594		741	
STRST	SEC1	7.659	1,10	891	1,07
	SECLOOK	6.972		832	
FIFO	SEC1	8.062	1,13	862	1,15
	SECLOOK	7.146		752	

Tabla 4.4 Tiempos. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas rígidas

En la tabla 4.5, la primera columna representa las disciplinas de cola que rigen los buffers intermedios de las tres estaciones que forman el sistema. La segunda columna las políticas de selección de rutas. La columna tercera presenta el nivel de utilización de las máquinas que integran cada estación. Las columnas cuarta, quinta y sexta presenta para cada pieza el porcentaje relativo en que se ha elegido cada una de las rutas alternativas de cada tipo de pieza.

DISCIPLINA	POLÍTICAS	UTILIZACIÓN MAQUINAS %			RUTA TIPO PIEZA A %			RUTA TIPO PIEZA B %		RUTA TIPO PIEZA C %		
		COLAS	MAQ1	MAQ2	MAQ3	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2
BPD	SEC1	73	95	89	80	15	5	88	12	67	8	25
	SECLOOK	54	90	97	95	0	5	50	50	67	0	33
SPT	SEC1	70	94	95	70	15	15	88	12	17	17	66
	SECLOOK	58	92	93	80	0	20	75	25	33	17	50
TTE	SEC1	68	93	87	80	20	0	100	0	58	17	25
	SECLOOK	61	83	100	100	0	0	25	75	50	0	50
STRST	SEC1	53	74	88	80	5	15	50	50	33	25	42
	SECLOOK	59	75	84	80	0	20	100	0	25	0	75
FIFO	SEC1	58	78	94	65	20	15	63	37	50	17	33
	SECLOOK	50	93	100	70	0	30	75	25	33	8	59

Tabla 4.5 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas rígidas

4.3.1.1.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Obsérvese en primer lugar que, como era de esperar, tanto si se usa la secuencia de entrada SEC1 como la SECLOOK, el comportamiento del taller depende de la disciplina de cola. Ahora bien, independientemente de la disciplina de cola que se seleccione, el utilizar la política SECLOOK, supone una disminución del tiempo total de residencia superior al 3 %, llegando en algunos casos al 20 %. Esto supone un aumento de la tasa de producción (throughput) del mismo orden.

Nótese que, en general, la metodología propuesta da lugar a una carga de trabajo desequilibrada. Esto implica que la conjetura de Stecke (1981), de que cuando las estaciones tienen igual número de máquinas el throughput en régimen permanente se maximiza equilibrando las cargas de las mismas, no es válida si se considera horizonte finito. Y es que la solución óptima a largo plazo no tiene por qué serlo a medio. Dado el carácter dinámico en que se desenvuelven los SFF, es más realista considerar la planificación de una sucesión de transitorios que planificar bajo la suposición de régimen permanente.

Respecto a la frecuencia con que se eligen las diferentes rutas es fácil de analizar a posteriori. Así por ejemplo se puede observar que para la piezas de tipo A, la metodología penaliza la ruta 2, pues su tiempo de proceso total es muy superior a las dos rutas alternativas restantes. No obstante se observa para dichas piezas que, aunque la ruta 1 resulta claramente preferible, en algunos casos, dependiendo de la disciplina de cola, esta preferencia se hace menos acentuado respecto a la ruta 3. Esto indica que, en función del estado del sistema, en un momento determinado, aunque la ruta 3 implique mayor tiempo de proceso y un mayor número de traslados, la selección de esta ruta contribuye a utilizar mejor los recursos disponibles.

Con las piezas de tipo B y C puede observarse, asimismo, que la frecuencia de selección de rutas varía bastante en función de que se elija una u otra disciplina de cola. Esto confirma que esta forma de gestionar el sistema tomará una u otra decisión en función del estado del taller y con el objeto de mejorar su eficiencia.

Es importante aclarar que, no sólo es importante el número de veces que se seleccione una u otra ruta, sino el momento en que dichas selecciones tienen lugar. Sobre este punto se insistirá en el segundo grupo de experimentos en el apartado 4.3.2.

En lo que atañe al tiempo de finalización de la última pieza del lote, se presentan unas mejoras del mismo orden que para el caso del sumatorio de los tiempos de residencia.

4.3.1.2 VARIANTE DEL EXPERIMENTO INICIAL.

Las características para este experimento son las mismas que se han expuesto en el apartado 4.3.1, para el caso de rutas rígidas, salvo que las distancias entre las estaciones se han reducido a la mitad.

4.3.1.2.1 RESULTADOS.

Los resultados que se obtienen son los que aparecen en las tablas 4.6 y 4.7. Las tablas tienen la misma estructura que las que se vieron anteriormente.

DISCIPLINA COLAS	POLÍTICAS	TMP-RESIDEN-TOTAL	SEC1 / SECLOOK	TMP-FIN-LOTE	TMP-FIN-1 / TMP-FIN-2
BPD	SEC1	6.901	1,03	776	1,04
	SECLOOK	6.686		744	
SPT	SEC1	6.995	1,09	775	1,09
	SECLOOK	6.442		710	
TTE	SEC1	6.963	1,09	819	1,13
	SECLOOK	6.386		728	
STRST	SEC1	7.175	1,08	814	1,13
	SECLOOK	6.624		719	
FIFO	SEC1	7.792	1,15	838	1,12
	SECLOOK	6.788		747	

Tabla 4.6 Tiempos. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas rígidas. Menor distancia

DISCIPLINA	POLÍTICAS	UTILIZACIÓN MAQUINAS %			RUTA TIPO PIEZA A %			RUTA TIPO PIEZA B %		RUTA TIPO PIEZA C %		
		COLAS	MAQ1	MAQ2	MAQ3	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2
BPD	SEC1	60	92	100	80	15	5	63	37	75	16	9
	SECLOOK	62	91	100	95	5	0	50	50	84	0	16
SPT	SEC1	66	90	100	75	15	10	75	25	17	25	58
	SECLOOK	62	89	100	95	0	5	37	63	25	0	75
TTE	SEC1	76	96	88	85	15	0	100	0	66	17	17
	SECLOOK	58	84	99	100	0	0	25	75	42	0	58
STRST	SEC1	58	87	90	80	5	15	75	25	34	16	50
	SECLOOK	64	96	86	85	0	15	86	14	42	0	58
FIFO	SEC1	61	80	97	65	20	15	63	37	50	16	34
	SECLOOK	58	92	98	95	0	5	63	37	50	25	25

Tabla 4.7 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas rígidas. Menor distancia

4.3.1.2.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De la observación de los resultados de este experimento se puede constatar que se confirman las apreciaciones que se habían hecho para el caso anterior y en particular que:

1.- La metodología propuesta mejora consistentemente los tiempos de residencia respecto a la política de referencia SEC1.

2.- Para conseguir esto, carga las máquinas y selecciona las rutas "ad hoc".

De menor importancia es el detalle de que, como era de esperar, los tiempos de residencia y los tiempos de finalización de los lotes son ligeramente menores que para el experimento inicial.

4.3.1.3 CONSIDERACIÓN DE RUTAS FLEXIBLES

Las características específicas para este experimento son las que se han expuesto en el apartado 4.3.1, pero para el caso de que se consideren rutas flexibles.

4.3.1.3.1 RESULTADOS.

Los resultados son los que se presentan en las tablas 4.8 y 4.9. La estructura y el contenido son los mismos que para las tablas que se han presentado previamente.

Hay que aclarar que en este caso no se han realizado experimentos para las disciplinas de cola que implican tiempos de traslado entre estaciones o números de traslados entre las mismas, ya que al no existir prelación a priori entre las distintas operaciones de un mismo grupo, el origen y destino de dichos traslados no se conoce a priori (algo que si ocurría en las rutas rígidas), y por lo tanto no se puede fijar con antelación el tiempo total de transporte.

DISCIPLINA COLAS	POLÍTICAS	TMP-RESIDEN-TOTAL	SEC1 / SECLOOK	TMP-FIN-LOTE	TMP-FIN-1 / TMP-FIN-2
BPD	SEC1	6.703	1,02	754	1,03
	SECLOOK	6.551		730	
SPT	SEC1	7.371	1,14	801	1,09
	SECLOOK	6.473		732	
STRST	SEC1	7.206	1,08	833	1,07
	SECLOOK	6.656		777	
FIFO	SEC1	8.094	1,17	861	1,17
	SECLOOK	6.927		738	

Tabla 4.8 Tiempos. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas flexibles

DISCIPLINA COLAS	POLÍTICAS	UTILIZACIÓN MAQUINAS %			RUTA TIPO PIEZA A %			RUTA TIPO PIEZA B %		RUTA TIPO PIEZA C %		
		MAQ1	MAQ2	MAQ3	A1	A2	A3	B1	B2	C1	C2	C3
BPD	SEC1	54	90	100	95	0	5	50	50	67	8	25
	SECLOOK	57	92	100	95	0	5	50	50	50	8	42
SPT	SEC1	66	87	100	55	25	20	88	12	33	9	58
	SECLOOK	53	97	100	80	0	20	25	75	17	8	75
STRST	SEC1	50	79	100	80	5	15	50	50	50	8	42
	SECLOOK	68	94	100	95	0	5	75	25	25	8	67
FIFO	SEC1	57	73	100	60	20	20	50	50	46	12	42
	SECLOOK	59	91	100	100	0	0	63	37	8	42	50

Tabla 4.9 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 1^{er} Grupo experimentos. Rutas flexibles

4.3.1.3.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De la comparación de las tablas 4.8 y 4.9 con las tablas 4.3 y 4.4, se desprende que para la política SEC1 el utilizar las rutas flexibles mejora en todos los casos los tiempos de residencia y de finalización del lote, excepto para la disciplina de cola SPT, mientras que para la secuencia SECLOOK, siempre se mejoran dichos resultados si se emplean las rutas flexibles.

Aunque las rutas flexibles mejoran normalmente los resultados respecto a las rutas fijas, no se puede concluir que esto tenga un carácter general. De hecho en

algunos casos como para la disciplina de cola FIFO y para la política SEC1, los resultados para rutas flexibles empeoran los obtenidos para rutas rígidas.

Lo que sí se sigue manteniendo es que ya se considere rutas fijas o flexibles, la metodología propuesta SECLOOK mejora los resultados respecto a la política SEC1.

En todos los casos la estación 3, que es la que se consideró como cuello de botella, esta utilizada al 100 %.

Por último, nótese, comparando las tablas 4.8 y 4.9, que aquellos casos en los que la metodología propuesta mejora sustancialmente a la política de referencia SEC1 coinciden con aquellos casos en los que el mix de rutas elegidas por aquella difiere más del elegido por esta.

4.3.2 SEGUNDO GRUPO DE EXPERIMENTOS.

El taller simulado en este caso es el mismo que para el primer grupo de experimentos. Las distancias son las que aparecen en la figura 4.3. La diferencia estriba en que: 1) se va a incrementar el tamaño del lote, 2) se va a introducir nuevos tipos de piezas y 3) se mantienen las mismas rutas que existían para las piezas primitivas, pero introduciéndose nuevas rutas de producción, tanto para las piezas antiguas como para las nuevas.

Se considera que se va a fabricar un lote de 300 piezas (más las 10 que forman la carga inicial del sistema), con el mix de piezas que se indican en la tabla 4.10.

Nº de Pallets	Tipo pieza	Nº de Piezas	Mix de piezas
10	A	132	44 %
	B	36	12 %
	C	24	8 %
	D	96	32 %
	E	12	4 %

Tabla 4.10 Mix de piezas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos

Obsérvese que se han considerado dos nuevos tipos de piezas, D y E.

El orden de entrada de piezas es el que se muestra en la tabla 5.11 y ha sido generado aleatoriamente.

-----> Orden de entrada de piezas.

A A D D A A D D B A A A D D A A D D B A A A D D A A D D
 B A A A D D A A D D B A E C C B A E C C B A A A D D A A
 D D B A A A D D A A D D B A A A D D A A D D B A A A D D
 A A D D B A E C C B A E C C B A A A D D A A D D B A A A
 D D A A D D B A A A D D A A D D B A A A D D A A D D B A
 E C C B A E C C B A A A D D A A D D B A A A D D A A D D
 B A A A D D A A D D B A A A D D A A D D B A E C C B A E
 C C B A A A D D A A D D B A A A D D A A D D B A A A D D
 A A D D B A A A D D A A D D B A E C C B A E C C B A A A
 D D A A D D B A A A D D A A D D B A A A D D A A D D B A
 A A D D A A D D B A E C C B A E C C B A

Tabla 4.11 Orden de entrada de las piezas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos

Las secuencias rígidas según las cuales se pueden producir las piezas en este nuevo experimento son las que se habían indicado en la tabla 4.2, a las que se le van añadir las nuevas secuencias que se indican en la tabla 4.12, donde aparecen nuevas rutas para piezas ya existentes y nuevos tipos de piezas con sus correspondientes rutas. La estructura y el contenido de la tabla 4.12 es similar a la de la tabla 4.2

TIPO PIEZA	TIPO SECUEN	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6	OP7	OP8	total	total
		est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	operac	tiemp
A	4	3 10	3 15	2 8	2 15	1 20	1 2			6	70
	5	2 25	1 10	1 30	2 25					4	90
B	3	1 30	2 25	1 2	2 25	1 5				5	87
D	1	3 5	1 2	1 3	3 10	3 12	2 3	2 2	1 15	8	52
	2	2 8	1 15	1 30	2 10	1 10				5	73
	3	2 20	3 15	2 8	3 15	3 5	2 25			6	88
	4	1 15	3 10	3 30	1 20					4	75
E	1	2 5	3 5	3 15	2 25					4	50
	2	2 15	1 30	2 25	1 20					4	90

Tabla 4.12 Rutas rígidas adicionales. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos

Las secuencias flexibles según las cuales se pueden producir las piezas en este nuevo experimento son las que se habían indicado en la tabla 4.3 a las que se le van añadir las nuevas secuencias que se indican en la tabla 4.13. En la tabla 4.13 aparecen nuevas rutas, con sus correspondientes grupos de operaciones, para piezas que ya existían. Además aparecen nuevos tipos de piezas con sus rutas y grupos de operaciones correspondientes. Al igual que ocurría con las rutas flexibles definidas para el primer grupo de experimentos, las nuevas rutas rígidas definidas

están integradas por las mismas operaciones que la correspondiente ruta rígida, pero formando grupos de operaciones. La estructura y contenido de la tabla 4.13 es similar a la de la tabla 4.3.

TIPO	TIPO	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6	OP7	OP8	total	total		
PIEZA	SECUEN	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	est tmp	opera	tiemp		
A		Grupo A41				Grupo A42							
	4	3 10	3 15	2 8	1 15	1 20	1 2			6	70		
		Grupo A51		Grupo A52									
	5	2 25	1 10	1 30	2 25					4	90		
B		Grupo B31		Grupo B32									
	3	1 30	2 25	1 2	2 25	1 5					5	87	
D		Grupo D11		Grupo D12		Grupo D13							
	1	3 5	1 2	1 3	3 10	3 12	2 3	2 2	1 15	8	52		
		Grupo D21			Grupo D22								
	2	2 8	1 15	1 30	2 10	1 10					5	73	
		Grupo D31		Grupo D32		Grupo D33							
	3	2 20	3 15	2 8	3 15	3 5	2 25					6	88
		Grupo D41		Grupo D42									
4	1 15	3 10	3 30	1 20							4	75	
E		Grupo E11		Grupo E12									
	1	2 5	3 5	3 15	2 25							4	50
		Grupo E21		Grupo E22									
2	2 15	1 30	2 25	1 20							4	90	

Tabla 4.13 Rutas flexibles adicionales. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos

En este segundo grupo de experimentos se van a considerar diferentes políticas de selección de rutas de producción. En concreto se han considerado las políticas de asignación de rutas que aparecen en la tabla 4.14.

SECMEJOR	La ruta a asignar será aquella que para la pieza que entra tiene un menor tiempo de procesado en el conjunto de las máquinas por las que debe pasar (Así, para la pieza A la ruta 1, para la B la 2, para la C la 3, para la D la 1 y para la E la 1).
SECPEOR	La ruta a asignar será aquella que para la pieza que entra tiene un mayor tiempo de procesado en el conjunto de las máquinas por las que debe pasar (por ejemplo, para la pieza A la ruta 5, para la B la 3, para la C la 2, para la D la 3 y para la E la 2).
SECLOOK	La ruta a asignar será aquella que seleccione la metodología que se ha desarrollado

Tabla 4.14 Políticas de selección de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos

Además se van a considerar las cuatro políticas que aparecen en la tabla 4.15. De ellas las tres primeras intentan medir la degradación que sufre la solución aportada por la metodología propuesta cuando con cierta periodicidad deja de escogerse puntualmente la ruta de fabricación de una nueva pieza según la metodología, siendo elegida aleatoriamente. La última política pretende medir cómo se degrada el comportamiento del sistema si, respetando las proporciones relativas de las rutas asignadas por la metodología, se intercambian los instantes en que se asignan dichas rutas.

SECCA20	A la solución aportada por SECLOOK, se le modifica cada 20 posiciones la ruta que se había elegido por la metodología propuesta y se le cambia por otra ruta distinta elegida de forma aleatoria.
SECCA10	A la solución aportada por SECLOOK, se le modifica cada 10 posiciones la ruta que se había elegido por la metodología y se le cambia por otra ruta distinta elegida de forma aleatoria.
SECCA36	A la solución aportada por SECLOOK, se le modifica cada 3 ó 6 (aleatoriamente) posiciones la ruta que se había elegido por la metodología y se le cambia por otra ruta distinta elegida de forma aleatoria.
SECCAMBI	A la solución aportada por SECLOOK, se le modifica el orden en que entran las distintas rutas, es decir, que para la pieza de tipo A que tenía previsto entrar al sistema en el lugar nº 35 según la tabla 4.11 y que seleccionaba una ruta mediante la metodología, se le intercambia de posición con otra pieza del mismo tipo que debía entrar en la posición 115 y que seleccionaba otra ruta. Esto se realiza de forma aleatoria para 5 pares de valores de piezas y secuencias. El porcentaje con que se asigna cada ruta es el mismo que el determinado por SECLOOK.

Tabla 4.15 Políticas complementarias selección de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos

Estamos interesados, para medir la eficiencia del sistema, en registrar las mismas variables que se han definido en el apartado 4.3.1. Esto es:

- La suma de los tiempos de residencia.
- El tiempo de finalización de la última pieza.
- Niveles de utilización de las máquinas.
- Frecuencia relativa de selección de rutas.

Vamos a observar como se comportan estas variables ante distintas reglas de funcionamiento del sistema, en particular ante diferentes tipos de disciplinas de cola, en concreto BPD, SPT y FIFO. Las disciplinas de cola que se van a probar, se eligen con el criterio de observar el comportamiento de la metodología, ante disciplinas, que a priori parecen las más prometedoras como es el caso de BPD y SPT y ante otra disciplina de cola más elemental como la FIFO. No se han probado otras definidas en el apartado anterior pues ya se ha mencionado que no se trata de elegir la disciplina que aporta un mejor comportamiento del sistema, sino de observar el comportamiento de la metodología ante distintas situaciones experimentales.

Por otro lado, la estación candidata a cuello de botella que se ha considerado a efectos de la disciplina BPD ha sido la estación 3, por las mismas razones que se eligió ésta en el primer grupo de experimentos.



4.3.2.1 EXPERIMENTOS CON RUTAS RÍGIDAS.

En este apartado vamos a presentar los resultados para el caso de las rutas rígidas y a comentarlos. Los resultados se presentan en las tablas 4.16 a 4.21.

4.3.2.1.1 RESULTADOS

Los resultados para la disciplina de cola FIFO aparecen en las tablas 4.16 y 4.17. En la tabla 4.16, en la primera fila aparecen las distintas políticas de selección de rutas que se habían definido con anterioridad. Por columnas, la primera contiene el valor de las variables que se estudian y en algunos casos los ratios entre los mismos valores de una variable, pero correspondientes a políticas de selección diferentes. El resto de las columnas corresponden a los valores que toman las variables de la primera columna, para las diferentes políticas de selección de rutas con las que se experimentan. Por filas, la primera corresponde al nombre de las diferentes políticas de selección de rutas, la segunda fila contiene los valores para las distintas políticas de selección de rutas de la variable TMP-RES-TOTAL que es el sumatorio de los tiempos de residencia de todas las piezas que integran el lote de fabricación. La tercera fila es el ratio que se obtiene al dividir cada uno de los valores de la suma de los tiempos de residencia, para las diferentes políticas, por el correspondiente valor de la política SECLOOK y por lo tanto forzosamente vale 1.00 para la columna SECLOOK. La cuarta fila representa el tiempo en que sale la última pieza que había que fabricar del lote. La quinta fila es un ratio similar al de la fila tercera, pero ahora para los valores de la variable TMP-FIN-LOTE. Las filas 6, 7 y 8 presentan el nivel de utilización de las distintas máquinas de las diferentes estaciones.

La tabla 4.17 presenta el porcentaje en que se ha seleccionado cada ruta alternativa para las distintas piezas. Así en la primera columna aparece el tipo de pieza y ruta para todas las piezas que formaban parte del lote, y el resto de columnas, presentan el valor de los mencionados porcentajes para las diferentes políticas probadas.

SEC-ENTRADA	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
VARIABLES EN ESTUDIO							
TMP-RES-TOTAL	57.889	176,961	53.619	57,610	59.027	60,771	57.244
Ratio respecto a SECLOOK	1,08	3,30	1,00	1,07	1,10	1,13	1,07
TMP-FIN-LOTE	5.835	17.855	5.439	5.832	5.962	6.159	5.79
Ratio respecto a SECLOOK	1,07	3,28	1,00	1,07	1,10	1,13	1,07
% UTILIZACIÓN EST1	82,0 %	50,0 %	77,7 %	83,4 %	84,5 %	86,9 %	82,6 %
% UTILIZACIÓN EST2	61,0 %	99,0 %	81,8 %	85,5 %	84,8 %	84,4 %	82,8 %
% UTILIZACIÓN EST3	99,0 %	31,0 %	99,8 %	95,6 %	96,7 %	92,1 %	98,5 %

Tabla 4.16 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. FIFO

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	82	74	66	63	82
A	2	0	0	0	4	8	13	0
A	3	0	0	17	17	19	17	17
A	4	0	0	0	2	3	2	0
A	5	0	100	1	3	4	5	1
B	1	0	0	72	72	72	72	72
B	2	100	0	28	28	28	28	28
B	3	0	100	0	0	0	0	0
C	1	0	0	50	50	50	50	50
C	2	0	100	0	0	0	0	0
C	3	100	0	50	50	50	50	50
D	1	100	0	84	84	84	75	84
D	2	0	0	10	10	10	14	10
D	3	0	100	3	3	3	6	3
D	4	0	0	3	3	3	5	3
E	1	100	0	100	100	100	75	100
E	2	0	100	0	0	0	25	0

Tabla 4.17 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. FIFO

Las tablas 4.18 y 4.19, presentan los resultados para la disciplina de cola SPT

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	55,528	176,146	52,045	54,996	56,190	57,633	54,379
Ratio respecto a SECLOOK	1.07	3.38	1.00	1.06	1.08	1.11	1.05
TMP-FIN-LOTE	5,611	17,852	5,284	5,647	5,745	5,895	5,529
Ratio respecto a SECLOOK	1.06	3.38	1.00	1.07	1.09	1.11	1.05
% UTILIZACIÓN EST1	85.1 %	52.5 %	91.2 %	93.9 %	93.2 %	94.5 %	94.0 %
% UTILIZACIÓN EST2	64.7 %	99.8 %	94.8 %	94.2 %	92.6 %	89.6 %	93.4 %
% UTILIZACIÓN EST3	99.7 %	26.8 %	99.5 %	95.2 %	95.6 %	93.0 %	95.8 %

Tabla 4.18 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. SPT

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS		SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
Tipo de pieza	secuencia	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A	1	100	0	84	77	69	67	84
A	2	0	0	0	2	7	10	0
A	3	0	0	14	16	17	17	14
A	4	0	0	2	4	5	4	2
A	5	0	100	0	1	2	2	0
B	1	0	0	72	75	75	69	72
B	2	100	0	25	19	19	25	25
B	3	0	100	3	6	6	6	3
C	1	0	0	21	21	21	25	21
C	2	0	100	17	17	17	17	17
C	3	100	0	62	62	62	58	62
D	1	100	0	50	50	50	50	50
D	2	0	0	20	20	20	22	20
D	3	0	100	15	15	15	14	15
D	4	0	0	15	15	15	14	15
E	1	100	0	83	50	50	58	83
E	2	0	100	17	50	50	42	17

Tabla 4.19 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. SPT

Las tablas 4.20 y 4.21, presentan los resultados para la disciplina de cola BPD.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	55.783	177.030	52.025	57.778	59.362	61.474	55.524
Ratio respecto a SECLOOK	1,07	3,40	1,00	1,11	1,14	1,18	1,07
TMP-FIN-LOTE	5.642	17.839	5.285	5.850	6.019	6.202	5.650
Ratio respecto a SECLOOK	1,07	3,37	1,00	1,11	1,14	1,17	1,07
% UTILIZACIÓN EST1	82,9 %	49,2 %	80,5 %	86,2 %	84,4 %	86,9 %	86,7 %
% UTILIZACIÓN EST2	65,6 %	99,8 %	84,7 %	81,8 %	81,3 %	83,6 %	82,5 %
% UTILIZACIÓN EST3	99,2 %	29,7 %	98,7 %	93,2 %	94,5 %	90,1 %	93,6 %

Tabla 4.20 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. BPD

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS		SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
Tipo de pieza	secuencia	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A	1	100	0	93	85	74	70	93
A	2	0	0	0	2	8	10	0
A	3	0	0	7	9	11	13	7
A	4	0	0	0	2	4	4	0
A	5	0	100	0	2	3	3	0
B	1	0	0	92	92	92	83	92
B	2	100	0	8	8	8	11	8
B	3	0	100	0	0	0	6	0
C	1	0	0	50	50	50	38	50
C	2	0	100	0	0	0	8	0
C	3	100	0	50	50	50	54	50
D	1	100	0	89	89	89	79	89
D	2	0	0	5	5	5	10	5
D	3	0	100	1	1	1	5	1
D	4	0	0	5	5	5	6	5
E	1	100	0	83	83	83	67	83
E	2	0	100	17	17	17	33	17

Tabla 4.21 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas rígidas. BPD

4.3.2.1.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

El primer resultado digno de mención es, como puede observarse, que la solución que aporta la metodología propuesta SECLOOK, mejora en todos los casos a cualquiera de las otras políticas probadas.

Comparando SECLOOK con la política SECCAMBI, se pone de manifiesto, que manteniendo un mismo mix de rutas, los resultados son muy diferentes, y en todos los casos la metodología mejora por encima del 5 % los resultados de SECCAMBI. Esto es importante, ya que pone de manifiesto que no sólo hay que conocer el mix de rutas, sino que también es importante decidir en que momento se selecciona cada ruta, que es precisamente la cuestión que aborda este trabajo. En la misma línea puede observarse que, siendo SECLOOK la política que da lugar a mejores tiempos de residencia, no es ni la que mejor equilibra la carga ni la que peor lo hace. Es decir, parece como si no fuera tan importante el equilibrado de la carga a medio plazo, como el escoger en cada momento la ruta más conveniente, independientemente de la historia anterior de la carga de las máquinas.

Para la variable TMP-FIN-LOTE, las mejoras que se producen son del mismo orden que para el sumatorio de los tiempos de residencia y excluyendo la política SECPEOR, es del orden del 10 %.

4.3.2.2 EXPERIMENTOS CON RUTAS FLEXIBLES

En este apartado se presentan los resultados para el escenario experimental descrito en el apartado 4.3.2, para rutas de fabricación flexible.

4.3.2.2.1 RESULTADOS

Los datos para la disciplina de cola FIFO aparecen en las tablas 4.22 y 4.23.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	56.211	176.379	52.248	55.679	58.536	62.885	55.176
Ratio Respecto a SECLOOK	1,08	3,37	1,00	1,07	1,12	1,20	1,06
TMP-FIN-LOTE	5.673	17.833	5.286	5.658	5.955	6.371	5.569
Ratio Respecto a SECLOOK	1,07	3,37	1,00	1,07	1,13	1,21	1,05
% UTILIZACIÓN EST1	79,0 %	43,7 %	85,0 %	85,6 %	84,7 %	83,6 %	84,6 %
% UTILIZACIÓN EST2	64,2 %	99,9 %	81,6 %	84,9 %	83,3 %	80,7 %	85,3 %
% UTILIZACIÓN EST3	99,8 %	29,1 %	100 %	97,5 %	95,9 %	90,4 %	96,0 %

Tabla 4.22 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles. FIFO

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	83	73	64	67	83
A	2	0	0	0	4	8	10	0
A	3	0	0	17	20	22	18	17
A	4	0	100	0	1	2	2	0
A	5	0	0	0	2	4	3	0
B	1	0	0	72	72	72	64	72
B	2	100	0	28	28	28	25	28
B	3	0	100	0	0	0	11	0
C	1	0	0	50	50	50	54	50
C	2	0	100	0	0	0	0	0
C	3	100	0	50	50	50	46	50
D	1	100	0	77	77	77	72	77
D	2	0	0	17	17	17	20	17
D	3	0	100	0	0	0	2	0
D	4	0	0	6	6	6	6	6
E	1	100	0	100	100	100	100	100
E	2	0	100	0	0	0	0	0

Tabla 4.23 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles. FIFO

Los datos para la disciplina de cola SPT aparecen en las tablas 4.24 Y 4.25.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	55.220	176.296	53.648	55.627	55.743	56.982	54.763
Ratio Respecto a SECLOOK	1,03	3,28	1,00	1,04	1,04	1,06	1,02
TMP-FIN-LOTE	5.624	17.840	5.474	5.654	5.715	5.809	5.578
Ratio Respecto a SECLOOK	1,03	3,26	1,00	1,03	1,04	1,06	1,02
% UTILIZACIÓN EST1	80,5 %	45,3 %	83,9 %	89,1 %	91,2 %	92,5 %	85,6 %
% UTILIZACIÓN EST2	63,0 %	99,8 %	91,9 %	94,1 %	91,0 %	89,7 %	92,6 %
% UTILIZACIÓN EST3	99,7 %	29,1 %	99,2 %	98,5 %	98,5 %	98,4 %	97,7 %

Tabla 4.24 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles. SPT

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	75	70	64	61	75
A	2	0	0	2	6	9	10	2
A	3	0	0	23	20	20	21	23
A	4	0	0	0	2	4	4	0
A	5	0	100	0	2	3	4	0
B	1	0	0	64	64	64	67	64
B	2	100	0	36	36	36	30	36
B	3	0	100	0	0	0	3	0
C	1	0	0	29	29	29	38	29
C	2	0	100	8	8	8	8	8
C	3	100	0	63	63	63	54	63
D	1	100	0	51	51	51	57	51
D	2	0	0	22	22	22	19	22
D	3	0	100	18	18	18	14	18
D	4	0	0	9	9	9	10	9
E	1	100	0	67	67	67	58	67
E	2	0	100	33	33	33	42	33

Tabla 4.25 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles. SPT

Para la disciplina de cola BPD los datos aparecen en las tablas 5.26 y 5.27

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	55.259	176.463	51.769	55.328	56.837	55.841	54.426
Ratio Respecto a SECLOOK	1,07	3,40	1,00	1,07	1,10	1,08	1,05
TMP-FIN-LOTE	5.608	17.820	5.247	5.569	5.789	5.647	5.504
Ratio Respecto a SECLOOK	1,07	3,40	1,00	1,06	1,10	1,08	1,05
% UTILIZACIÓN EST1	81,5 %	46,0 %	84,0 %	84,6 %	84,6 %	84,9 %	86,9 %
% UTILIZACIÓN EST2	65,3 %	100 %	83,3 %	82,3 %	81,8 %	82,4 %	82,5 %
% UTILIZACIÓN EST3	100 %	27,8 %	99,8 %	97,7 %	96,7 %	96,5 %	97,4 %

Tabla 4.26 Tiempos. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles. BPD

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	93	86	81	82	93
A	2	0	0	1	5	7	7	1
A	3	0	0	5	7	10	9	5
A	4	0	0	1	1	1	1	1
A	5	0	100	0	1	1	1	0
B	1	0	0	64	64	64	58	64
B	2	100	0	31	31	31	36	31
B	3	0	100	5	5	5	6	5
C	1	0	0	21	21	21	38	21
C	2	0	100	4	4	4	4	4
C	3	100	0	75	75	75	58	75
D	1	100	0	91	91	91	88	91
D	2	0	0	4	4	4	8	4
D	3	0	100	3	3	3	3	3
D	4	0	0	2	2	2	1	2
E	1	100	0	67	67	67	75	67
E	2	0	100	33	33	33	25	33

Tabla 4.27 Mix de rutas. 1^{er} Escenario. 2^o Grupo experimentos. Rutas flexibles. BPD

4.3.2.2.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

En este caso al igual que para rutas rígidas la solución que aporta la metodología propuesta SECLOOK, mejora en todos los casos a cualquiera de las otras políticas probadas.

Para las disciplinas de cola FIFO y BPD, las rutas flexibles mejoran el comportamiento del sistema pero para el caso de SPT, los resultados son ligeramente peores para el caso de rutas flexibles. Esto muestra que el hecho de que se dote al sistema de un cierto grado de flexibilidad (en este caso flexibilidad en el orden en que se pueden realizar las operaciones de las rutas de fabricación de las piezas) no asegura siempre mejoras de eficiencia, aunque ello ocurra en la mayoría de los casos.

Vuelve a presentarse la misma situación que se ha venido produciendo en experimentos anteriores, en el sentido de que un ligero desequilibrio en la carga de las máquina, proporcionado por la metodología mejora el comportamiento del sistema, como puede verse si se observan los resultados correspondientes a la tasa de utilización de las distintas estaciones para las diferentes políticas probadas.

Se confirma, comparando los resultados que suministra las secuencias SECLOOK y SECCAMBI, cómo para un mismo mix de rutas los resultados son muy diferentes, aportando la metodología propuesta (SECLOOK) una mejora del orden de un 5 % respecto a la SECCAMBI, y eso que SECCAMBI sólo altera la elección de la ruta propuesta por la metodología en 10 ocasiones. Este hecho se produce como consecuencia de que, aunque a nivel agregado, en ambos casos se eligen las rutas alternativas en la misma proporción, la política SECCAMBI asigna en 10 ocasiones una ruta sin prestar atención al estado en que se encuentra el sistema en el instante en que se introduce una pieza.

Esto lleva a poder afirmar, que no sólo es importante determinar el mix de rutas, sino que el **timing** (instante en que se selecciona cada ruta) es posiblemente más importante que la determinación de la frecuencia de elección de rutas, y que parece razonable pensar que esta selección deberá hacerse en tiempo real.

4.4 RESUMEN DEL PRIMER ESCENARIO.

En este primer escenario se ha realizado la simulación de un sistema de fabricación flexible integrado por tres estaciones, cada una de las cuales está constituida por una única máquina. El número de transportes disponibles para trasladar las piezas entre las distintas estaciones es infinito y el número de piezas que pueden albergar los buffers de almacenamiento de cada estación no está limitado, esto supone que no se van a producir situaciones de bloqueo de las máquinas.

Se han probado distintas condiciones experimentales (distintas disciplinas de cola, distintas políticas de selección de rutas, rutas rígidas y rutas flexibles, etc.), intentando evaluar la ventaja comparativa de usar el enfoque propuesto.

Las conclusiones más importantes que se pueden extraer de este conjunto de experimentos son:

1) En todos los casos la solución que aporta la metodología que se propone mejora los resultados que aportan cualquiera de las otras políticas alternativas que se estudian, bajo cualesquiera condiciones experimentales.

2) Se ha observado que un ligero desequilibrio de la carga de trabajo de las máquinas que integran el sistema proporciona unos resultados mejores que otras soluciones aportadas por cargas de trabajo más equilibradas. Asimismo, en base a los resultados, parece que no es la carga relativa de las máquinas, derivada de la selección de rutas, el factor determinante del mejor o peor comportamiento del sistema, sino que depende más del reiterado grado de acierto al asignar las rutas respecto del estado real del taller en cada momento.

3) Se ha observado también que, aunque en la mayoría de los casos las soluciones que se obtenían para rutas flexibles mejoran los resultados que se obtenían para rutas rígidas (bajo las mismas condiciones experimentales), existen situaciones en las que esto no se produce, por lo que el dotar a un sistema de un cierto grado de flexibilidad, no asegura que automáticamente se mejore la eficiencia del mismo.

4) Los resultados muestran claramente que no sólo es importante determinar el mix de rutas, sino que el **timing** (instante en que se selecciona cada ruta) es posiblemente más importante que la determinación de la frecuencia de elección de rutas.

5.- SEGUNDO ESCENARIO.

En este segundo escenario se va a abordar un sistema de fabricación flexible, en el que la característica específica diferenciada respecto al estudiado en el capítulo anterior es el sistema de transporte, constituido por un conjunto finito de vehículos guiados automáticamente (AGV). El sistema de almacenamiento centralizado sustituye a los buffers locales de cada estación del escenario anterior, tal como puede verse en la figura 5.1.

La estructura de la presentación de este escenario será igual a la del primero. En un primer apartado se van a describir las características que definen el comportamiento del sistema a estudiar. En un segundo apartado se va esbozar brevemente el conjunto de matrices, vectores, variables y ficheros que conforman la base de datos que caracterizan al sistema en estudio y la evolución del mismo. Por último habrá un extenso apartado donde se presentan los resultados de los distintos experimentos que se han realizado.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN

Se consideran las siguientes hipótesis de trabajo:

- Se suponen conocidos el número de estaciones, el número de máquinas de cada estación, así como la distancia entre máquinas.
- También serán conocidas el número máximo de piezas en el sistema, es decir, el número de pallets disponibles, y el número total de vehículos de transporte, así como la velocidad de los mismos.
- Para cada ruta que pueda seguir una pieza, se suponen conocidas todas las operaciones que forman esa ruta, así como el tiempo de procesado de cada operación en la correspondiente estación.
- Se suponen deterministas todos los datos del problema, excepto la información correspondientes a la rotura y reparación de máquinas en el caso de que se produzcan averías.
- Acerca de las de rutas rígidas y flexibles, se mantienen vigentes las mismas consideraciones que se habían hecho para las mismas en el escenario anterior.
- Se supone que el cambio de herramientas en una máquina es tan pequeño, que podemos considerarlo despreciable.
- No existirán colas físicas delante de cada máquina, sino que se considerará un almacén centralizado intermedio para productos en curso de fabricación. Las distintas posiciones disponibles en este almacén para los pallets, estarán divididas en áreas diferenciadas para colocar lo mas próximas entre si las piezas en espera para cada máquina.

- Se supone que si la operación siguiente se realiza en una máquina del mismo tipo, la pieza no abandona esta máquina, ya que se ha supuesto con anterioridad que el tiempo de cambio de herramientas es prácticamente nulo.
- El mecanismo de alimentación de las máquinas está constituido por un pallet doble giratorio, que en cada instante tendrá una posición en el interior de la máquina y otra en la zona exterior cerca del circuito por donde pasan los vehículos de transporte.

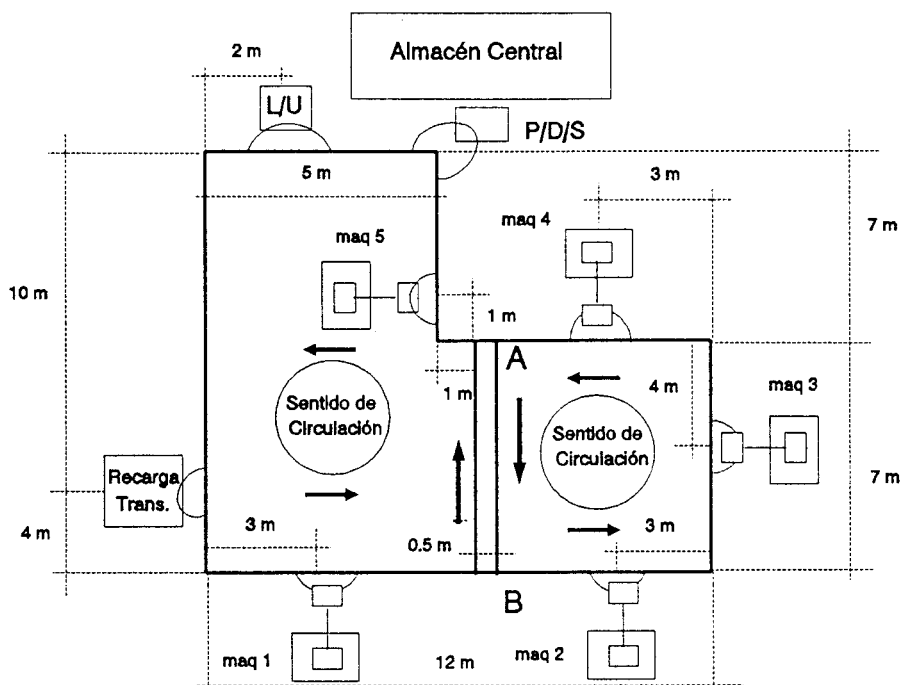


Figura 5.1 Esquema de los elementos del segundo escenario

- Se producirá una situación de bloqueo en el momento en que una pieza acaba su procesamiento y la otra posición del pallet doble giratorio está ocupada por la pieza ya procesada anteriormente y que no ha podido abandonar esta máquina.

- Como se puede observar en la figura 5.1, existen cinco diferentes tipos de máquinas que se agrupan en tres estaciones de la siguiente forma:

	MAQ1	MAQ2	MAQ3	MAQ4	MAQ5
ESTACIÓN	1	2	3	1	2

Es decir que consta de tres estaciones la estación 1 que esta integrada por las máquinas 1 y 4, la estación 2 integrada por las máquinas 2 y 5 y la estación tres integrada por la estación 3.

- Además de las estaciones existen otros tipos de dispositivos físicos que serán específicos de este sistema, como el ya mencionado almacén centralizado de material en curso, la estación de carga y descarga de piezas y la estación de recarga de baterías.

- La distancias entre estos dispositivos y el resto de máquinas dentro del circuito, también serán conocidos, como puede verse en la figura 5.1.

- También existe un dispositivo que se denomina en la figura P/D/S que representa la interfase con el almacén de productos en curso de fabricación.

- Otro dato que será conocido es el circuito físico por el que van a poder moverse los vehículo guiados automáticamente. Esto obliga a identificar las distancias entre estaciones conectadas por el circuito y que son las siguientes:

	MAQ1	MAQ2	MAQ3	MAQ4	MAQ5	PDS	L/U	REC
MAQ1	0	6	12	19	12	18	21	33
MAQ2	46	0	6	13	18	24	27	39
MAQ3	40	20	0	7	12	18	21	33
MAQ4	33	13	19	0	5	11	14	26
MAQ5	28	34	40	47	0	6	9	21
PDS	22	28	34	41	34	0	3	15
L/U	19	25	31	38	31	37	0	12
REC	7	13	19	26	19	25	28	0

Tabla 5.1 Distancias. 2º escenario

En la tabla 5.1 representa las distancias entre las distintas estaciones y dispositivos que integran el sistema, siguiendo el circuito y el sentido de movimiento que aparecen en la figura 5.1, lo que da lugar a que por ejemplo la distancia desde la máquina 4 a la 3 sea de 19, y en cambio la distancia desde la máquina 3 a la 4 sea 7.

- Las máquinas son susceptibles de sufrir averías y sus consiguientes reparaciones. Las averías seguirán una función exponencial y las reparaciones un distribución uniforme. Se supone que la reparación se inicia siempre inmediatamente después del instante en que ocurre la avería.

- Se supone que todos los vehículos van a tener la misma velocidad y que por lo tanto no se van a producir colisiones de dos vehículos cuando uno vaya detrás de otro.

- El tramo A-B de la figura 5.1 se va a suponer desdoblado con la idea de que no se produzcan colisiones en el caso de que dos vehículos se encuentre en este tramo en sentido contrario. Se hace la hipótesis simplificativa de que la distancia d entre estas líneas desdobladas es tan pequeña que no va tener apenas incidencia en el recorrido global de cada desplazamiento parcial de un vehículo en particular.

- Se supone también que delante de cada máquina (como se ve en la figura 5.1), hay un pequeño desvío de tal forma que cuando un vehículo debe dejar una pieza en una máquina, se desvía un poco para evitar bloquear el tráfico en ese tramo del circuito.

- Se va a suponer que desde el momento en que un transporte llega a una máquina con una pieza, hasta que esta en disposición de salir (tras dejar dicha pieza) transcurre un tiempo despreciable.

- Se supone que cada vehículo esta dotado de una batería recargable y que esa carga le va a durar un período de tiempo (500 unidades de tiempo en nuestro caso). Cuando ha transcurrido ese período de tiempo el vehículo ha agotado su carga y se dirige a la estación de recarga de baterías, donde permanece un período de tiempo (10 unidades de tiempo) para recargar.

- Se supone también que cuando un transporte llega a una estación y deposita la pieza que llevaba, quedando por lo tanto libre, se va a estacionar en dicha estación si ningún otro elemento lo solicita.

- Se va a suponer que el tiempo de ubicación/extracción de una pieza desde el dispositivo P/D/S hasta su posición en el almacén centralizado de piezas en curso será constante y conocido pero diferente, según la cola en cuestión.

Y son:

	MAQ1	MAQ2	MAQ3	MAQ4	MAQ5
TIEMPO	4	6	8	4	6

5.2 IMPLEMENTACIÓN

Este apartado va a constar de dos partes, en la primera de las cuales se va a describir brevemente los ficheros, matrices y vectores que definen y caracterizan al sistema y en un segundo apartado se esbozará, grosso modo, la lógica de la evolución del sistema.

5.2.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

Al igual que para el caso del escenario anterior, se pueden distinguir diferentes conjuntos de ficheros y matrices. Un primer conjunto de ficheros describen las rutas de fabricación de las piezas dentro del sistema: operaciones que componen cada ruta, estación donde se realiza y tiempo de cada una de ellas en la correspondiente estación, etc. En un segundo grupo tendremos las diversas matrices, vectores y variables que definen el estado del sistema, que debe de contemplar: identificación y localización de cada pieza que actualmente esté en el sistema, ruta asignada a cada pieza, operación que se está realizando a cada pieza, estado actual y próximos eventos que afectan a las máquinas y transportes, etc; dentro de este grupo estarán encuadrados los ficheros de averías que nos indicaran en cada momento si las máquinas están averiadas o no. Un tercer grupo diferenciado va a estar constituido por la información relacionada con la codificación de los transportes, que es un aspecto muy importante de este escenario. Un cuarto grupo está constituido por el conjunto de matrices, variables y ficheros que contienen un registro histórico de los valores de algunas de las matrices y vectores mencionados a lo largo de la simulación, así como los ficheros que contienen el registro de las variables que se quieren observar.

Dentro del primer grupo tenemos el conjunto de ficheros y matrices que se indican a continuación y que son en sus nombres y diseños idénticos a los que se habían definido para el primer escenario, concretamente:

- El fichero de secuencias rígidas.
- El fichero de secuencias flexibles.
- El fichero de grupos de operaciones.
- El fichero de operaciones.

Estos ficheros son los mismos que para el caso del escenario anterior, por lo que sus contenidos y campos son los que se describieron en el epígrafe homónimo del escenario anterior.

Las matrices que vamos a describir a continuación, son el soporte básico de información que caracterizan al sistema y que nos van a indicar en cada instante la situación en que se encuentra este sistema. Se van a enumerar las matrices mas importantes para que sea fácil hacerse una idea global de cómo se encuentran codificados los datos que definen el estado del sistema, estas son:

- Matriz de piezas en posición inicial
- Matriz de secuencias en posición inicial
- Matriz de puntero de operaciones
- Vector de tiempos de acabado
- Vector de tipo de máquina
- Vector de piezas en máquinas
- Vector de pieza en posición inicial
- Vector de situación de la primera posición
- Colas de espera de las diferentes máquinas
- Vector de tiempos de acceso al almacén
- Vector de averías de máquina (que básicamente contiene tiempo, máquina, estado de la máquina)
- Vector de bloqueo de máquinas (retardo)

Los datos relacionados con el sistema de transporte y que integran el tercer conjunto de matrices y vectores son básicamente:

- Matriz de distancias entre máquinas
- Vector de vehículos de transporte, cuyos campos son: nº de vehículo, origen, destino, situación actual, tiempo de llegada.

El cuarto grupo está constituido por el conjunto de matrices, variables y ficheros resultados de la simulación. Su estructura es similar a la del mismo grupo que se definió para el primer escenario y dentro del mismo se encuentran:

- El fichero de sesión que registra el tiempo en que salió cada pieza del sistema, el tiempo de residencia, porcentaje de utilización de las máquinas, etc.
- El fichero de secuencia elegida que contiene que secuencia se ha elegido cada vez que se ha realizado el proceso de selección de ruta, etc.
- Etc.

4.2.2 EVOLUCIÓN DEL ESTADO DEL SISTEMA

Ya se han considerado ciertas hipótesis de funcionamiento de los distintos elementos que forman parte del sistema (AGV, almacén centralizado, etc) ahora se van a definir otras hipótesis adicionales para dejar perfectamente caracterizado el funcionamiento del sistema, y por lo tanto la lógica de la evolución del mismo.

Así se supondrá:

- 1) Una vez que un vehículo ha iniciado un desplazamiento para recoger y transportar una pieza, queda asignado a dicha pieza hasta la finalización de dicho transporte.
- 2) Se dará prioridad a la hora de asignar los recursos disponibles (transportes y máquinas) a las máquinas que estén ociosas, y en el caso de que todas las máquinas estén ocupadas, se intentarán ocupar las posiciones de los pallets

dobles giratorios que estén libres, antes de enviar alguna pieza al almacén centralizado, con el objeto de evitar en lo posible los tiempos de traslado. Esto parece que a priori, puede disminuir el tiempo en que las máquinas estén ociosas.

3) La siguiente prioridad será la de desocupar las máquinas que tienen alguna pieza en situación de procesado completo. De esta forma se minimiza la ocurrencia de bloqueos de máquinas.

Si no se consideran averías, la filosofía de la evolución será similar a la del caso del primer escenario y entonces, básicamente se podría considerar que en el sistema existen dos tipos de eventos significativos:

- Cuando una máquina acaba el procesado de una pieza.
- Cuando un transporte llega a su destino.

La lógica de la simulación se basaría en la búsqueda en las matrices correspondientes del instante de tiempo más próximo en el cual ocurre un evento significativo para el estado del sistema. En un instante dado podrían presentarse tres situaciones: a) que una máquina acabe su procesado, b) que llegue un transporte a su destino y c) que ocurran simultáneamente ambas cosas.

Pasemos a analizar estas tres situaciones.

a) Si este tiempo más próximo pertenece a la matriz de tiempos de acabado, con la información de la pieza que acaba su procesado, tendrá que buscar un transporte disponible para ser transportada (se buscará el transporte libre que esté más cercano). Se accede a las matrices y vectores que definen el estado del sistema y se actualizan (se incrementa su contador de avance, se accede al fichero de secuencia para ver la próxima operación, se actualiza la matriz de tiempos de llegada, se reemplaza el hueco dejado en la máquina, ...). Si no existe un transporte disponible en dicha estación se actualiza la matriz de tiempos de transporte de tal manera que se calcularía el tiempo en que ese transporte llega a la máquina que lo ha solicitado, pasando este nuevo tiempo a ser un nuevo tiempo de la matriz de tiempos de llegada, y se sigue buscando un nuevo tiempo en que se produzca algún evento.

b) Si pertenece a la matriz de tiempos de llegada de algún transporte, esto implica que o bien el transporte llega a una máquina para dejar su pieza (o recoger alguna), o bien llega al dispositivo de entrada salida de piezas, o al área de recarga de energía, o al almacén centralizado. En función de cual sea la situación se pasará a actualizar las matrices que correspondan.

c) En el caso de que exista algún tiempo común en la matriz de acabado y en los vectores que codifican los transportes, se realizaran ambos procesos antes de avanzar a un nuevo instante del sistema.

Como ahora se contempla la posibilidad de que se produzcan averías, sobre el caso anterior se introduce una nueva situación que viene representada por el vector de averías. Este vector entraría al mismo nivel que el de tiempo de finalización de máquinas y tiempo de llegada de un vehículo a su destino. Básicamente se puede considerar que en el sistema existe dos tipos de eventos más: la ocurrencia de una avería y la finalización de la reparación de alguna avería que se haya producido previamente.

5.3 EXPERIMENTACIÓN.

En este apartado se va a seguir un esquema similar al que se siguió para el caso del escenario anterior. Así, se van a realizar una serie de experimentos correspondiente a un lote de 300, idéntico al del segundo grupo de experimentos del primer escenario.

La experimentación se ha dividido en dos grandes grupos: El primero, correspondiente a experimentación realizada bajo la hipótesis de que las máquinas no son susceptibles de roturas, contemplándose distintas variantes experimentales (rutas rígidas, flexibles, diferente número de transportes, ...), y un segundo grupo donde se contempla la posibilidad de que las máquinas sean susceptibles de roturas.

Como se mencionó en el escenario anterior, realmente se simula y se selecciona las rutas correspondientes a las 300 piezas que entrarán en el sistema, ya que las 10 primeras piezas que constituyen la carga inicial del sistema, tienen asignada una ruta inicial de forma aleatoria.

Estamos interesados en el estudio de la misma serie de variables del escenario anterior y que se consideran relevantes para evaluar la eficiencia del sistema:

- La suma total de los tiempos de residencia de todas las piezas del lote.
- El tiempo de finalización de la última pieza fabricada del lote.
- Los niveles de utilización de las máquinas, definidos como el tiempo en que se ha utilizado cada máquina, partido por el intervalo de tiempo hasta que la última pieza que debía de realizar una operación en esa máquina ha salido de la misma. Se ha elegido dicho hito de tiempo (dependiente de la máquina), ya que a partir de este instante la máquina podría estar disponible para su puesta a punto (renovación de su almacén de herramientas, mantenimiento, etc) con vistas a la fabricación del siguiente lote.

Además se ha registrado otra variable que aunque no corresponde a una medida de la eficiencia del sistema, es importante. Se trata de:

- La frecuencia relativa de selección de las diferentes rutas.

Vamos a observar cómo se comportan estas variables ante distintas situaciones del sistema, en particular ante diferentes tipos de disciplinas de cola en los buffers de cada estación de trabajo en el almacén centralizado. Las disciplinas de cola son: FIFO, SPT Y BPD, Definidas como se hizo en el apartado 4.3 del escenario anterior. Se han elegido las disciplinas de cola SPT y BPD ya que son las que a priori parece que pueden ofrecer unos mejores resultados. A su vez, la disciplina FIFO se considera porque, aunque a priori no parezca muy prometedora, si es bastante usual. No se han probado más disciplinas de cola ya que, como se expuso para el escenario anterior, no se pretende seleccionar la disciplina de cola que mejora el comportamiento del sistema, sino observar el comportamiento de la metodología que se propone bajo diferentes hipótesis experimentales.

3.1 PRIMER GRUPO DE EXPERIMENTOS. SIN ROTURAS DE MÁQUINAS.

Las secuencias rígidas y flexibles por las que se pueden producir las piezas son las mismas que se han utilizado para el segundo grupo de experimentos del primer escenario y están recogidas en las tablas 4.2 y 4.12 para las rutas rígidas y en las tablas 4.3 y 4.13 para las rutas flexibles.

Se van a considerar las mismas políticas de selección de rutas que se definieron en la tabla 4.14 (SECMEJOR, SECPEOR, SECLOOK) y las variantes que aparecen en la tabla 4.15 (SECCA20, SECCA10, SECCA36 Y SECCAMBI). Recuérdese que estas últimas intentaban medir el grado de degradación que sufría la solución aportada por la política SECLOOK.

El número de transportes disponibles es de 5.

El nº de pallet en el sistema es de 10.

La velocidad de los vehículos es de 1 m / unidad de tiempo

Vamos a observar cómo se comportan las variables con las que intentamos medir la eficiencia del sistema (sumatorio de los tiempos de residencia, ratios de utilización de las máquinas,...), ante diversas condiciones experimentales. En un primer experimento para el caso de rutas rígidas de fabricación, en un segundo experimento para rutas flexibles y con un heurística de selección de operaciones dentro del grupo basadas en el ratio de utilización de las máquinas, en un tercer experimento para rutas flexibles y una heurística de selección de operaciones dentro del grupo basada en la distancia de la máquina más próxima. En un cuarto experimento y a la vista de los resultados de los anteriores experimentos, se ha probado una nueva heurística para seleccionar las operaciones de las rutas flexibles,

en concreto se han seleccionado las operaciones que se realicen en la máquina que en el instante en que se debe de elegir la operación a realizar, tenga una menor carga de trabajo en su cola de espera. En una segunda variante se van a observar los resultados para el caso de que varíe el número de transportes de los que se dispone en el sistema y el efecto que ello produce en el mismo.

La estación que se ha considerado cuello de botella para el caso que se utilice la disciplina BPD ha sido estación 3. Esta selección se ha hecho a priori y considerando que la estación 3 sólo dispone de una máquina, mientras que los otros dos tipos de estaciones disponen de dos máquinas cada una de ellas. Con posterioridad y a la vista de los resultados se eligió para una nueva experimentación con la disciplina de cola BPD la estación 1.

5.3.1.1 EXPERIMENTOS CON RUTAS RÍGIDAS.

Dentro de este grupo se van a considerar en primer lugar los resultados para rutas rígidas y para las diferentes disciplinas de cola FIFO, SPT y BPD.

5.3.1.1.1 RESULTADOS.

En las tablas 5.2 y 5.3 se observan los resultados de las distintas variables en las que estamos interesados, para rutas rígidas y para la disciplina de cola FIFO. Dichas tablas tienen la misma estructura que las vistas en el capítulo anterior y su contenido es similar.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	165.766	175.524	152.238	158.061	161.722	160.817	158.567
Ratio respecto a SECLOOK	1,09	1,15	1,00	1,04	1,06	1,06	1,04
TMP-FIN-LOTE	16.750	17.780	15.378	16.088	16.479	16.400	16.079
Ratio respecto a SECLOOK	1,09	1,16	1,00	1,05	1,07	1,07	1,05
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	24,8	42,2	46,1	42,4	39,5	43,1	44,0
(MAQ4)	16,6	40,5	28,4	26,7	26,6	28,0	26,9
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	3,2	40,0	16,8	15,5	13,1	13,2	16,2
(MAQ5)	25,8	20,3	28,2	21,8	21,2	23,5	25,5
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	8,7	2,8	10,4	15,0	15,0	11,0	11,4

Tabla 5.2 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. FIFO

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	16	24	30	25	16
A	2	0	0	17	17	15	18	17
A	3	0	0	14	15	18	12	14
A	4	0	0	19	14	12	16	19
A	5	0	100	34	30	25	29	34
B	1	0	0	53	53	53	45	53
B	2	100	0	39	39	39	39	39
B	3	0	100	8	8	8	16	8
C	1	0	0	46	46	46	50	46
C	2	0	100	17	17	17	34	17
C	3	100	0	37	37	37	26	37
D	1	100	0	8	8	8	8	8
D	2	0	0	22	22	22	23	22
D	3	0	100	32	32	32	31	32
D	4	0	0	38	38	38	38	38
E	1	100	0	67	67	67	42	67
E	2	0	100	33	33	33	58	33

Tabla 5.3 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. FIFO

En las tablas 5.4, 5.5, se observan los resultados de las distintas variables en las que estamos interesados, para rutas rígidas y para las disciplina de cola SPT.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	161.758	180.606	149.371	162.219	160.904	168.510	161.142
Ratio respecto a SECLOOK	1,08	1,21	1,00	1,07	1,08	1,13	1,08
TMP-FIN-LOTE	16.405	18.222	15.104	16.430	16.307	17.086	16.356
Ratio respecto a SECLOOK	1,09	1,21	1,00	1,09	1,08	1,13	1,08
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	25,3	41,2	45,0	41,4	42,3	40,1	41,6
(MAQ4)	16,2	38,6	29,6	25,6	24,3	25,2	27,2
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	4,0	40,0	13,1	13,4	14,7	12,6	12,3
(MAQ5)	24,5	20	27,1	27,3	21,7	21,7	25,6
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	9,7	2,5	13,2	10,0	16,1	14,2	11,7

Tabla 5.4 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. SPT

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
Tipo de pieza	secuencia							
A	1	100	0	17	17	16	15	27
A	2	0	0	17	18	19	23	17
A	3	0	0	17	18	16	18	17
A	4	0	0	19	19	22	17	19
A	5	0	100	30	28	27	27	30
B	1	0	0	47	47	47	42	47
B	2	100	0	50	50	50	47	50
B	3	0	100	3	3	3	11	3
C	1	0	0	46	46	46	58	46
C	2	0	100	37	37	37	25	37
C	3	100	0	17	17	17	17	17
D	1	100	0	14	14	14	16	14
D	2	0	0	23	23	23	23	23
D	3	0	100	30	30	30	31	30
D	4	0	0	33	33	33	30	33
E	1	100	0	75	75	75	75	75
E	2	0	100	25	25	25	25	25

Tabla 5.5 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. SPT

En las tablas 5.6, 5.7, se observan los resultados de las distintas variables en las que estamos interesados, para rutas rígidas y para las disciplinas de cola BPD, suponiendo la estación 3 como cuello de botella, como ocurría en el primer escenario.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	160.413	178.217	148.526	159.568	162.534	160.611	158.748
Ratio respecto a SECLOOK	1,08	1,20	1,00	1,07	1,09	1,08	1,07
TMP-FIN-LOTE	16.214	18.058	14.999	16.177	16.405	16.238	16.130
Ratio respecto a SECLOOK	1,08	1,20	1,00	1,08	1,09	1,08	1,07
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	25,6	41,5	46,8	43,4	42,8	43,9	43,5
(MAQ4)	16,9	37,6	27,9	27,2	27,1	27,3	27,3
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	3,6	41,7	15,4	12,7	12,2	11,6	12,9
(MAQ5)	23,4	19,8	27,9	24,9	24,8	28,5	22,6
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	11,3	2,9	11,8	11,9	11,4	8,1	14,3

Tabla 5.6 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. BPD estación 3

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	24	25	26	23	24
A	2	0	0	13	17	17	17	13
A	3	0	0	13	13	12	14	13
A	4	0	0	20	18	16	17	20
A	5	0	100	30	29	29	29	30
B	1	0	0	64	64	64	58	64
B	2	100	0	28	28	28	33	28
B	3	0	100	8	8	8	9	8
C	1	0	0	38	38	38	38	38
C	2	0	100	24	24	24	29	24
C	3	100	0	38	38	38	33	38
D	1	100	0	11	11	11	17	11
D	2	0	0	20	20	20	20	20
D	3	0	100	25	25	25	24	25
D	4	0	0	44	44	44	39	44
E	1	100	0	75	75	75	50	75
E	2	0	100	25	25	25	50	25

Tabla 5.7 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. BPD estación 3

En las tablas 5.8, 5.9, se observan los resultados de las distintas variables en las que estamos interesados, para rutas rígidas y para las disciplinas de cola BPD, pero considerando como cuello de botella la estación 1, que a la vista de los resultados de los experimentos anteriores parece ser la máquina más utilizada.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	166.166	178.597	154.256	161.871	163.285	165.120	161.327
Ratio respecto a SECLOOK	1,08	1,16	1,00	1,05	1,06	1,07	1,04
TMP-FIN-LOTE	16.803	18.047	15.585	16.384	16.429	16.657	16.238
Ratio respecto a SECLOOK	1,08	1,16	1,00	1,05	1,05	1,07	1,04
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	24,7	41,6	45,5	41,2	43,0	42,5	42,7
(MAQ4)	16,0	37,2	27,5	24,6	28,7	31,2	26,2
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	3,8	42,1	16,0	16,1	13,5	9,6	15,6
(MAQ5)	25,7	19,1	26,3	22,9	26,8	26,1	22,0
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	7,7	3,6	12,5	14,1	11,2	9,1	15,3

Tabla 5.8 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. BPD estación 1

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS		SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
Tipo de pieza	secuencia	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A	1	100	0	20	23	26	21	20
A	2	0	0	17	20	19	21	17
A	3	0	0	14	12	12	15	14
A	4	0	0	22	20	18	18	22
A	5	0	100	27	25	25	25	27
B	1	0	0	42	42	42	33	42
B	2	100	0	39	39	39	31	39
B	3	0	100	19	19	19	36	19
C	1	0	0	46	46	46	50	46
C	2	0	100	8	8	8	8	8
C	3	100	0	46	46	46	42	46
D	1	100	0	13	13	13	19	13
D	2	0	0	18	18	18	19	18
D	3	0	100	35	35	35	33	35
D	4	0	0	34	34	34	29	34
E	1	100	0	58	58	58	58	59
E	2	0	100	42	42	42	42	42

Tabla 5.9 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. BPD estación 1

5.3.1.1.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como puede observarse de los resultados anteriores, se desprende que la metodología propuesta mejora los resultados que se obtienen para cualquier otra política de selección de rutas probada, lo que sigue confirmando la validez y robustez de la metodología propuesta. La mejora de los resultados para las disciplinas de cola probadas están por encima del 4 %, ya se consideren las mejoras en los sumatorios de los tiempos de residencia o en el instante de finalización del lote a fabricar.

Hay que señalar que el considerar a priori la estación 3 como la estación más cargada y que supone un cuello de botella en el sistema no es muy acertada, pues hay otras estaciones que están a un mayor nivel de utilización. Lo que si se observa es que para incluso el caso de que no se elija la estación adecuada como cuello de botella, la metodología sigue presentando mejores resultados que las demás políticas alternativas probadas.

De hecho como puede observarse, en las tablas 5.8 y 5.9, donde se ha considerado como estación cuello de botella la estación 1, los resultados no han mejorado; de hecho han empeorado independientemente de la política utilizada. Lo que si ha ocurrido es que los ratios de utilización de la estación 1 han bajado ligeramente, ya que la disciplina de cola BPD intenta descargar de trabajo la estación

que se considera como cuello de botella. Lo que se sigue manteniendo es la mejora que presenta la metodología frente al resto de políticas alternativas probadas.

A la vista de los resultados, y aunque no se han mostrado las estadísticas para los transportes, parece claro que van a ser los transportes los que limitan la tasa de producción, y por lo tanto serían el cuello de botella para el caso de que sólo se dispusiesen de 5 vehículos. Las máquinas tienen unos ratios de ocupación relativamente bajos; de hecho, la máquina que está más ocupada, nunca tiene unos ratios de ocupación por encima del 50 %. Esta apreciación se podrá completar cuando se muestren los efectos de incrementar el número de vehículos de transporte.

Se puede observar en las columnas SECLOOK y SECCA20 de la tabla 5.2 que la política SECCA20 presenta un equilibrado de máquinas mayor que la política SECLOOK y en cambio no mejora la eficiencia del sistema en términos de sumatorios de los tiempos de residencia. Y es que para un horizonte finito, la clave no está en equilibrar la carga de las máquinas, en el sentido de que ello no es garantía de un flujo efectivo de material.

Al comparar los resultados para las políticas SECLOOK y SECCAMBI, se observa que para el mismo mix de rutas, la metodología propuesta mejora la solución aportada por la política alternativa en un porcentaje superior al 4 %, como consecuencia de seleccionar las rutas en un momento distinto en una y otra política.

5.3.1.2 EXPERIMENTOS CON RUTAS FLEXIBLES.

Se han considerado en este apartado tres alternativas a la hora de seleccionar la siguiente operación dentro de un mismo grupo de operaciones. El considerar tres heurísticas diferentes ha sido consecuencia de que al probar una heurística y observar que no mejora los resultados que se obtenían para rutas rígidas, se ha intentado desarrollar otras alternativas para intentar mejorar los resultados de los casos ya probados, para sacarle rendimiento al hecho de dotar al sistema de un mayor grado de flexibilidad (en este caso flexibilidad en las rutas).

La primera de las alternativas consiste en seleccionar la próxima operación a realizar de forma que se elige aquella que se vaya a realizar en la máquina que hasta este momento tenga un menor porcentaje de utilización, con la idea de intentar equilibrar a posteriori la carga de trabajo de las máquinas que integran el sistema en el horizonte en que se va a producir el lote.

La otra alternativa será la de seleccionar la operación que se vaya a realizar en aquella máquina que se encuentre más próxima a la máquina en la que actualmente se encuentra la pieza que va a sufrir dicha operación, aunque esta opción no suponga un equilibrado de la utilización de las máquinas, pero por el diseño del taller, las rutas y el número de vehículos disponibles, los transportes parecen tener un peso importante.

La última alternativa probada ha sido la de seleccionar dentro de un grupo la operación que se realice en la máquina que en el instante en que se selecciona la operación tenga una menor carga de trabajo.

5.3.1.2.1 PRIMERA VARIANTE PARA RUTAS FLEXIBLES

El criterio para seleccionar una operación dentro de un grupo de operaciones para las rutas flexibles será el de elegir aquella operación que se realice en la máquina que hasta este instante tenga un menor ratio de utilización (expresado en %), con la idea de equilibrar la carga de las máquinas del sistema, en el período simulado.

5.3.1.2.1.1 RESULTADOS

En las tablas 5.10 y 5.11 se presentan los resultados para el caso de rutas flexibles y para la disciplina de cola FIFO.

SEC-ENTRADA	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
VARIABLES EN ESTUDIO							
TMP-RES-TOTAL	171.863	196.873	163.672	173.063	172.953	171.669	170.737
Ratio respecto a SECLOOK	1,05	1,20	1,00	1,06	1,06	1,05	1,04
TMP-FIN-LOTE	17.354	19.885	16.561	17.548	17.494	17.452	17.479
Ratio respecto a SECLOOK	1,05	1,20	1,00	1,06	1,06	1,05	1,05
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	23,9	37,7	45,9	42,6	42,4	42,0	43,5
(MAQ4)	14,3	34,5	26,6	25,5	23,7	24,9	23,9
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	4,8	37,5	14,1	13,3	14,3	12,9	14,7
(MAQ5)	21,1	15,2	23,0	21,2	19,9	20,4	21,7
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	11,2	5,4	12,0	12,2	13,3	12,8	11,4

Tabla 5.10 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1ª variante. FIFO

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS		SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
Tipo de pieza	secuencia	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A	1	100	0	20	21	23	25	20
A	2	0	0	47	45	42	45	47
A	3	0	0	5	7	7	5	5
A	4	0	0	3	4	5	4	3
A	5	0	100	25	23	23	21	25
B	1	0	0	36	36	36	31	36
B	2	100	0	42	42	42	42	42
B	3	0	100	22	22	22	27	22
C	1	0	0	24	24	24	38	24
C	2	0	100	38	38	38	20	38
C	3	100	0	38	38	38	42	38
D	1	100	0	14	14	14	24	14
D	2	0	0	27	27	27	19	27
D	3	0	100	36	36	36	38	36
D	4	0	0	23	23	23	19	19
E	1	100	0	58	58	58	34	58
E	2	0	100	42	42	42	66	42

Tabla 5.11 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1ª variante. FIFO

En las tablas 5.12, 5.13, se presentan los resultados para el caso de rutas flexibles y para la disciplina de cola SPT.

SEC-ENTRADA	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
VARIABLES EN ESTUDIO							
TMP-RES-TOTAL	168.511	198.001	166.402	173.332	177.486	172.039	170.630
Ratio respecto a SECLOOK	1,01	1,19	1,00	1,04	1,07	1,03	1,03
TMP-FIN-LOTE	17.020	19.972	16.808	17.550	17.889	17.439	17.361
Ratio respecto a SECLOOK	1,01	1,19	1,00	1,04	1,06	1,03	1,03
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	24,4	37,6	46,4	44,4	43,4	44,5	44,9
(MAQ4)	15,2	36,1	26,7	25,0	23,5	24,9	26,4
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	4,4	35,6	113,0	13,1	13,7	11,2	11,9
(MAQ5)	20,9	15,8	23,2	24,8	22,2	23,4	23,2
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	11,12	4,8	9,5	6,5	8,6	9,7	8,4

Tabla 7.12 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1ª variante. SPT

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	23	23	23	23	23
A	2	0	0	48	47	47	50	48
A	3	0	0	5	5	6	5	5
A	4	0	0	1	1	1	1	1
A	5	0	100	23	24	23	21	23
B	1	0	0	44	44	44	50	44
B	2	100	0	42	42	42	33	42
B	3	0	100	14	14	14	17	14
C	1	0	0	20	20	20	24	20
C	2	0	100	38	38	38	38	38
C	3	100	0	42	42	42	38	42
D	1	100	0	11	11	11	18	11
D	2	0	0	35	35	35	27	35
D	3	0	100	33	33	33	28	33
D	4	0	0	21	21	21	27	21
E	1	100	0	33	33	33	42	33
E	2	0	100	67	67	67	58	67

Tabla 5.13 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1ª variante. SPT

En las tablas 5.14, 5.15, se presentan los resultados para el caso de rutas flexibles y para la disciplina de cola BPD, considerando la estación 3 como cuello de botella.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	174.552	201.088	163.298	170.780	170.255	170.070	170.737
Ratio respecto a SECLOOK	1,07	1,23	1,00	1,05	1,04	1,04	1,05
TMP-FIN-LOTE	17.669	20.353	16.539	17.255	17.169	17.265	17.372
Ratio respecto a SECLOOK	1,07	1,23	1,00	1,04	1,04	1,04	1,05
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	23,5	36,8	42,5	40,7	40,7	40,7	40,4
(MAQ4)	14,5	34,5	27,2	26,2	26,5	24,6	24,9
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	4,3	35,9	13,2	12,3	12,1	12,9	13,5
(MAQ5)	20,6	15,4	26,3	22,7	22,2	22,4	21,6
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	11,2	4,8	10,2	12,4	13,1	12,1	13,1

Tabla 5.14 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1ª variante. BPD estación 3

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	24	24	24	26	24
A	2	0	0	39	40	38	35	39
A	3	0	0	6	7	8	11	6
A	4	0	0	8	7	8	8	8
A	5	0	100	23	22	22	20	23
B	1	0	0	28	28	28	33	28
B	2	100	0	47	47	47	39	47
B	3	0	100	25	25	25	28	25
C	1	0	0	25	25	25	29	25
C	2	0	100	46	46	46	38	46
C	3	100	0	29	29	29	33	29
D	1	100	0	18	18	18	19	18
D	2	0	0	21	21	21	21	21
D	3	0	100	39	39	39	34	39
D	4	0	0	22	22	22	26	22
E	1	100	0	75	75	75	67	75
E	2	0	100	25	25	25	33	25

Tabla 5.15 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1ª variante. BPD estación 3

En las tablas 5.16, 5.17, se presentan los resultados para el caso de rutas flexibles y para la disciplina de cola BPD, considerando la estación 1 como cuello de botella.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	174.417	196.372	167.672	174.903	178.697	172.700	175.429
Ratio respecto a SECLOOK	1,04	1,17	1,00	1,04	1,06	1,03	1,04
TMP-FIN-LOTE	17.763	19.770	16.950	17.679	18.031	17.402	17.753
Ratio respecto a SECLOOK	1,05	1,17	1,00	1,04	1,06	1,03	1,04
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	23,4	38,0	45,1	42,6	41,7	45,0	43,0
(MAQ4)	14,9	34,6	28,3	25,2	28,7	26,3	26,9
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	3,8	37,8	15,0	16,4	13,0	11,0	14,4
(MAQ5)	19,3	16,2	24,2	18,5	20,5	21,7	20,4
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	12,3	4,6	7,0	11,3	8,4	10,2	9,3

Tabla 5.16 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1ª variante. BPD estación 1

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	20	20	19	18	20
A	2	0	0	39	33	29	47	33
A	3	0	0	9	12	14	8	12
A	4	0	0	0	3	3	1	3
A	5	0	100	32	32	35	26	32
B	1	0	0	47	47	47	38	47
B	2	100	0	25	25	25	31	25
B	3	0	100	28	28	28	31	28
C	1	0	0	29	29	29	50	29
C	2	0	100	33	33	33	25	33
C	3	100	0	38	38	38	25	38
D	1	100	0	15	15	15	22	15
D	2	0	0	30	30	30	28	30
D	3	0	100	34	34	34	25	34
D	4	0	0	21	21	21	25	21
E	1	100	0	50	50	50	75	50
E	2	0	100	50	50	50	25	50

Tabla 5.17 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 1ª variante. BPD estación 1

5.3.1.2.1.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Un primer resultado que se puede comentar es que la metodología propuesta en este caso también mejora los resultados que aportan las otras políticas alternativas. Y así aunque en la tabla 5.12 para el caso de la política SECMEJOR la mejora sólo sea del 1 %, para el resto de las políticas la mejora es superior.

Por otro lado al comparar los resultados para esta opción de rutas flexibles y los resultados para rutas rígidas, se observa un empeoramiento bastante notable. Esto muestra que para esta variante, el criterio que se sigue a la hora de utilizar las rutas flexibles no es muy acertado y que el intento de equilibrar las cargas de trabajo de las distintas máquinas que integran el sistema, empeora la eficiencia del mismo. Este resultado difiere del que se había obtenido para el escenario anterior.

También se observa, al igual que ocurría para rutas rígidas, que la identificación de la estación 1 como cuello de botella para la disciplina de cola BPD, no mejora los resultados respecto al caso en que se seleccionaba la estación 3.

5.3.1.2.2 SEGUNDA VARIANTE PARA RUTAS FLEXIBLES

En este caso el criterio para seleccionar una operación dentro de un grupo de operaciones para las rutas flexibles será el de elegir aquella operación que se realice en la máquina que este mas próxima a la máquina donde se encuentra actualmente la pieza que debe salir de una máquina en el instante actual.

5.3.1.2.2.1 RESULTADOS

En las tablas 5.18 y 5.19 se presentan los resultados para el caso de rutas flexibles y para la disciplina de cola FIFO.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	164.566	190.741	160.807	171.976	167.375	169.756	168.614
Ratio respecto a SECLOOK	1,02	1,19	1,00	1,07	1,04	1,06	1,05
TMP-FIN-LOTE	16.685	19.298	16.323	17.445	16.942	17.205	17.109
Ratio respecto a SECLOOK	1,03	1,19	1,00	1,07	1,04	1,06	1,05
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	24,9	38,9	45,6	41,9	42,9	42,8	43,2
(MAQ4)	15,3	35,8	27,5	22,9	25,1	24,5	26,2
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	4,7	38,4	13,2	15,1	13,7	10,9	12,4
(MAQ5)	23,0	17,7	26,5	21,4	23,4	22,6	22,6
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	10,7	3,5	10,0	12,3	11,5	12,7	11,1

Tabla 5.18 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. FIFO

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS		SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
Tipo de pieza	secuencia	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A	1	100	0	24	28	27	23	24
A	2	0	0	38	36	36	41	38
A	3	0	0	1	1	3	3	1
A	4	0	0	17	17	15	17	17
A	5	0	100	20	19	19	16	20
B	1	0	0	56	56	56	58	56
B	2	100	0	31	31	31	33	31
B	3	0	100	13	13	13	9	13
C	1	0	0	25	25	25	16	25
C	2	0	100	46	46	46	42	46
C	3	100	0	29	29	29	42	29
D	1	100	0	14	14	14	22	14
D	2	0	0	25	25	25	25	25
D	3	0	100	38	38	38	32	38
D	4	0	0	23	23	23	21	23
E	1	100	0	50	50	50	50	50
E	2	0	100	50	50	50	50	50

Tabla 5.19 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. FIFO

En las tablas 5.20 y 5.21, se presentan los resultados para el caso de rutas flexibles y para la disciplina de cola SPT.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	169.143	188.259	157.514	170.554	171.113	173.101	169.552
Ratio respecto a SECLOOK	1,07	1,19	1,00	1,08	1,09	1,10	1,08
TMP-FIN-LOTE	17.087	18.980	15.926	17.279	17.318	17.429	17.181
Ratio respecto a SECLOOK	1,07	1,19	1,00	1,08	1,09	1,09	1,08
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	24,3	39,5	46,0	41,4	41,3	43,5	42,6
(MAQ4)	15,3	38,3	29,9	24,7	28,2	27,0	26,5
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	4,2	37,2	13,3	14,4	10,3	8,9	13,6
(MAQ5)	18,2	17,7	25,8	20,6	23,3	22,4	21,6
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	14,6	3,9	9,5	12,5	10,0	9,1	11,2

Tabla 5.20 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. SPT

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS		SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
Tipo de pieza	secuencia	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A	1	100	0	24	23	23	23	24
A	2	0	0	30	30	30	34	30
A	3	0	0	6	11	11	11	6
A	4	0	0	17	15	16	11	17
A	5	0	100	23	21	21	21	23
B	1	0	0	50	50	50	47	50
B	2	100	0	31	31	31	28	31
B	3	0	100	19	19	19	25	19
C	1	0	0	37	37	37	50	37
C	2	0	100	30	30	30	25	30
C	3	100	0	33	33	33	25	33
D	1	100	0	15	15	15	23	15
D	2	0	0	28	28	28	32	28
D	3	0	100	36	36	36	24	36
D	4	0	0	21	21	21	21	21
E	1	100	0	67	67	67	75	67
E	2	0	100	33	33	33	25	33

Tabla 5.21 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. SPT

En las tablas 5.22 y 5.23, se presentan los resultados para el caso de rutas flexibles y para la disciplina de cola BPD, considerando como cuello de botella la estación 3.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	167.851	188.070	162.275	171.939	174.609	176.512	164.748
Ratio respecto a SECLOOK	1,03	1,16	1,00	1,06	1,08	1,09	1,02
TMP-FIN-LOTE	16.966	18.922	16.395	17.369	17.756	17.896	16.629
Ratio respecto a SECLOOK	1,03	1,16	1,00	1,06	1,08	1,09	1,02
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	24,5	39,6	43,3	40,5	39,7	42,5	42,7
(MAQ4)	15,5	35,8	27,2	26,5	26,0	24,3	27,8
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	4,1	39,9	11,4	10,6	10,5	10,0	10,3
(MAQ5)	22,2	17,9	25,7	29,3	21,9	22,3	23,7
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	10,8	3,8	11,7	11,8	12,6	11,0	13,2

Tabla 5.22 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. BPD estación 3

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	27	25	23	26	27
A	2	0	0	28	26	25	26	28
A	3	0	0	7	10	12	10	7
A	4	0	0	21	19	20	19	21
A	5	0	100	17	20	20	19	17
B	1	0	0	47	47	47	40	47
B	2	100	0	25	25	25	30	25
B	3	0	100	28	28	28	30	28
C	1	0	0	38	38	38	25	38
C	2	0	100	42	42	42	58	42
C	3	100	0	20	20	20	17	20
D	1	100	0	20	20	20	18	20
D	2	0	0	16	16	16	22	16
D	3	0	100	34	34	34	28	34
D	4	0	0	30	30	30	32	30
E	1	100	0	67	67	67	25	67
E	2	0	100	33	33	33	75	3

Tabla 5.23 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. BPD estación 3

En las tablas 5.24 y 5.25, se presentan los resultados para rutas flexibles y para la disciplina de cola BPD, considerando como cuello de botella la estación 1.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	167.508	184.306	158.682	166.497	171.785	169.310	162.839
Ratio respecto a SECLOOK	1,06	1,16	1,00	1,05	1,08	1,07	1,03
TMP-FIN-LOTE	16.926	18.598	16.024	16.827	17.416	17.086	16.522
Ratio respecto a SECLOOK	1,06	1,16	1,00	1,05	1,08	1,07	1,03
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	24,5	40,4	47,8	45,3	43,3	43,1	46,4
(MAQ4)	16,1	36,1	28,6	25,3	26,9	24,7	27,8
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	3,6	40,9	11,5	13,5	11,3	10,2	11,1
(MAQ5)	21,9	18,4	24,7	22,1	21,0	23,2	26,3
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	11,3	3,7	11,1	11,5	11,1	10,9	8,5

Tabla 5.24 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. BPD estación 1

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS		SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
Tipo de pieza	secuencia	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A	1	100	0	21	23	23	29	21
A	2	0	0	37	33	27	31	37
A	3	0	0	5	5	7	7	5
A	4	0	0	17	17	19	16	17
A	5	0	100	20	22	24	17	20
B	1	0	0	61	61	61	56	61
B	2	100	0	28	28	28	33	28
B	3	0	100	11	11	11	11	11
C	1	0	0	50	50	50	42	50
C	2	0	100	29	29	29	29	29
C	3	100	0	21	21	21	29	21
D	1	100	0	15	15	15	20	15
D	2	0	0	28	28	28	26	28
D	3	0	100	31	31	31	27	31
D	4	0	0	26	26	26	27	26
E	1	100	0	50	50	50	42	50
E	2	0	100	50	50	50	58	50

Tabla 5.25 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 2ª variante. BPD estación 1

5.3.1.2.2.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como se observa en cualquier situación, la metodología presenta una mejora por encima del 2 % comparada con cualquier otra política, y se mantiene la mejora ante el mismo routing mix pero con distinto timing en la selección de las rutas como puede verse en las columnas SECLOOK Y SECCAMBI.

Nótese que para algunas disciplinas de cola que a priori deberían de aportar mejores resultados (SPT), respecto a otras a priori menos recomendables (FIFO), no se produce esta mejora esperada (algo que sí ocurría en el caso del taller del primer escenario), sino que se produce exactamente lo contrario para algunos casos (tanto para rutas rígidas, como para rutas flexibles). Esto se puede explicar si tenemos presente que, en el escenario anterior, el transporte de pallets entre estaciones, no presentaba situaciones de bloqueo y además las distancias eran del mismo orden que los tiempos de procesado, por lo que la organización de los buffers de piezas en proceso pasaba a tener mayor relevancia. Para este escenario, los transportes son finitos, y los tiempos de transporte son mucho mayores que en el taller anterior, por lo que pasan a tener una mayor incidencia en el comportamiento del taller, que la que pueda tener la disciplina de cola para las distintas máquinas en el almacén

centralizado.

No obstante en este trabajo no se intenta analizar cual es la disciplina de cola que más mejora la eficiencia del sistema. De hecho, Ishii y Talavage (1994) muestran que para ciertos casos la mejor opción no es una disciplina determinada, sino un mix dinámico de diferentes disciplinas de cola para cada máquina, en función del estado del sistema.

Vemos que para esta situación experimental, donde se seleccionan operaciones basándose en la proximidad de la siguiente máquina que se visite, se mejoran los resultados que se obtenían si se seleccionan las operaciones intentando equilibrar la carga de las máquinas, lo que da a entender que las distancias dentro del taller pueden, en este caso particular tener una mayor incidencia. No obstante los resultados para este caso siguen siendo peores en la mayoría de las políticas que para el caso de rutas rígidas. Esto nos puede inducir a afirmar que no basta con introducir un cierto grado de flexibilidad en un taller, sino que además habrá que estudiar cada taller en particular e intentar sacar partido a esa potencial ventaja que puede suponer dotar al taller de un cierto grado de flexibilidad.

5.3.1.2.3 TERCERA VARIANTE PARA RUTAS FLEXIBLES

Por último en este caso, el criterio para seleccionar una operación dentro de un grupo de operaciones para las rutas flexibles será el de elegir aquella operación que se realice en la máquina que en el instante en que se decide la operación a realizar, tenga una menor carga de trabajo en espera de ser realizado.

5.3.1.2.3.1 RESULTADOS

En las tablas 5.26 y 5.27 se presentan los resultados para el caso de rutas flexibles y para la disciplina de cola FIFO.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	171.180	169.909	158.172	167.038	168.536	169.430	166.919
Ratio respecto a SECLOOK	1,08	1,07	1,00	1,06	1,06	1,07	1,06
TMP-FIN-LOTE	17.275	17.212	15.992	16.971	17.095	17.099	16.595
Ratio respecto a SECLOOK	1,08	1,07	1,00	1,06	1,07	1,07	1,06
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	24,1	43,6	41,9	39,4	39,3	41,1	39,5
(MAQ4)	14,6	39,1	28,6	26,1	24,4	27,4	28,2
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	4,6	44,1	17,9	17,3	18,3	15,6	15,6
(MAQ5)	20,7	20,4	24,7	20,1	20,3	22,6	19,1
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	11,8	3,5	12,7	12,2	15,1	12,4	16,1

Tabla 5.26 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. FIFO

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	15	17	15	15	15
A	2	0	0	26	25	27	29	26
A	3	0	0	17	17	17	13	17
A	4	0	0	7	7	8	7	7
A	5	0	100	35	34	33	36	35
B	1	0	0	61	61	61	47	61
B	2	100	0	28	28	28	39	28
B	3	0	100	11	11	11	14	11
C	1	0	0	46	46	46	46	46
C	2	0	100	29	29	29	29	29
C	3	100	0	25	25	25	25	25
D	1	100	0	10	10	10	12	10
D	2	0	0	17	17	17	15	17
D	3	0	100	39	39	39	39	39
D	4	0	0	34	34	34	34	34
E	1	100	0	92	92	92	67	92
E	2	0	100	8	8	8	33	8

Tabla 5.27 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. FIFO

En las tablas 5.28 y 5.29, se presentan los resultados para el caso de rutas flexibles y para la disciplina de cola SPT.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	170.928	172.143	166.647	179.404	176.543	180.040	172.171
Ratio respecto a SECLOOK	1,03	1,03	1,00	1,07	1,06	1,08	1,03
TMP-FIN-LOTE	17.254	17.346	16.807	18.155	17.815	18.200	17.485
Ratio respecto a SECLOOK	1,03	1,03	1,00	1,08	1,06	1,08	1,04
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	24,1	43,3	40,3	37,4	38,6	40,0	38,7
(MAQ4)	14,7	38,5	26,7	25,7	27,3	26,0	25,5
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	4,5	44,1	15,3	14,0	14,2	12,1	14,8
(MAQ5)	22,4	18,1	20,4	20,9	22,0	23,0	20,2
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	10,2	5,0	13,6	10,1	8,9	7,3	12,4

Tabla 5.28 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. SPT

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	18	16	17	19	18
A	2	0	0	20	19	20	20	20
A	3	0	0	22	23	20	23	22
A	4	0	0	11	10	8	12	11
A	5	0	100	29	32	35	26	29
B	1	0	0	39	39	39	33	39
B	2	100	0	44	44	44	31	44
B	3	0	100	17	17	17	36	17
C	1	0	0	29	29	29	37	29
C	2	0	100	21	21	21	26	21
C	3	100	0	50	50	50	37	50
D	1	100	0	14	14	14	14	14
D	2	0	0	26	26	26	28	26
D	3	0	100	37	37	37	32	37
D	4	0	0	23	23	23	26	23
E	1	100	0	67	67	67	50	67
E	2	0	100	33	33	33	50	33

Tabla 5.29 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. SPT

En las tablas 5.30 y 5.31, se presentan los resultados para el caso de rutas flexibles y para la disciplina de cola BPD, considerando como cuello de botella la estación 3.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	172.528	177.011	162.667	172.286	173.556	173.281	172.104
Ratio respecto a SECLOOK	1,06	1,09	1,00	1,06	1,07	1,06	1,06
TMP-FIN-LOTE	17.490	17.912	16.447	17.397	17.573	17.519	17.374
Ratio respecto a SECLOOK	1,06	1,09	1,00	1,06	1,07	1,06	1,05
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	23,7	44,0	38,5	37,0	36,8	36,5	36,4
(MAQ4)	14,1	36,0	24,8	24,8	25,0	25,7	24,5
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	4,9	4,3	16,9	14,8	14,6	15,7	14,9
(MAQ5)	24,1	18,6	23,9	21,7	20,4	23,4	20,3
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	8,1	4,3	13,0	12,9	13,5	11,3	15,7

Tabla 5.30 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. BPD estación 3

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	15	17	19	18	15
A	2	0	0	25	26	25	25	25
A	3	0	0	26	22	20	20	26
A	4	0	0	6	6	7	5	6
A	5	0	100	28	29	29	32	28
B	1	0	0	53	53	53	50	53
B	2	100	0	39	39	39	36	39
B	3	0	100	8	8	8	14	8
C	1	0	0	29	29	29	33	29
C	2	0	100	25	25	25	25	25
C	3	100	0	46	46	46	42	46
D	1	100	0	21	21	21	27	21
D	2	0	0	18	18	18	12	18
D	3	0	100	37	37	37	41	37
D	4	0	0	24	24	24	20	24
E	1	100	0	67	67	67	50	67
E	2	0	100	33	33	33	50	33

Tabla 5.31 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. BPD estación 3

En las tablas 5.32 y 5.33, se presentan los resultados para rutas flexibles y para la disciplina de cola BPD, considerando como cuello de botella la estación 1.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	172.107	175.722	162.283	173.989	173.433	174.534	171.719
Ratio respecto a SECLOOK	1,06	1,08	1,00	1,07	1,07	1,08	1,06
TMP-FIN-LOTE	17.343	17.831	16.391	17.640	17.752	17.637	17.351
Ratio respecto a SECLOOK	1,06	1,09	1,00	1,08	1,08	1,08	1,06
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	23,9	42,1	40,3	38,2	38,6	36,4	38,1
(MAQ4)	15,8	37,7	26,7	24,6	26,0	26,1	24,9
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	3,4	42,6	17,2	16,8	15,6	17,6	16,1
(MAQ5)	22,9	20,8	25,8	20,5	18,4	23,2	21,2
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	9,5	2,2	9,3	11,9	13,4	9,8	11,9

Tabla 5.32 Tiempos. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. BPD estación 1

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS		SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
Tipo de pieza	secuencia	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
A	1	100	0	26	23	23	22	26
A	2	0	0	23	23	22	23	23
A	3	0	0	18	17	15	18	18
A	4	0	0	4	5	6	3	4
A	5	0	100	29	32	34	34	29
B	1	0	0	44	44	44	42	44
B	2	100	0	39	39	39	42	39
B	3	0	100	17	17	17	16	17
C	1	0	0	63	63	63	54	63
C	2	0	100	29	29	29	42	29
C	3	100	0	8	8	8	4	8
D	1	100	0	13	13	13	11	13
D	2	0	0	20	20	20	17	20
D	3	0	100	39	39	39	48	39
D	4	0	0	28	28	28	24	28
E	1	100	0	67	67	67	67	67
E	2	0	100	33	33	33	33	33

Tabla 5.33 Mix de rutas. 2º Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles 3ª variante. BPD estación 1

5.3.1.2.3.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Como se observa en cualquier situación, la metodología presenta una mejora por encima del 3 % comparada con cualquier otra política de selección de rutas. Prácticamente se mantienen vigentes las mismas consideraciones y resultados que se han expuesto para las variantes anteriores de rutas flexibles, que presentaban mejores resultados para la disciplina de cola que a priori parecía la menos prometedora.

Comparando esta variante con las dos anteriores, los resultados no son concluyentes pero parecen mostrar que no existe un criterio que sea el más adecuado en todos los casos, sino que va a ser específico de cada problema. En particular, se sospecha que en este escenario está siendo determinante el carácter de cuello de botella del sistema de transporte, lo cual motiva el siguiente grupo de experimentos.

5.3.1.3 EXPERIMENTOS CON NÚMERO DE TRANSPORTES VARIABLE.

De los anteriores experimentos se ha deducido que el transporte de las piezas puede llegar a tener mayor relevancia que el equilibrado de las máquinas en este taller. Y en cualquier caso puede suponer una restricción a la hora de mejorar la eficiencia del taller. Sobre esta cuestión se van a basar los siguientes experimentos.

Se va a variar el número de vehículos existentes y se va a realizar la experimentación para rutas rígidas y para rutas flexibles (con sus variantes). Se van a estudiar los resultados que se obtienen sólo para la política de selección de rutas que proporciona la metodología (SECLOOK) y para la disciplina de cola FIFO.

5.3.1.3.1 RESULTADOS.

En la tabla 5.34 se presentan los resultados variando el número de transportes, los datos corresponden al sumatorio de los tiempos de. La primera columna es el número de transportes disponibles. La segunda columna es el resultado del mencionado sumatorio para el caso de rutas rígidas. La tercera columna es el resultado para el caso de rutas flexibles y selección de operaciones dentro del grupo intentando equilibrar la carga de las máquinas (en función del % de utilización de las máquinas hasta ese momento). La cuarta es el resultado para rutas flexibles y selección de operaciones seleccionando la máquina a una menor distancia. La última columna corresponde al caso en el que se selecciona la operación que se vaya a realizar en la máquina menos cargada en este instante.

Nº DE VEHÍCULOS	RUTAS RÍGIDAS	RUTAS FLEXIBLES EQUILI. CARGA	RUTAS FLEXIBLES DIST. MÍNIMA	RUTAS FLEXIBLES CARGA ACTUAL
3	215.650	231.871	247.515	244.691
5	152.238	163.672	160.807	158.172
7	109.254	115.390	115.142	110.347
9	93.359	98.486	96.565	95.596
11	83.069	89.456	84.285	88.048
13	82.408	85.993	82.221	81.907
15	82.776	82.688	82.163	80.768

Tabla 5.34 Tiempos de residencia. 2º Escenario. Sin roturas. Variando nº de transportes. FIFO

La tabla 5.35 es similar a la 5.34 en cuanto a la estructura y a los datos contenidos, pero ahora dichos datos corresponden al tiempo de finalización de la última pieza del lote.

Nº DE VEHÍCULOS	RUTAS RÍGIDAS	RUTAS FLEXIBLES EQUILI. CARGA	RUTAS FLEXIBLES DIST. MÍNIMA	RUTAS FLEXIBLES CARGA ACTUAL
3	21.839	23.513	25.038	24.754
5	15.378	16.561	16.232	15.992
7	11.034	11.678	11.624	11.131
9	9.401	9.981	9.765	9.670
11	8.446	9.059	8.506	8.907
13	8.372	8.707	8.307	8.280
15	8.412	8.388	8.266	8.199

Tabla 5.35 Tiempos fin lote. 2º Escenario. Sin roturas. Variando nº de transportes. FIFO

En la tabla 5.36 se pueden observar los resultados de los ratios de utilización de las máquinas a medida que se han incrementado el número de transportes, para rutas rígidas y para los tres casos de rutas flexibles.

Nº DE VEHÍCULOS	RUTAS RÍGIDAS (en %)					RUTAS FLEX. EQUILI. CARGA (en %)					RUTAS FLEX. DIST. MÍNIMA (en %)					RUTAS FLEX. CARGA ACTUAL (en %)				
	maq1	maq2	maq3	maq4	maq5	maq1	maq2	maq3	maq4	maq5	maq1	maq2	maq3	maq4	maq5	maq1	maq2	maq3	maq4	maq5
3	33,7	8,7	7,4	21,4	17,7	36,9	8,9	3,6	16,2	19,0	34,9	12,4	7,5	15,0	11,4	31,2	12,7	11,7	13,5	9,2
5	46,2	16,8	10,4	28,4	28,2	45,9	14,1	11,9	26,6	23,0	45,6	13,2	10,1	27,5	26,5	41,9	17,9	12,7	26,6	14,7
7	25,8	18,8	45,8	50,8	38,3	32,6	13,4	43,4	45,6	33,4	32,8	13,8	40,4	41,4	33,7	31,2	16,3	48,8	44,1	36,5
9	30,0	16,1	54,8	57,1	47,1	37,7	15,8	50,2	57,6	40,6	38,6	14,8	48,6	52,9	41,5	33,9	21,0	51,5	55,0	48,5
11	37,3	17,3	63,2	60,0	53,7	35,7	13,9	54,6	63,1	47,2	41,8	18,2	52,2	59,8	49,6	30,2	21,8	52,7	63,0	51,4
13	35,5	18,2	62,6	61,8	60,4	37,6	14,4	57,3	63,3	49,1	42,3	15,2	53,2	64,7	48,0	36,3	23,5	58,3	64,1	53,1
15	32,3	19,3	59,4	64,7	57,6	39,8	13,5	60,6	66,7	48,1	39,8	15,2	55,1	62,6	56,0	36,4	18,5	60,8	66,3	55,2

Tabla 5.36 Ratio utilización máquinas. 2º Escenario. Sin roturas. Variando nº de transportes. FIFO

5.3.1.3.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Como puede observarse de los resultados de las tablas 5.34 y 5.35, tanto para el caso del sumatorio de los tiempos de residencia como para el caso de los tiempos de finalización de la producción del lote, la tendencia es muy similar. Así puede observarse que a medida que se incrementa el número de transportes se va mejorando la eficiencia del sistema de forma muy apreciable, pero al llegar a un número de transportes elevado, estas mejoras se hacen inapreciables y en algunos casos, como es el caso de rutas rígidas se puede producir un empeoramiento de los resultados para el paso de 13 a 15 vehículos.

Otro hecho digno de destacar, es que a medida que se incrementan el número de transportes, disminuye la desventaja que presentaban las rutas flexibles y así para el caso de 15 vehículos las rutas flexibles en todas sus variantes de selección de operaciones, presentan mejores resultados que para rutas rígidas. Este es un resultado consistente con el que se obtenía para el caso del escenario tratado en el capítulo anterior, donde no había limitación en el número de transportes y donde las rutas flexibles mejoraban los resultados respecto a las rutas rígidas en todos los casos.

También hay que señalar que para el caso de rutas flexibles, la variante que seleccionaba las operaciones teniendo en cuenta la mínima distancia de la próxima máquina donde había que realizar la siguiente operación, presenta en todos los casos para los que hay un número de transportes superior a 5 mejores resultados que los de la primera variante. Para el caso de que se seleccione la operación teniendo en cuenta la carga actual de las máquinas, se presentaban mejores resultados que cuando se tenía en cuenta el porcentaje de utilización hasta ese instante, también presenta unas mejoras pero muy leves respecto al criterio basado en las distancias, salvo para el caso de 11 transportes. Esto supone que para este escenario, y teniendo en cuenta los tiempos de traslado entre las distintas estaciones y los tiempos de procesado de las distintas operaciones que conforman las rutas, parece más interesante elegir la siguiente operación de forma que se disminuyan los tiempos de traslado o bien se equilibre la carga actual de las máquinas.

Si se observan los resultados de la tabla 5.36, se comprueba que al incrementar el número de transportes se presentan unas mejoras muy sustanciales de las máquinas que están más alejadas de la estación de carga y descarga de pallets (L/U), y en la máquina 3, que era la que presentaba unos ratios de utilización más bajos.

5.3.1.4 RESUMEN PARA EL PRIMER GRUPO DE EXPERIMENTOS.

Aparte de confirmarse que la metodología propuesta da lugar a un flujo de producción más fluido y que ello no lo consigue equilibrando la carga de las máquinas, sino eligiendo en cada momento las rutas que más partido sacan a los recursos disponibles, se tiene:

- Para el caso de un bajo número de transportes las rutas rígidas presentan mejores resultados que las rutas flexibles, pero a medida que se incrementan el número de transportes y esta restricción se relaja, las rutas flexibles mejoran los resultados de las rígidas. Esto indica que al eliminarse esta restricción en el número de vehículos disponibles las rutas flexibles pueden desarrollar de forma más adecuada su potencialidad.

- De las opciones probadas para rutas flexibles, la que hace hincapié en los tiempos de traslado a la hora de seleccionar la siguiente operación y la que elige la operación que se va a realizar según la máquina menos cargada en ese instante, presentan mejores resultados que la que intenta mejorar el equilibrado de cargas de las máquinas basándose en el porcentaje de utilización previo de las mismas. Esto puede ser consecuencia del diseño del sistema y de las relativamente grandes distancias entre las distintas máquinas frente a la media del tiempo de procesado de las distintas operaciones que integran las diferentes rutas.

5.3.2 SEGUNDO GRUPO DE EXPERIMENTOS. CON ROTURAS DE MÁQUINAS.

Se va a considerar a partir de este momento la posibilidad de que se produzcan roturas de máquinas y la posterior reparación y puesta en marcha de las mismas. El proceso de simulación se va a desarrollar de la misma forma que cuando no había roturas, pero ahora, se habrá de considerar el tiempo de rotura y el de reparación.

Es de esperar que el tiempo que tarde el sistema en producir el lote de piezas sea en este caso mayor. Lo que vamos a evaluar es el comportamiento de la metodología teniendo en cuenta las roturas o no teniéndolas en cuenta. Lo lógico es que si las roturas existen, tenerlas en cuenta va a ser más acertado que no considerarlas. Lo que buscamos es cuantificar la mejora y ver si compensa el aumento de la complejidad de la metodología.

5.3.2.1 EFECTO DE LAS ROTURAS DE LAS MÁQUINAS SOBRE LA METODOLOGÍA.

El proceso de simulación se va a desarrollar de la misma forma que se hacía para el caso en que no existían averías de máquinas, pero ahora se considerará la situación de averiado y el tiempo de reparación de la máquina como datos adicionales asociados al estado del sistema. Aunque cuando se produce una avería no se suele conocer con certeza cuando volverá a estar disponible el equipo, se

supone que se dispone de una estimación u objetivo de dicho tiempo de reparación, que es el que utiliza la metodología. Cuando el tiempo alcanza el instante de puesta en marcha de una máquina averiada, el sistema contará con una máquina más lo que se tendrá en cuenta a efectos de la simulación de su evolución.

La idea con que se aborda esta modificación de la metodología es que, suponiendo que se conoce la existencia de una máquina averiada y una estimación de cuando va a estar disponible, no incorporar dicha información para evaluar la evolución del sistema, si bien no invalida completamente los resultados de las mismas, si va a empeorar dichos resultados, y no utiliza correctamente toda la información de la que se dispone y que puede ayudar a mejorar la eficiencia del sistema. Así pues, las simulaciones parten de un instante inicial con alguna o algunas máquinas averiadas y, mientras, para la anterior versión, dichas máquinas se mantienen averiadas durante el horizonte de tiempo en que se produce la selección de la ruta de la pieza que entra al sistema, para la versión mejorada se parte del mismo instante con la misma situación de avería en las mismas máquinas, pero, si a lo largo del horizonte del tiempo de simulación, está previsto que se produzca la puesta en servicio de alguna o algunas máquinas averiadas, se incorpora esta información al proceso de simulación.

5.3.2.2 EXPERIMENTOS PARA EL CASO DE QUE SE PRODUZCAN ROTURAS.

El objetivo de estos experimentos es evaluar el comportamiento del sistema si se emplea la versión de la metodología que tiene presente la puesta en servicio de una máquina averiada cuando se selecciona la ruta de fabricación, o la otra versión en la que no se tiene en cuenta este hecho.

En este caso siguen vigentes todos los datos iniciales que se habían fijado para el caso del primer grupo de experimentos del apartado 5.3.1, en lo que se refiere a rutas de fabricación, tamaño del lote, secuencia de entrada de los tipos de piezas, etc. Se van a realizar los experimentos únicamente para la política de selección de secuencias propuesta por la metodología y para el caso de la disciplina de cola FIFO.

Además de los datos que se han comentado anteriormente, se necesitan los datos relacionados con las caídas y puesta en marcha de las diferentes máquinas que integran el sistema. Se supone averías que se distribuyen exponencialmente, que se pueden generar como:

$$t = -\frac{1}{\lambda} * \ln U$$

donde el primer miembro del producto representa el tiempo medio entre averías de cada una de las máquinas y U es un número aleatorio entre 0 y 1.

y el arreglo de las mismas según una distribución uniforme

$$t = \text{Min} + (\text{Max} - \text{Min}) * U$$

donde Min es el tiempo mínimo en que se puede subsanar una avería, Max es el tiempo máximo y U es un número aleatorio entre 0 y 1.

Las distintas situaciones que se van a estudiar son las que aparece en la tabla 5.37, donde se presentan tres situaciones diferentes en cuanto al número de averías: la situación A corresponde al caso en que se espera que se produzcan un número de averías bajo, la situación B corresponde a un número de averías medio y la situación C, que corresponde al caso en el que se espera que se produzcan un número de averías alto. Para cada caso se han realizado las simulaciones para cinco juegos de datos diferentes para cada una de las situaciones A,B y C, calculándose los valores medios.

CASOS	DESCRIPCIÓN	Parámetros	EST 1 (Maq 1 Maq 4)	EST 2 (Maq 2 Maq 5)	EST 3 (Maq 3)
A	Se corresponde con la situación en donde las probabilidades de roturas son pequeñas.	$1/\lambda$ Max Min	8.000 900 300	8.500 950 300	9.500 1.100 300
B	Se corresponde con la situación en donde las probabilidades de roturas son intermedias.	$\frac{1}{\lambda}$ Max Min	5.000 900 300	5.400 950 300	5.800 1.100 300
C	Se corresponde con la situación en donde las probabilidades de roturas son elevadas.	$\frac{1}{\lambda}$ Max Min	2.000 900 300	2.600 950 300	3.200 1.100 300

Tabla 5.37 Datos roturas máquinas. 2º Escenario

5.3.2.2.1 RESULTADOS

En las tablas que siguen aparecen los resultados para la disciplina de cola FIFO, tanto para rutas rígidas (Tabla 5.38), como para flexibles (Tabla 5.39). Para el caso de rutas flexibles la selección de operaciones dentro del grupo al que pertenecen, se realiza utilizando el criterio de escoger aquella operación que se realice en la máquina que hasta este instante tenía un porcentaje de utilización mas bajo.

La estructura y contenido de las tablas es como sigue: la primera columna presenta las variables que se observan. En la segunda columna se presentan los resultados pertenecientes a la versión básica de la metodología o a la mejorada. En la tercera los resultados para el caso de un número de averías bajo, en la cuarta los resultados para un número medio de averías y en la quinta para un número elevado de averías. Los valores que aparecen en las tablas se obtienen como se había mencionado en el epígrafe anterior, como media de los 5 juegos de datos obtenidos para las cada una de las tres situaciones.

Por filas, la primera contiene el encabezamiento de la tabla, la segunda fila presenta los resultados para la variable sumatorio de los tiempos de residencia, según la metodología básica y la mejorada y el porcentaje en que la mejorada supera a la básica para la variable anterior, la tercera fila contiene los resultados para el tiempo de finalización del lote, el resto de filas presenta los porcentajes de utilización de cada máquina según las metodologías básica y mejorad.

		Nº DE AVERÍAS BAJO	Nº DE AVERÍAS MEDIO	Nº DE AVERÍAS ALTO
TIEMPO DE RESIDENCIA (TMP-RES)	METOD. BASIC.	167.228	167.836	190.404
	METOD. MEJOR.	159.546	164.313	174.315
	BASIC. / MEJOR.	1,05	1,02	1,09
TIEMPO DE FIN LOTE (TMP-FIN)	METOD BASIC.	16.726	16.964	19.352
	METOD MEJOR.	16.092	16.680	17.352
	BASIC. / MEJOR.	1,04	1,02	1,10
ESTACIÓN 1 (MAQ 1)	METOD BASIC.	38 %	39 %	31-%
	METOD MEJOR.	41 %	38 %	36 %
(MAQ 4)	METOD BASIC.	25 %	25 %	18 %
	METOD MEJOR.	27 %	26 %	23 %
ESTACIÓN 2 (MAQ 2)	METOD BASIC.	12 %	15 %	12 %
	METOD MEJOR.	14 %	16 %	14 %
(MAQ 5)	METOD BASIC.	25 %	25 %	21 %
	METOD MEJOR.	26 %	25 %	23 %
ESTACIÓN 3 (MAQ 3)	METOD BASIC.	10 %	9 %	9 %
	METOD MEJOR.	12 %	11 %	12 %

Tabla 5.38 Tiempos. 2º Escenario. Con roturas. Metodología Mejorada. Rutas rígidas. FIFO

		Nº DE AVERÍAS BAJO	Nº DE AVERÍAS MEDIO	Nº DE AVERÍAS ALTO
TIEMPO DE RESIDENCIA (TMP-RES)	METOD BASIC.	175.539	184.745	200.320
	METOD MEJOR.	174.219	175.689	189.735
	BASIC. / MEJOR.	1.01	1.05	1.06
TIEMPO DE FIN LOTE (TMP-FIN)	METOD BASIC.	17.723	18.647	201.249
	METOD MEJOR.	17.603	17.729	192.215
	BASIC. / MEJOR.	1.01	1.05	1.05
ESTACIÓN 1 (MAQ 1)	METOD BASIC.	39 %	35 %	30 %
	METOD MEJOR.	39 %	38 %	34 %
(MAQ 4)	METOD BASIC.	25 %	22 %	18 %
	METOD MEJOR.	28 %	25 %	21 %
ESTACIÓN 2 (MAQ 2)	METOD BASIC.	13 %	12 %	10 %
	METOD MEJOR.	14 %	14 %	15 %
(MAQ 5)	METOD BASIC.	22 %	21 %	19 %
	METOD MEJOR.	22 %	23 %	20 %
ESTACIÓN 3 (MAQ 3)	METOD BASIC.	10 %	9 %	10 %
	METOD MEJOR.	10 %	9 %	12 %

Tabla 5.39 Tiempos. 2º Escenario. Con roturas. Metodología Mejorada. Rutas flexibles. FIFO

5.3.2.2.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Como puede verse tanto para rutas rígidas como para rutas flexibles, la versión mejorada de la metodología propuesta, que tiene presente la reparación y puesta en servicio de una máquina a la hora de seleccionar la ruta a asignar, mejora los resultados, tanto para rutas rígidas como para rutas flexibles.

Se observa que el porcentaje de utilización de las máquinas, en todos los casos aumenta para la versión mejorada respecto a la básica (se considera el tiempo efectivo de funcionamiento de la máquina).

Puede verse, que con una pequeña mejora en el diseño de la metodología, puede contemplarse la posibilidad de que se produzcan roturas y que si el número de averías en el período de producción del lote es elevado, la mejora es más apreciable. Además esta mejora se puede obtener sin hacer un gran esfuerzo en la programación ni consumir apenas tiempo adicional en la ejecución.

5.4 RESUMEN DEL SEGUNDO ESCENARIO.

En este segundo escenario se ha realizado la simulación sobre un sistema de fabricación flexible integrado por tres estaciones, dos de ellas con dos máquinas y la tercera con una única máquina. El número de transportes disponibles para trasladar las piezas entre las distintas estaciones es limitado. Existe una zona de recarga de energía para los transportes donde se invierte un cierto período de tiempo en la recarga de energía de los mismos. Existe un almacén centralizado de piezas en las que existe una cola lógica para cada una de las máquinas de las distintas estaciones.

Respecto a las rutas de fabricación de las diferentes piezas, existe la posibilidad de producirlas mediante rutas rígidas y flexibles, ambas están integradas por las mismas operaciones individuales y se diferencian en que las flexibles agrupan las operaciones individuales de tal forma que dentro de estos grupos no existe prelación entre las operaciones que lo integran. Tanto las rutas rígidas como las flexibles, son idénticas a las definidas para el segundo grupo de experimentos del escenario anterior.

Los experimentos para este escenario se han estructurado en dos grandes grupos: en el primero se han realizado para el caso de que no se produzcan roturas en las máquinas y el segundo grupo para el caso de que si se produzcan roturas. A su vez para el caso de que no se produzcan roturas se han contemplado los resultados para diferentes disciplinas de cola, para rutas rígidas y flexibles (con tres formas diferentes de seleccionar las operaciones) y para el caso de que se vayan variando el número de transportes disponibles en el sistema. Para el caso de roturas se ha observado la conveniencia de su incorporación en las simulaciones.

Para el caso de que no se produzcan roturas, se observa:

1.- En todos los casos la solución que aporta la metodología que se propone mejora los resultados que aportan cualquiera de las otras políticas alternativas que se estudian, bajo cualesquiera condiciones experimentales.

2.- La carga de las máquinas no es el principal factor que determina la eficiencia del taller.

3.- Igualmente, no sólo es el mix de rutas el que determina el comportamiento del sistema en los distintos experimentos, sino que, los resultados son muy diferentes al cambiar sólo el orden (en el tiempo) en que se seleccionan unas u otras rutas. De hecho, es muy posible que sea el **timing** lo más importante y el mix agregado resultante no esa más que una media a posteriori.

4.- El dotar a un sistema de un cierto grado de flexibilidad, no asegura que automáticamente se mejore la eficiencia del mismo, sino que es preciso sacar partido de forma apropiada a la misma.

5.- Aunque aparentemente las rutas de fabricación son iguales a las del primer escenario, lo cierto es que no es de extrañar que el mix de rutas que elige la metodología difiera apreciablemente. Ello se debe a que lo que si ha cambiado es la configuración del taller y, con ella, tanto las distancias como la dinámica de los desplazamientos.

Para el caso de que se produzcan roturas, la conclusión más sobresaliente, es que no es difícil incorporar dicha información a la metodología y, a cambio, se escogen más acertadamente las rutas de fabricación, especialmente cuando las máquinas son propensas a las averías.

6.- TERCER ESCENARIO.

Este apartado se va a desarrollar con una estructura similar a la que se han desarrollado los casos de los dos escenarios anteriores. Y será el sistema de transporte de las piezas la principal diferencia respecto a los otros talleres simulados. En este caso el sistema de transporte de las piezas, que a la vez va a servir de sistema de almacenamiento intermedio, va a estar constituido por una cinta transportadora de tipo bucle cerrado.

Al igual que para los dos primeros escenarios, la estructura para este escenario será similar. En un primer apartado se van a describir las características que definen el comportamiento del sistema a estudiar. En un segundo apartado se va esbozar brevemente el conjunto de matrices, vectores, variables y ficheros que conforman la base de datos que caracterizan al sistema en estudio y la evolución del mismo. En un tercer apartado se presentan los distintos experimentos que se han realizado para el taller a simular. Se prestará especial atención a la implementación en paralelo del modelo de simulación y sus resultados experimentales.

6.1 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN.

Se considera el Sistema de Fabricación Flexible, cuya distribución en planta puede verse en la figura 6.1. Las máquinas que forman una estación son operativamente equivalentes, es decir, pueden realizar exactamente el mismo conjunto de operaciones.

El sistema puede funcionar de dos formas diferentes. En la primera, cada estación puede tener asociada una cola que corresponde al conjunto de piezas en espera de ser procesadas. Estas colas estarán organizadas de forma lógica, ya que físicamente todas las piezas están en la cinta transportadora. Obviamente, es posible que la cola no esté vacía y alguna de las máquinas de la estación esté ociosa, pero dicha situación indeseable durará únicamente hasta el momento en que llegue la pieza a la máquina. Cuando una pieza que está siendo mecanizada completa la operación a la que estaba siendo sometida, se colocará físicamente en la cinta transportadora y lógicamente en la cola correspondiente a la siguiente estación que le corresponda según su ruta.

En la segunda posibilidad, las piezas no guardan ningún orden entre sí, sino que están en la cinta transportadora y cuando una máquina queda libre es ocupada por la primera pieza de entre las que lo requieran que pase por delante. De esta forma se minimizan los tiempos improductivos de las máquinas.



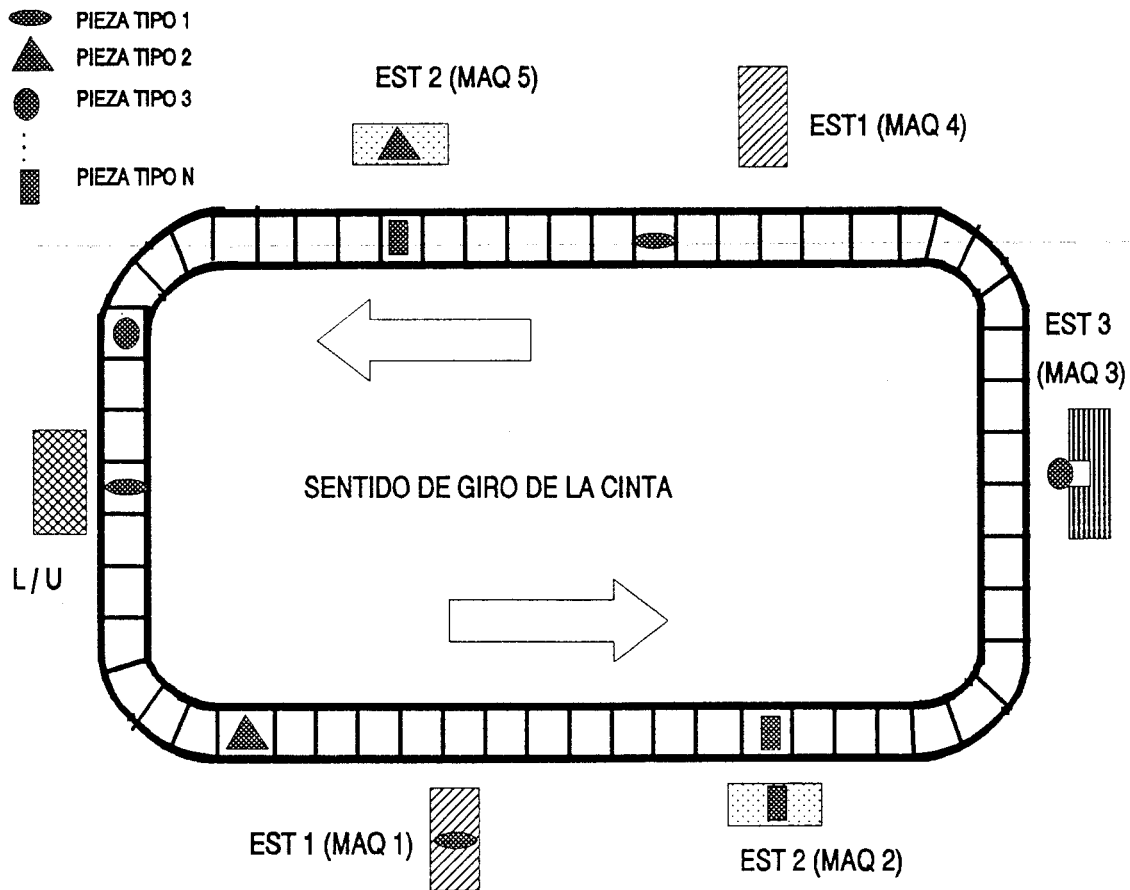


Figura 6.1 Esquema de los elementos del tercer escenario

Se han considerado las siguientes hipótesis de funcionamiento del sistema:

- Para cada ruta que pueda seguir una pieza se suponen fijadas todas las operaciones que componen esa ruta, las estaciones en que se realizan y la duración de las mismas.
- Se supone que el número de posiciones que tiene la cinta transportadora es fijo y conocido.
- Las máquinas son susceptibles de rotura. Las averías de cada máquina siguen una distribución exponencial y el arreglo de las mismas una distribución uniforme.
- Los datos del problema son deterministas, como ocurría en los dos escenarios anteriores, salvo los datos relacionados con las averías y puesta en servicio de las máquinas en el caso en el que se contemplan dichas averías.

- Se supone que el cambio de herramientas en cada máquina se realiza en un tiempo tan pequeño (relativo a los tiempos de procesado) que podemos considerarlo despreciable.
- La estación 1 consta de 2 máquinas, la estación 2 consta de 2 máquinas y la estación 3 de una sola máquina, como puede verse en la figura 6.1
- El nº de posiciones en la cinta es de 50.
- Las distancias de las distintas maquinas a la posición de referencia L / U es (medida en nº de posiciones):

<u>MÁQUINA</u>	<u>DISTANCIA DESDE LA L / U</u>	<u>DISTANCIA HASTA LA L / U</u>
MAQ 1	16	34
MAQ 2	27	23
MAQ 3	34	16
MAQ 4	40	10
MAQ 5	46	4

- El tiempo que tarda una pieza en pasar desde una máquina a su posición en la cinta transportadora o viceversa se considera igualmente despreciable.
- Transitoriamente puede producirse bloqueo, en este caso habrá que esperar hasta que frente a la máquina que ha acabado el proceso de una pieza exista una posición libre.
- Se considera que la cinta avanza de forma discreta, de forma que cada unidad de tiempo la cinta avanza una posición.

6.2.- IMPLEMENTACIÓN.

La estructura de este apartado es similar a la del segundo escenario, es decir, se mencionarán las necesidades de información así como la lógica de la evolución del sistema.

6.2.1 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

Al igual que para el caso del segundo escenario, se pueden distinguir diferentes conjuntos de ficheros y matrices. Un primer conjunto de ficheros describen las rutas de fabricación de las piezas dentro del sistema: operaciones que componen cada ruta, estación donde se realiza y tiempo de cada una de ellas en la correspondiente estación. En un segundo grupo tendremos las diversas matrices, vectores y variables que definen el estado del sistema, que debe de contemplar:

identificación y localización de cada pieza que actualmente esté en el sistema, ruta asignada a cada pieza, operación que se está realizando a cada pieza, estado actual y próximos eventos que afectan a las máquinas y transportes; dentro de este grupo estarán encuadrados los ficheros de averías que nos indicaran en cada momento si las máquinas están averiadas o no. Y por último otro grupo que estará constituido por el conjunto de matrices, variables y ficheros que contienen un registro histórico de los valores de algunas de las matrices y vectores mencionados, así como los resultados. En cada grupo se mencionan los datos más relevantes, una descripción exhaustiva se encuentra en Lorente (1993).

Dentro del primer grupo tenemos el conjunto de ficheros y matrices que se indican a continuación y que son en sus nombres y estructuras a los que se habían definido para los dos escenarios anteriores, concretamente:

- El fichero de secuencias rígidas.
- El fichero de secuencias flexibles.
- El fichero de grupos de operaciones.
- El fichero de operaciones.

Los vectores y matrices que siguen, son el soporte básico de información que caracterizan al sistema y que nos van a indicar en cada instante la situación en que se encuentra el mismo:

- Vector de piezas en posición inicial
- Vector de secuencias en posición inicial
- Vector de puntero de operaciones rutas rígidas
- Vector de puntero de grupo de operaciones de rutas flexibles
- Vector de próximo evento
- Vector de tipo de máquina
- Vector de piezas en máquinas
- Vector de pieza en posición inicial
- Vector de entrada en el sistema
- Vector de salida del sistema
- Colas de espera de las diferentes máquinas
- Vector de posición de máquinas
- Vectores de averías de máquina (que básicamente contiene tiempo, máquina, estado de la máquina)
- Vector de bloqueo de máquinas (retardo)

El tercer grupo está constituido por el conjunto de matrices, variables y ficheros resultados de la simulación, su estructura es similar a la del mismo grupo definido para los dos escenarios anteriores y dentro del mismo se encuentran:

- El fichero de sesión que registra el tiempo en que salió cada pieza del sistema, el tiempo de residencia, porcentaje de utilización de las máquinas.
- El fichero de secuencia elegida que contiene que secuencia se ha elegido cada vez que se ha realizado el proceso de selección de ruta, ...

6.2.2 EVOLUCIÓN DEL ESTADO DEL SISTEMA

En el estudio de la evolución de este escenario se pueden distinguir, como ocurría para el segundo escenario, dos posibilidades, según se contemple o no la existencia de averías en las máquinas. Para el caso de que no se consideren averías, en el sistema existen dos tipos de eventos significativos en los que se produce algún cambio en el sistema:

- Cuando una máquina acaba el procesado de una pieza.
- Cuando una pieza en transporte llega a su destino.

La lógica de la simulación se basa en la búsqueda en el vector correspondiente (vector de próximo evento) del instante de tiempo más próximo en el cual ocurre un evento. Pueden presentarse tres situaciones: a) que una máquina acabe su procesado, b) que llegue una pieza en transporte a su destino. En el caso de que en un mismo instante una pieza deba de abandonar una máquina y otra pieza llegue a esa misma máquina, el único cambio en el estado del sistema es el asociado a la pieza que abandona la máquina.

Pasemos a analizar estas tres situaciones.

a) Si dicho instante de tiempo pertenece a alguna de las cinco últimas posiciones del vector de próximo evento, esto significa que una máquina acaba su procesado, en ese momento, con la información de la pieza que acaba su procesado, tendrá que ver si la posición de la cinta que en este instante está frente a la máquina está disponible para recibir la pieza que ha terminado su procesado y si puede ser transportada. Si está libre se colocará en esta posición y continuará su proceso; si no está libre se producirá una situación de bloqueo temporal y se esperará a una posición de la cinta transportadora que esté libre. En ese instante se actualizan los tiempos de los vectores y matrices que estén afectados por este cambio del estado del sistema (puntero de operaciones, tiempo de llegada a la próxima estación, ...).

b) Si pertenece al resto de posiciones del vector de próximo evento significa que alguna de las piezas llega a una máquina para que se le realice algún proceso o bien ha acabado su procesado y ha llegado a la posición de carga y descarga para abandonar el sistema. Si ha llegado a la zona de carga y descarga, se deja la pieza, se coge la que entra y se actualizan las matrices correspondientes. Si lo que ocurre es que una pieza llega a una máquina para ser procesada pueden presentarse dos posibilidades tal como se ha definido el funcionamiento del sistema. Puede ocurrir que el sistema funcione de forma que todas las piezas que están en la cinta compitan por acceder a los recursos sin ningún tipo de prelación, en este caso, si la máquina está libre, pasará a actualizar las matrices que correspondan. Puede ocurrir que llegue a la máquina a la que va dirigida y ésta esté ocupada, en este caso tendrá que ver si hay otra máquina libre que pertenezca a la misma estación y dirigirse a ella, este proceso se repetirá hasta que encuentre una máquina libre. Si el sistema funciona con una disciplina de cola determinada, como cada máquina tiene una cola, la pieza dará una vuelta completa y volverá a intentar acceder a la

misma estación hasta que la encuentre libre.

c) En el caso de que exista algún tiempo común en el vector de próximo evento realizaran ambos procesos sin avanzar a ningún nuevo instante del sistema., hasta que ambos procesos se hayan completado.

Para el caso de que se contemple la posibilidad de que se produzcan averías, sobre el caso anterior se introduce una nueva situación que viene representada por los vectores de averías. Estos vectores entraría al mismo nivel que el vector de próximo evento y entonces, básicamente se puede considerar que en el sistema existen cuatro tipos de eventos significativos en los que se produce algún cambio en el sistema. Los dos mencionados anteriormente más la avería y la puesta en marcha de nuevo de una máquina averiada.

6.3 EXPERIMENTACIÓN.

En este apartado se va a seguir un esquema similar al que se siguió para el caso del escenario anterior. La experimentación se ha dividido en dos grandes grupos. El primero correspondiente a los resultados que se obtienen para los experimentos realizados en monoprogramación y cuyo objetivo será validar la metodología propuesta ante una nueva situación experimental, y que comprende a su vez dos subgrupos: Un primer subgrupo para la hipótesis de que las máquinas no sufran averías y un segundo subgrupo donde se contempla la posibilidad de que las máquinas que integran este escenario, si pueden ser susceptibles de roturas. El segundo grupo de experimentos corresponde a la implementación en paralelo de las simulaciones que se realizan previo a la selección de la ruta de fabricación; se desea medir el correspondiente speedup, esto es, la ganancia de tiempo que se produce si se realiza la selección de rutas mediante un proceso en paralelo en vez de secuencial.

Tanto los tipos de piezas como sus rutas alternativas son las mismas que en el escenario anterior. Igualmente se va a suponer el mismo lote de piezas y el mismo orden de introducción de las mismas en el taller. El número de pallets disponibles es asimismo de 10. Igualmente, se supone que el taller no está vacío sino que existen ya 10 piezas en el mismo. Todo esto se hace para mantener bajo control estas variables con el ánimo de evaluar más nítidamente el efecto de la configuración del taller sobre el comportamiento de la metodología.

Estamos interesados en el estudio de la misma serie de variables que se observaron en el escenario previamente estudiado y que se consideran relevantes para evaluar la eficiencia del sistema es decir:

- La suma total de los tiempos de residencia de todas las piezas del lote.
- El tiempo de finalización de la última pieza fabricada del lote.
- Los niveles de utilización de las máquinas, definidos como en los dos escenarios anteriores.

Además se registra la frecuencia relativa de selección de las diferentes rutas.

Vamos a observar cómo se comportan estas variables ante distintas condiciones de operación del sistema. El modelo se ha realizado con la posibilidad de que contemple diferentes disciplinas de colas para cada máquina, pero dado que las disciplinas BPD, SPT, etc. ya han sido analizadas profundamente en los escenarios anteriores, aquí se va a realizar los experimentos para el caso de que no exista ningún orden lógico entre las piezas que hay en la cinta, de tal forma que la primera pieza que necesite una máquina que está ociosa y pase por delante de ella, obtendrá el recurso.

6.3.1 PRIMER GRUPO DE EXPERIMENTOS.

Los experimentos se van subdividir en dos grupos: suponiendo que no se producen averías y para el caso de que sí se produzcan tales averías.

Vamos a comparar los resultados que se obtienen seleccionando las rutas por las que se pueden fabricar dichas piezas por las diferente políticas que se han definido en las tablas 4.14 y 4.15.

Para el caso de rutas flexibles, a la hora de seleccionar la operación a realizar dentro de un mismo grupo de operaciones, se ha seguido la regla de seleccionar aquella operación que se realice en la máquina que hasta el instante en que se debe de decidir la operación a realizar tenía un ratio de utilización más bajo, con la intención de equilibrar individualmente las máquinas que integran el sistema. Se ha optado por esta variante de selección de operaciones para rutas flexibles, para poder comparar los resultados con los que se obtuvieron para los dos anteriores escenarios, ya que ambos escenarios se ha experimentado con esta opción de selección de rutas.

6.3.1.1 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA SIN ROTURAS DE MÁQUINAS.

El este apartado se muestran y analizan los resultados cuando no se producen averías, tanto para rutas rígidas como para flexibles.

6.3.1.1.1 RESULTADOS

En las tablas 6.1 y 6.2 se observan los resultados para rutas rígidas. Para rutas flexibles se presentan en las tablas 6.3 y 6.4.

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	93.048	108.657	70.754	78.922	81.113	81.687	79.612
SEC-ENTR/SECLOOK	1,32	1,54	1	1,12	1,15	1,15	1,13
TMP-FIN-LOTE	9.462	11.029	7.195	8.044	8.193	8.258	8.066
TMP-FIN-LOTE/TMP-SECLOOK	1,32	1,53	1	1,12	1,14	1,15	1,12
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	30 %	35 %	55 %	48 %	46 %	44 %	46 %
(MAQ4)	14 %	32 %	49 %	46 %	47 %	48 %	47 %
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	7 %	65 %	40 %	36 %	34 %	35 %	34 %
(MAQ5)	27 %	65 %	40 %	37 %	35 %	34 %	37 %
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	60 %	38 %	61 %	56 %	56 %	56 %	55 %

Tabla 6.1 Tiempos. 3^{er} Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. Sin ordenación en colas

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
Tipo de pieza	secuencia							
A	1	100	0	48	40	42	41	48
A	2	0	0	7	8	10	12	7
A	3	0	0	18	22	20	18	18
A	4	0	0	3	5	5	8	3
A	5	0	100	24	26	23	21	24
B	1	0	0	44	44	44	50	44
B	2	100	0	44	44	44	39	44
B	3	0	100	11	11	11	11	11
C	1	0	0	50	50	50	46	50
C	2	0	100	8	8	8	8	8
C	3	100	0	42	42	42	46	42
D	1	100	0	15	15	15	15	15
D	2	0	0	52	52	52	51	52
D	3	0	100	7	7	7	9	7
D	4	0	0	26	26	26	25	26
E	1	100	0	58	58	58	58	58
E	2	0	100	42	42	42	42	42

Tabla 6.2 Mix de rutas. 3^{er} Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. Sin ordenación en colas

SEC-ENTRADA VARIABLES EN ESTUDIO	SECMEJOR	SECPEOR	SECLOOK	SECCA20	SECCA10	SECCA36	SECCAMBI
TMP-RES-TOTAL	88.636	107.559	79.411	90.559	90.646	95.394	90.238
SEC-ENTR/SECLOOK	1,11	1,33	1	1,13	1,14	1,19	1,13
TMP-FIN-LOTE	9.009	10.837	8.099	9.169	9.227	9.662	9.157
TMP-FIN-LOTE/TMP-LOOK	1,32	1,53	1	1,12	1,14	1,15	1,12
% UTILIZACIÓN EST1(MAQ1)	19 %	34 %	49 %	43 %	41 %	40 %	42 %
(MAQ4)	26 %	35 %	50 %	44 %	45 %	41 %	47 %
% UTILIZACIÓN EST2(MAQ2)	18 %	64 %	33 %	29 %	29 %	29 %	29 %
(MAQ5)	18 %	68 %	33 %	29 %	29 %	29 %	29 %
% UTILIZACIÓN EST3(MAQ3)	63 %	38 %	59 %	53 %	53 %	52 %	52 %

Tabla 6.3 Tiempos. 3^{er} Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles. Sin ordenación en colas

SEC-ENTRADA % SELECCIÓN DE RUTAS Tipo de pieza secuencia		SECMEJOR (%)	SECPEOR (%)	SECLOOK (%)	SECCA20 (%)	SECCA10 (%)	SECCA36 (%)	SECCAMBI (%)
A	1	100	0	39	37	33	32	39
A	2	0	0	17	18	21	16	17
A	3	0	0	1	4	8	6	1
A	4	0	0	30	28	24	31	30
A	5	0	100	13	13	14	15	13
B	1	0	0	61	61	61	64	61
B	2	100	0	22	22	22	19	22
B	3	0	100	17	17	17	17	17
C	1	0	0	71	71	71	75	71
C	2	0	100	4	4	4	4	4
C	3	100	0	25	25	24	21	25
D	1	100	0	40	40	40	37	40
D	2	0	0	42	42	42	39	42
D	3	0	100	6	6	6	12	6
D	4	0	0	12	12	12	12	12
E	1	100	0	42	42	42	58	42
E	2	0	100	58	58	58	42	58

Tabla 6.4 Mix de rutas. 3^{er} Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles. Sin ordenación en colas

6.3.1.1.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Como puede verse observando las filas 2^a y 4^a de las tablas 6.1 y 6.3, la metodología propuesta siempre presenta una mejora por encima del 12 %, tanto para rutas rígidas como flexibles.

De nuevo ocurre que para rutas flexibles no siempre se mejoran los resultados respecto a rutas rígidas, como puede verse en las tablas 6.1 y 6.3 en las columnas 1^a y 3^a y es que a la hora de seleccionar la siguiente operación a realizar dentro de un grupo, se elige aquella que se realizará en la máquina con menor porcentaje de utilización en vez de por ejemplo, la que requiera una máquina más cercana.

Prácticamente, por tanto, en este escenario se vuelven a repetir los mismos resultados que se obtuvieron en los dos anteriores.

6.3.1.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA CON ROTURAS DE MÁQUINAS.

Con estos experimentos se pretende confirmar la conveniencia de que las simulaciones en las que se basa la selección de la ruta tengan en cuenta el hecho de que las máquinas averiadas pueden ser reparadas durante el horizonte de simulación. Al igual que en el escenario anterior, se denomina como metodología

mejorada a dicho refinamiento frente a la versión básica que no considera tal posibilidad.

Para este caso siguen siendo válidos todos los datos que se han definido para el caso en el que no se contemplaban la existencias de averías y que se habían descrito al principio del apartado 6.3.1. Además las averías se producen según una distribución exponencial y la reparación de las mismas según una distribución uniforme tal como aparecen en el escenario anterior en el apartado 5.3.2.2.

Las distintas situaciones que se van a estudiar corresponden al caso de que se produzcan pocas averías, o bien un número medio de averías o un número alto de averías. Los datos relativos a cada uno de estos casos aparecen en la tabla 5.22. Es preciso señalar que para cada caso se han realizado las simulaciones para cinco juegos de datos diferentes para cada una de las situaciones, y se han calculado los valores medios.

6.3.1.2.1 RESULTADOS

En las tablas que siguen aparecen los resultados tanto para rutas rígidas en la Tabla 6.5 como para flexibles en la Tabla 6.6.

		Nº DE AVERÍAS BAJO	Nº DE AVERÍAS MEDIO	Nº DE AVERÍAS ALTO
TIEMPO DE RESIDENCIA (TMP-RES)	METOD. BASIC.	84.598	95.539	115.578
	METOD. MEJOR.	76.827	82.759	95.353
	BASIC. / MEJOR.	1,10	1,15	1,21
TIEMPO DE FIN LOTE (TMP-FIN)	METOD. BASIC.	8.563	9.675	11.753
	METOD. MEJOR.	7.827	8.392	9.251
	BASIC. / MEJOR.	1,09	1,15	1,27
ESTACIÓN 1 (MAQ 1)	METOD. BASIC.	44 %	39 %	29 %
	METOD. MEJOR.	53 %	49 %	38 %
(MAQ 4)	METOD. BASIC.	43 %	36 %	29 %
	METOD. MEJOR.	48 %	46 %	40 %
ESTACIÓN 2 (MAQ 2)	METOD. BASIC.	34 %	31 %	23 %
	METOD. MEJOR.	42 %	39 %	28 %
(MAQ 5)	METOD. BASIC.	35 %	30 %	28 %
	METOD. MEJOR.	39 %	38 %	37 %
ESTACIÓN 3 (MAQ 3)	METOD. BASIC.	53 %	51 %	43 %
	METOD. MEJOR.	55 %	50 %	49 %

Tabla 6.5 Tiempos. 3^{er} Escenario. Con roturas. Metodología Mejorada. Rutas rígidas. Sin ordenación en colas

		Nº DE AVERÍAS BAJO	Nº DE AVERÍAS MEDIO	Nº DE AVERÍAS ALTO
TIEMPO DE RESIDENCIA (TMP-RES)	METOD. BASIC.	96.684	104.848	118.006
	METOD. MEJOR.	86.699	91.501	102.632
	BASIC. / MEJOR.	1,11	1,15	1,15
TIEMPO DE FIN LOTE (TMP-FIN)	METOD. BASIC.	9.796	10.616	12.530
	METOD. MEJOR.	8.787	9.304	10.896
	BASIC. / MEJOR.	1,11	1,14	1,15
ESTACIÓN 1 (MAQ 1)	METOD. BASIC.	38 %	33 %	25 %
	METOD. MEJOR.	45 %	44 %	34 %
(MAQ 4)	METOD. BASIC.	41 %	37 %	33 %
	METOD. MEJOR.	48 %	45 %	41 %
ESTACIÓN 2 (MAQ 2)	METOD. BASIC.	25 %	24 %	19 %
	METOD. MEJOR.	31 %	31 %	26 %
(MAQ 5)	METOD. BASIC.	25 %	37 %	20 %
	METOD. MEJOR.	31 %	45 %	26 %
ESTACIÓN 3 (MAQ 3)	METOD. BASIC.	51 %	50 %	44 %
	METOD. MEJOR.	53 %	49 %	46 %

Tabla 6.6 Tiempos. 3^{er} Escenario. Con roturas. Metodología Mejorada. Rutas flexibles. Sin ordenación en colas

6.3.1.2.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Puede verse si se observan las tablas 6.5 y 6.6, que la versión mejorada que contemplaba la puesta en servicio de una máquina averiada supone reducciones de los tiempos de residencia bastante importantes respecto a la versión básica y que esta mejora es mas acentuada a medida que se incrementa el número de averías y superiores a las que se producían en el escenario anterior.

También puede observarse que dicha reducción en los tiempos de residencia de la metodología lleva aparejada un aumento del porcentaje de utilización de las máquinas.

6.3.2 SEGUNDO GRUPO DE EXPERIMENTOS. IMPLEMENTACIÓN PARALELO.

Como la evolución del sistema para cada una de las rutas posibles es independiente, la simulación de cada una de estas rutas se puede realizar en paralelo. Por otra parte y debido a que no se dispone del hardware adecuado, se va a implementar dichas simulaciones sobre una red local, donde se va a compartir toda la información que sea común.

Como se indica en la figura 6.2 un ordenador maestro simularía el comportamiento del sistema real. En el momento en que se acaba la fabricación de una pieza, toma las variables que definen la situación del sistema en ese instante y las graba en el disco duro del servidor de la red, que va a ser el nexo de unión entre este ordenador principal y los demás ordenadores, cuya misión será simular cada una de las rutas alternativas.

Cada ordenador esclavo (segundo nivel de la figura 6.1), toma el estado del sistema así como los datos de una de las diferentes rutas por la que se puede fabricar la pieza que va a entrar en el sistema, procediendo a la simulación de la evolución del taller en el supuesto de que entrase dicha pieza para producirse bajo esa ruta. Después devolvería (grabando en el disco duro del servidor) el valor de la función objetivo (sumatorio de los tiempos de residencia) que es la que nos va a ayudar a seleccionar la mejor ruta y a hacer más eficiente el sistema. El ordenador maestro, toma estos valores, y elige aquel que sea menor, seleccionando la ruta de fabricación que a priori se espera que aporte mayor eficiencia al sistema a corto plazo.

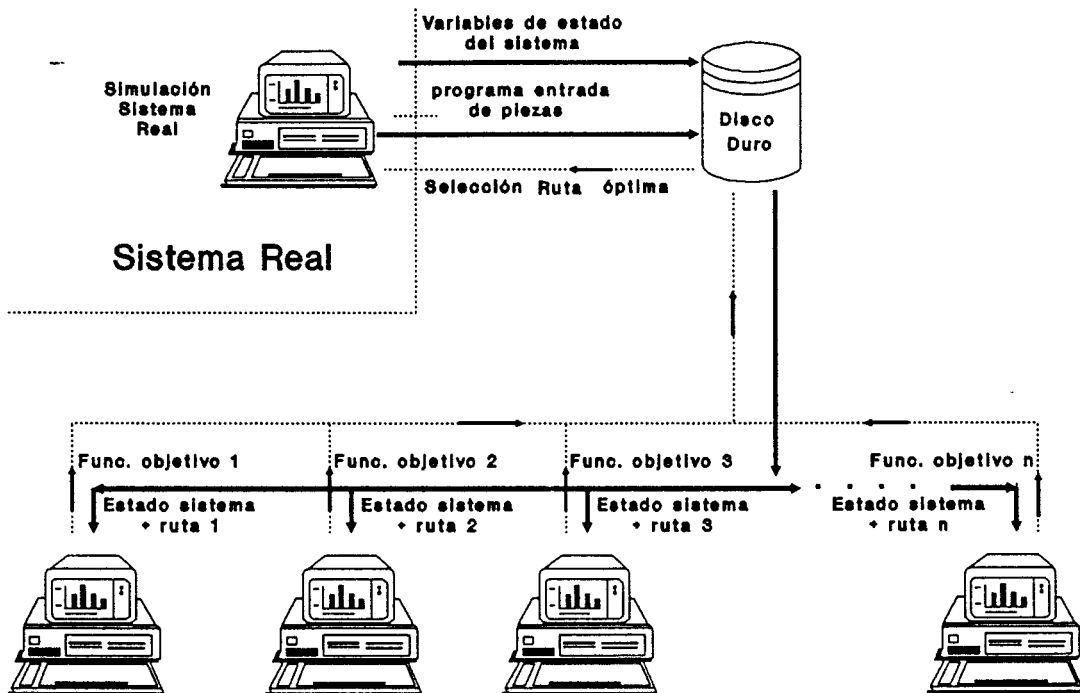


Figura 6.2 Esquema del funcionamiento en paralelo

6.3.2.1 JUSTIFICACIÓN

El motivo por el que se realiza esta simulación en paralelo es demostrar que se puede reducir sensiblemente el tiempo de respuesta que se invierte en la selección de la ruta más adecuada cada vez que una nueva pieza debe entrar al sistema.

La metodología que se propone intenta retrasar lo máximo posible el momento en que se toma la decisión de elegir la ruta de fabricación de cada pieza, para de esta forma poder tener en cuenta el estado real del sistema, lo más actualizado posible. Si tomamos el estado del sistema en un tiempo anterior como base para seleccionar la mejor ruta puede que el estado actual tenga muy poco que ver con el estado que se había tomado como base de trabajo para aplicar la metodología de selección de rutas, con lo cual la ruta que se elegiría podría no mejorar realmente la eficiencia del taller.

El tiempo que se tarda en probar las diferentes rutas y decidir cual es la más idónea en cada instante, debe ser lo más pequeño que se pueda. Lo ideal sería que la respuesta sobre la ruta a elegir fuese instantánea (tiempo cero), ya que si el tiempo en decidir la ruta que elegimos es grande, la incorporación de una pieza ocurriría en un instante en el que el estado del sistema es bastante diferente al supuesto como base de trabajo para seleccionar la ruta. Este es el motivo por el cual es aconsejable introducir la filosofía de la simulación en paralelo, ya que esto supone la reducción del tiempo de respuesta. Al hacer la simulación en paralelo, el tiempo que se tarda en tomar la decisión es del orden de una simulación y no varias como ocurriría en el caso de monoprogramación.

Se está interesado en comparar el tiempo medio de respuesta (el que se tarda en decidir la ruta por la que se va a producir una pieza), si para las mismas hipótesis de partida se realiza la simulación en monoprogramación o en paralelo. Dicha comparación se va a realizar para diferentes valores del número de pallets (piezas que simultáneamente están en el sistema), y se va a ver la evolución que sufre este tiempo de respuesta, tanto en monoprogramación, como en paralelo. Los ordenadores sobre los que se ha realizado la experimentación no paralelo son de tipo IBM 80386 SX. La red local esta integrada igualmente por esta misma clase de ordenadores, para que los datos sean comparables.

6.3.2.2 EXPERIMENTACIÓN.

En este apartado, en primer lugar se van a observar los resultados que se obtienen en monoprogramación, al variar el número de pallets. En segundo lugar se va a realizar la misma experimentación pero en paralelo y se van a comparar los resultados de los tiempos de respuesta de selección de rutas obtenidos en la simulación para uno y otro tipo de simulación. Los resultados que se obtengan para las variables en estudio (sumatorio de los tiempos de residencia, tiempo de finalización del lote, etc.) para la experimentación en monoprogramación deben de ser los mismos que los que se obtengan para el caso de la experimentación en paralelo, y de hecho este ha sido uno de los criterios que se han utilizado para validar la aplicación en paralelo.

6.3.2.2.1 EFECTO DEL NÚMERO DE PALLETS.

Vamos a ver ahora el efecto que tiene el incremento del número de pallets en el sistema (número de piezas que hay simultáneamente en el mismo), sobre las variables mas significativas que se están utilizando para evaluar la eficiencia del taller.

6.3.2.2.1.1 RESULTADOS

Los resultados del diseño experimental sin averías aparecen en la tabla 6.7 para rutas rígidas y en la tabla 6.8 para rutas flexibles.

Nº DE PALLET	SUM TMP RESIDENCIA	TMP-FIN LOTE	ESTACIÓN 1		ESTACIÓN 2		ESTACIÓN 3
			MAQ 1	MAQ 2	MAQ 1	MAQ 2	MAQ 1
8	62.520	7.955	51 %	47 %	37 %	39 %	59 %
10	70.754	7.195	55 %	49 %	40 %	40 %	61 %
12	69.389	7.030	57 %	51 %	45 %	42 %	60 %
14	89.164	6.504	59 %	58 %	52 %	51 %	67 %
16	93.853	6.408	62 %	60 %	52 %	52 %	69 %
18	110.985	6.370	59 %	63 %	50 %	51 %	71 %

Tabla 6.7 Tiempos. 3^{er} Escenario. Sin roturas. Rutas rígidas. Variando el número de pallets. Sin ordenación en colas

N° DE PALLET	SUM TMP RESIDENCIA	TMP-FIN LOTE	ESTACIÓN 1		ESTACIÓN 2		ESTACIÓN 3
			MAQ 1	MAQ 2	MAQ 1	MAQ 2	MAQ 1
8	70.011	8.827	47 %	46 %	27 %	27 %	57 %
10	79.411	8.099	49 %	50 %	33 %	33 %	59 %
12	88.739	7.542	56 %	53 %	36 %	36 %	61 %
14	99.331	7.245	58 %	55 %	37 %	38 %	66 %
16	111.319	7.090	55 %	60 %	40 %	41 %	66 %
18	121.958	6.978	55 %	56 %	44 %	44 %	69 %

Tabla 6.8 Tiempos. 3^{er} Escenario. Sin roturas. Rutas flexibles. Variando el número de pallets. Sin ordenación en colas

6.3.2.2.1.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Como se observa de los datos anteriores al aumentar el número de pallets, se incrementa el tiempo de residencia total de las piezas. Esto se debe al hecho de que si existe un único pallet, todos los recursos del sistema estarían a disposición de la única pieza que se está mecanizando, con lo que no existirían tiempos de espera de la pieza para poder acceder a alguna máquina que necesite para su procesado. Claro que en ese caso el ratio de utilización de las máquinas sería muy bajo y el tiempo en que sale la última pieza sería muy elevado. A medida que se incrementa el número de pallets se incrementa el tiempo de residencia total, ya que al coexistir más piezas compitiendo por los recursos se producirían tiempos de espera para acceder a máquinas ocupadas, pero estas incrementan su ratio de utilización.

Existe un punto, en torno a los 16 pallets, en que un incremento del número de pallets produce un fuerte incremento en el tiempo de residencia total, pero este incremento no va acompañado con una mejora en el ratio de utilización de las máquinas ni del tiempo de finalización total del lote. Esto es debido a que cuando se incrementa mucho el número de pallets, los efectos de las colisiones y bloqueos que producen este incremento del número de pallets superan a las potenciales ventajas que en principio parece que aportan este incremento de piezas que se están mecanizando simultáneamente. Digamos que predominan los efectos de congestión.

6.3.2.2.2 ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS TIEMPOS DE RESPUESTA EN MONOPROGRAMACIÓN Y EN PARALELO.

En este apartado se van a comparar los tiempos de respuesta en monoprogramación y en paralelo, para los experimentos correspondientes al apartado anterior.

Los resultados para el caso de rutas rígidas aparecen en la tabla 6.9 y para el caso de rutas rígidas aparecen en la tabla 6.10. Ambas tablas contienen en su primera columna el número de pallets, en la segunda el tiempo medio de simulación empleado para seleccionar la ruta en monoprogramación y en la tercera columna el valor del tiempo medio de selección de la ruta pero en paralelo.

Nº DE PALLET	TMP-MEDIO DE SIMULACIÓN	
	MONOPROGR	PARALELO
8	12 seg	3 seg
10	15 seg	4 seg
12	15 seg	4 seg
14	21 seg	6 seg
16	23 seg	6 seg
18	30 seg	8 seg

Tabla 6.9 Tiempos de respuesta. 3^{er} Escenario. Monoprogramación / Paralelo. Sin roturas. Rutas rígidas. Variando el número de pallets en el sistema. Sin ordenación en colas

Nº DE PALLET	TMP-MEDIO DE SIMULACIÓN	
	MONOPROGR	PARALELO
8	15 seg	4 seg
10	20 seg	5 seg
12	24 seg	6 seg
14	29 seg	7 seg
16	34 seg	9 seg
18	39 seg	10 seg

Tabla 6.10 Tiempos de respuesta. 3^{er} Escenario. Monoprogramación / Paralelo. Sin roturas. Rutas Flexibles. Variando el número de pallets en el sistema. Sin ordenación en colas

Como puede verse los tiempos medios de selección de las rutas paralelo son aproximadamente del orden de 4 veces inferiores a los obtenidos para la simulación en monoprogramación. El valor del número medio de rutas probadas (NMRP) se puede obtener como:

$$NMRP=0.44*5+0.12*3+0.08*3+0.32*4+0.04*2=4.16\approx 4$$

Donde las fracciones 0.44, 0.12, 0.08, 0.32 y 0.04 son los pesos relativos (mix de piezas) de las piezas de tipo A, B, C, D y E respectivamente, y que aparecen en la tabla 4.10. A su vez los valores 5, 3, 3, 4 y 2 son el número de rutas que se deben de probar para las piezas A, B, C, D y E respectivamente, como se deduce de las tablas 4.2, 4.3, 4.12 y 4.13.

6.4 RESUMEN DEL TERCER ESCENARIO

En este tercer escenario se ha realizado la simulación sobre un sistema de fabricación flexible integrado por tres estaciones, dos de ellas con dos máquinas y la tercera con una única máquina. El dispositivo de transporte para trasladar las piezas entre las distintas estaciones está constituido por una cinta transportadora de tipo bucle cerrado, y que sirve al mismo tiempo como almacenamiento intermedio de las piezas en curso.

Respecto a las rutas de fabricación de las diferentes piezas, existe la posibilidad de producirlas mediante rutas rígidas y flexibles, ambas están integradas por las mismas operaciones individuales y se diferencian en que las flexibles agrupan las operaciones individuales en grupos de operaciones y dentro de estos grupos no existe a priori prelación entre las operaciones que lo integran, el conjunto de rutas es el mismo que para el caso de los dos anteriores escenarios.

Los experimentos se han realizado en dos grupos. En el primero se ha observado el comportamiento de la metodología en este nuevo escenario tanto para el caso de que no se produzcan roturas en las máquinas como para el caso de que si se produzcan estas roturas. En el segundo se han observado las relaciones que existen entre los tiempos de respuesta de selección de rutas si se realiza la experimentación en monoprogramación y en paralelo. Ello se ha hecho para un conjunto de experimentos en los que se ha hecho variar el número de pallets disponibles.

Los resultados más importantes son:

1.- En todos los casos la solución que aporta la metodología que se propone mejora los resultados que aportan cualquiera de las otras políticas alternativas que se estudian, bajo las condiciones experimentales probadas.

2.- El equilibrado de cargas de trabajo de las estaciones no parece ser un requisito importante para el buen funcionamiento del taller.

3.- Más importante que el porcentaje agregado de asignación de las diferentes rutas alternativas es la dependencia de la elección realizada para cada pieza respecto de la situación del taller cuando dicha pieza entra en el sistema.

4.- Dotar a un sistema de fabricación de un cierto grado de flexibilidad potencial, no asegura que automáticamente se mejore la eficiencia del mismo si, después, las reglas de funcionamiento no la aprovechan apropiadamente.

5.- El tener presente la puesta en servicio de una máquina que estaba averiada en el instante en que se procede a la selección de cada ruta mejora los resultados respecto a no tener en cuenta este hecho. La mejora se incrementa a medida que lo hace la frecuencia de las averías.

6.- Se ha comprobado no sólo que la realización en paralelo de las simulaciones de las diferentes rutas alternativas es más rápida que hacerlo secuencialmente, sino que el factor de aceleración es aproximadamente igual al número de rutas alternativas entre las que elegir para cada tipo de pieza.

7.- RESUMEN Y CONCLUSIONES.

En este apartado se va a hacer un breve repaso de lo expuesto a lo largo de esta memoria. Dicho resumen se estructura en tres partes: metodología propuesta, experimentos de validación de la misma y por último, conclusiones de la investigación realizada

7.1 TESIS

El problema que se aborda en este trabajo es el de la selección dinámica de rutas en tiempo real en un SFF. Se asume que la secuencia e instantes de entrada de las piezas son determinados en un nivel superior y lo que se plantea es decidir cual es la ruta que debe seguir cada pieza nueva en el sistema.

Se propone elegir la ruta en el último momento posible, esto es, justo antes de ser fijada la pieza en cuestión a su pallet. De esta forma, podría utilizarse para tomar la decisión información sobre el estado real del sistema en ese instante (incluidas las situaciones de avería). Con esa información y utilizando un modelo de simulación es posible evaluar el impacto a corto plazo de cada una de las rutas alternativas y aplicando un criterio apropiado, elegir aquella que da lugar a un flujo de materiales más fluido.

Por un lado la capacidad de aplicar este enfoque en tiempo real radica en la posibilidad de realizar las simulaciones de las diferentes alternativas en paralelo. Por otro, aunque la elección de rutas es miope, la utilización reiterada de este criterio equivale a una presión constante sobre el sistema para que utilice eficientemente los recursos disponibles.

7.2 EXPERIMENTOS.

En la tabla 7.1 se presenta un esquema resumen de la experimentación; se recogen los escenarios estudiados, características de los mismos, variaciones experimentales para los distintos escenarios y resultados más importantes. Los tipos de piezas, las diferentes rutas por las que se pueden producir, así como los lotes a fabricar se definieron idénticas para los tres escenarios. De esta forma se ha pretendido analizar en cierta igualdad de condiciones el efecto de la configuración del taller sobre el comportamiento de la metodología.

Aunque se han utilizado para comparar algunas políticas simples (de tipo estático) que, a priori, parecen menos prometedoras, su consideración proporciona unos puntos de referencia que han permitido evaluar cuantitativamente en términos relativos la metodología que se propone. Particularmente útiles han sido las políticas que imitan las decisiones de la metodología pero no siempre o a destiempo, ya que proporcionan medidas de la degradación en la eficiencia del sistema cuando uno se separa ligeramente de las recomendaciones de la metodología o no tiene en cuenta la oportunidad de las mismas.

Escenario	Características principales	Pruebas experimentales	Comentarios de los resultados
1º Escenario	<p><u>Sistema de transporte:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - No existen limitaciones en el número de transportes disponibles. <p><u>Sistema de almacenamiento:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Buffers intermedios localizados al lado de cada estación de trabajo. <p><u>Posibilidad de averías:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Las máquinas no sufren ningún tipo de averías. 	<p><u>Experimentación para lote 50 piezas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Rutas rígidas -Reducción de distancia -Rutas flexibles <p><u>Experimentación para lote 300 piezas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Rutas rígidas -Rutas flexibles 	<p>Comentarios de los resultados</p> <ul style="list-style-type: none"> - La metodología presenta mejores resultados que cualquier otra política probada. - La metodología da lugar a un reparto desequilibrado de las cargas en las máquinas. - La metodología elige las rutas "ad hoc", seleccionando en cada momento la más conveniente. - Las rutas flexibles presentan mejores resultados que las rígidas.
2º Escenario	<p><u>Sistema de transporte:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Vehículos guiados automáticamente. El número de transportes es limitado. <p><u>Sistema de almacenamiento:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Almacén centralizado. Con áreas reservadas como buffers para cada estación del sistema. <p><u>Posibilidad de averías:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Las máquinas pueden sufrir averías 	<p><u>Todos los experimentos para el lote de 300 piezas:</u></p> <p><u>Experimentación sin roturas en máquinas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Rutas rígidas -Rutas flexibles y sus variantes -Incrementando el número de transportes (para rutas rígidas y flexibles) <p><u>Experimentación con roturas en máquinas:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Efecto de incluir o no las roturas en la simulación 	<ul style="list-style-type: none"> - La metodología presenta siempre mejores resultados que el resto de políticas. - En este caso las rutas más seleccionadas en el primer escenario, aquí son las más penalizadas. - Las rutas flexibles presentan en ocasiones peores resultados que las rígidas, según cual sea el criterio de selección de operaciones dentro de un grupo de operaciones. - Para el caso de averías en máquinas su inclusión en la metodología presenta siempre mejores resultados, tanto mejores cuanto más frecuentes sean las averías.
3º Escenario	<p><u>Sistema de transporte:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Cinta transportadora en bucle cerrado. <p><u>Sistema de almacenamiento:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - La propia cinta transportadora <p><u>Posibilidad de averías:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Las máquinas pueden sufrir averías 	<p><u>Todos los experimentos para el lote de 300 piezas:</u></p> <p><u>Experimentación en monoprogramación:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Sin roturas en máquinas -Con roturas en máquinas <p><u>Experimentación en monoprogramación y en paralelo</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Variación número de pallets disponibles 	<ul style="list-style-type: none"> - La metodología presenta siempre mejores resultados que el resto de políticas. - Se confirma la conveniencia de incluir roturas si estas se pueden producir. - La experimentación en paralelo presenta una reducción de los tiempos de respuesta del orden del número medio de rutas alternativas.

Tabla 7.1 Resumen y comentarios

7.3 CONCLUSIONES FINALES.

En las experimentaciones realizadas se observa que los resultados que planteaban algunos autores sobre el equilibrado de máquinas a largo plazo no son válidos a medio plazo. Igualmente se ha comprobado que no es el mix de rutas agregado el factor determinante del comportamiento del sistema, sino que es la correcta utilización de los recursos en cada momento la que da lugar a un flujo eficiente del material. Todo ello refuerza la tesis que motivó esta investigación, esto es, que la elección de rutas de fabricación ha de hacerse a nivel operacional y basándose en el estado real del sistema.

La metodología propuesta para la selección de rutas ha mejorado a todas las demás alternativas probadas de una forma apreciable en la practica totalidad de los casos examinados. Dicha consistencia, observada en tres entornos de fabricación diferentes, unida a su carácter general avalan el enfoque propuesto. Ahora bien, no debe pasarse por alto el requisito de que el modelo de simulación a utilizar para evaluar el impacto de las diferentes rutas alternativas debe ser válido, esto es, debe corresponderse con el funcionamiento real del taller. Ello ha quedado demostrado con los experimentos en los que se admite la posibilidad de averías en las máquinas.

Se ha observado también que la introducción de un cierto grado de flexibilidad (considerando grupos de operaciones no ordenadas), no siempre ha mejorado los resultados que proporcionaban las rutas rígidas, de hecho algunas veces los ha empeorado ligeramente. Ello significa que no siempre se ha sabido sacar provecho de dicho aumento de la flexibilidad.

Por último, destacar que la metodología que se propone tiene vocación de ser aplicada en tiempo real y que por ello ha sido diseñada para aprovechar las capacidades de procesamiento en paralelo que las nuevas tecnologías de información proporcionan.

8.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

En primer lugar y aunque no se puede considerar como una línea de investigación en sí, sino más bien como un proyecto ingenieril, sería el intentar aplicar la metodología desarrollada a un sistema real, para transferir esta tecnología a empresas que hayan optado por instalar un SFF. En este sentido, en la actualidad, el grupo en cuyo seno se ha desarrollado este trabajo está en contacto con una importante empresa radicada en Sevilla y que tiene instalada una célula flexible, con la intención de trasladar a un caso real algunas de las experiencias que se han adquirido en el desarrollo de este trabajo.

En segundo lugar se podría aplicar la metodología que se ha desarrollado en este trabajo pero añadiendo el problema de seleccionar el tipo de pieza a introducir en cada instante en el sistema. Se podría enfocar en dos etapas, la primera seleccionaría la pieza a producir y la segunda la ruta que se debe elegir una vez que se determina la pieza que debe entrar al sistema.

Otro trabajo podría consistir en centrarse sobre un escenario concreto y completar la batería de experimentos al objeto de observar si existe alguna relación entre las decisiones que en cada instante toma la metodología propuesta y los parámetros que caracterizan el estado del sistema, y, si es así, plasmar estas relaciones en forma de reglas de decisión que podrían ser el núcleo de un Sistema Experto funcionando on-line. Alternativamente podría utilizarse un enfoque basado en una Red Neuronal que, una vez entrenada con las decisiones proporcionadas por la metodología, fuera capaz de sustituir a esta y escoger en cada instante, en base al estado del taller, la ruta más apropiada, pero sin tener que simular.

9.- BIBLIOGRAFÍA.

- 1.- Afentakis, P., Solomon, M.M. and Millen R.A., "The Part-Type Selection Problem", Proc. 3rd ORSA/TIMS, Conf. on FMS, Elsevier (1989) pp 141-146.
- 2.- Agnetis, A., Lucertini, M. and Nicolo, F., "Flow Management in Flexible Manufacturing Cells witw Pipeline Operations", Management Science, vol 39 (1993) pp 294-306.
- 3.- Alberti, N., La Comare, U. and Noto La Diega, S., "Cost Efficiency: An Index Of Operational Performance Of Flexible Automated Production Enviroments", Proc. 3rd ORSA/TIMS, Conf. on FMS, Elsevier (1989) pp 67-72.
- 4.- Alberti, N., Noto La Diega, S. and Passannanti, A., "Cost Analysis of FMS Throughput", Annals of the CIRP, vol 37 (1988) pp 413-416.
- 5.- Arbel, A. and Seidmann, A., "Performance Evaluation of Flexible Manufacturing System", IEEE Transaction on System, Man, And Cybernetics, vol. 14 (1984) pp 606-617.
- 6.- Avonts, L.H., Gelders, L.F. and Van Wassenhove, L.N., "Allocating work between an FNS and a convetional jobshop: A case study", European Journal of Operational Research, vol 33 (1988) pp 245-256.
- 7.- Bernardo, J.J. and Mohamed, Z., "The measurement and use of operational flexibility in the loading of Flexible Manufacturing Systems", European Journal of Operational Research, vol 60 (1992) pp 144-155.
- 8.- Berrada, M. and Stecke, K.E., "A Branch and Bound Approach for Machine Load Balancing in Flexible Manufacturing Systems", Management Science, vol 32 (1986) pp 1316-1335.
- 9.- Branam, J.W., "Flexible Manufacturing Systems Eliminate The Need for Work Orders", Proc. CASA/SME Flexible Manufacturing Systems'85 Conference (1985) pp 37-42.
- 10.- Branam, J.W., "JIT vs FMS Which Will Top Management Buy?", Proc. CASA/SME Autofact'87 (1986) pp 30-36.
- 11.- Browne, J., Dubois, D., Pathmill, K., Sethi, S.P. and Stecke, K.E., "Classification of FMS", FMS Magazine (1984) pp 114-117.
- 12.- Buzacott, J.A. and Yao, D.D., "Flexible Manufacturing Systems: A review of analytical Model", Management Science, vol 7 (1986) pp 890-905.
- 13.- Carrie, A.S. and Petsopoulos, A.C., "Operation Sequencing in a FMS", Robotica, vol 3 (1985) pp 259-264.

- 14.- Carrie A.S. and Perera, D.T.S., "Work Scheduling in FMS Under Tool Availability Constrains", *International Journal of Production Research*, vol 24 (1986) pp 1299-1308.
- 15.- Carrie, A., "Simulation of Manufacturing Systems", John Wiley & Sons, 1988.
- 16.- Chandra, P. and Tombak, M., "Models for the evaluation of routing and machine flexibility", *European Journal of Operational Research*, vol 60 (1992) pp 156-165.
- 17.- Chen, M. and Sule Alfa, A., "Parts routing in a Flexible Manufacturing System with time-varying demands", *European Journal of Operational Research*, vol 60 (1992) pp 224-232.
- 18.- Dallery, Y. and Frein, Y., "An Efficient Method to Determine the Optimal Configuration of a Flexible Manufacturing System", *Annals of Operations Research*, vol 1 (1988) pp 207-225.
- 19.- Dallery, Y. and Stecke, K.E., "On the Optimal Allocation of Servers and Workloads in Closed Queuing Networks", *Operations Research*, vol. 38 (1989) pp 694-703.
- 20.- Davis, W.J. and Jones, A.T., "On-line Concurrent Simulation in Production Scheduling", *Proc. 3rd ORSA/TIMS Conference on FMS*, Elsevier (1989) pp 253-258.
- 21.- Ferre, R., "La fabrica flexible", Marcombo (1988).
- 22.- Froment, B. y Lesage, J.J., "Fabricación Flexible", Dunot (1989).
- 23.- Gelenbe, E. and Guennouni, H., "Flexsim: An Flexible Manufacturing System simulator", *European Journal of Operational Research*, vol 53 (1991) pp 149-165.
- 24.- Ghosh, S. and Gaimon, C., "Routing flexibility and production Scheduling in a flexible manufacturing system", *European Journal of Operational Research*, vol 60 (1992) pp 344-364.
- 25.- Goldhar, J.D., "Computer Integrated Flexible Manufacturing: Organizational, Economic, and Strategic Implications", *Interfaces*, vol 15 (1985) pp 94-105.
- 26.- Gómez, J., "Elección de Rutas de Procesado en un Sistema de Fabricación Flexible", *Proyecto Fin de Carrera*, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Sevilla (1992).
- 27.- Greene, T.J. and Sadowski, R.P., "A mixed integer program for loading and scheduling multiple flexible manufacturing cells", *European Journal of Operational Research*, vol 24 (1986) pp 379-386.

- 28.- Gross, J., "Intelligent Feedback Control for FMS", Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urban Champaign (1987).
- 29.- Gunasekaran, A., Martikainen, T. and Yli-Olli, P., "Flexible Manufacturing System: A Investigation for Research and Applications", European Journal of Operational Research, vol 66 (1993) pp 1-26.
- 30.- Gupta, Y.P. and Somers, T.M., "The Measurement of Manufacturing Flexibility", European Journal of Operational Research, vol 60 (1992) pp 166-182.
- 31.- Gupta, D. and Buzacott, J., "Models for First-Pass Investment Analysis", The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, vol 5 (1993) pp 263-286.
- 32.- Gustavsson, S., "Flexibility and Productivity in complex production processes ", International Journal of Production Research, vol 22 (1984) pp 801-808.
- 33.- Heungsoon, F.L., Mandyan, M.S. and Candace, A. Y., "The Optimal Configuration and Workload Allocation Problem in Flexible Manufacturing Systems", International Journal of Flexible Manufacturing System, vol 3 (1991) pp 213-230.
- 34.- Hutchison, P.E., "Flexibility is a Key to Economic Feasibility of Automating Small Batch Manufacturing", Industrial Engineering (1984) pp 77-84.
- 35.- Hutchison, J., Leong, K., Snyder, D. and Ward, F., "Scheduling For Random Job Shop Flexible Manufacturing Systems", Proc. 3rd ORSA/TIMS, Conf. on FMS, Elsevier (1989) pp 161-166.
- 36.- Hwang, S.S., "Models for Production Planning in FMS", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley (1986).
- 37.- Ishii, N. and Talavage, J., "A mixed Dispatching Rule Approach in FMS Scheduling", International Journal of Flexible Manufacturing Systems, vol 6 (1994) pp 69-87.
- 38.- Jaikumar, R., "Postindustrial Manufacturing", Harvard Business Review, vol 64 (1986) pp 69-76.
- 39.- Kimenia, J. and Gershwin, S.B., "Network Flow Optimization In Flexible Manufacturing Systems", National Science Foundation, vol 12036 (1978) pp 632-639.
- 40.- Kirkavak, N. and Dincer, C., "Analytical loading models in Flexible Manufacturing Systems", European Journal of Operational Research, vol 71 (1993) pp 17-31.
- 41.- Kim, Y.D. and Yano, C.A., "Heuristic approaches for loading problems in flexible manufacturing systems", IIE Transactions, vol 25 (1993) pp 26-39.

- 42.- Kobayashi, H. and Gerla, M., "Optimal Routing in Closed Queuing Networks", ACM Transactions on Computer Systems, vol 1 (1983) pp 294-310.
- 43.- Kouvelis, P. and Lee, H.L., "Block Angular Structures and the Loading Problem in Flexible Manufacturing Systems", Operations Research, vol 39 (1991) pp 666-676.
- 44.- Kouvelis, P., "Design and planning problems in FMS: a critical review", Journal of Intelligent Manufacturing, vol 3 (1992) pp 75-99.
- 45.- Kumar, V., "Measurement of Loading and Operations Flexibility in Flexible Manufacturing Systems: an Information-Theoretic Approach", Annals of Operations Research, vol 15 (1988) pp 65-80.
- 46.- Kumar, P., Singh, N. and Tewari, N.K., "A Nonlinear Goal Programming Model for Multistage, Multiobjective Decision Problems With Application to Grouping and Loading Problem in a Flexible Manufacturing System", European Journal of Operational Research, vol 53 (1991) pp 167-171.
- 47.- Kusiak, A., "Application of operational research models and techniques in FMS", European Journal of Operational Research, vol 24 (1986) pp 336-345.
- 48.- Kusiak, A., "Intelligent Manufacturing Systems", Prentice Hall (1990).
- 49.- Liang, M. and Dutta, S.P., "An integrated approach to the part selection and machine loading problem in a class of flexible manufacturing systems", European Journal of Operational Research, vol 67 (1993) pp 387-404.
- 50.- Lin, G.Y. and Solberg, J.J., "Effectiveness of Flexible Routing Control", International Journal of Flexible Manufacturing System, vol 3 (1991) pp 189-211.
- 51.- Lorente, J.M., "Simulación de un SFF con cinta transportadora", Proyecto Fin de Carrera, Facultad de Informática y Estadística, Sevilla (1993).
- 52.- Maimon, O.Z. and Gershwin, S.B., "Dynamic scheduling and routing for flexible manufacturing systems that have unreliable machines", Operations Research, vol 36 (1987) pp 279-292.
- 53.- Maimon, O.Z. and Choong, Y.F., "Dynamic Routing in Reentrant FMS", Proc. 2nd ORSA/TIMS Conference on FMS, Elsevier (1986) pp 467-475.
- 54.- Martinez, A., "La Adopción de Robots y Sistemas de Fabricación Flexible en España", Boletín ICE Económico, vol 2369 (1993) pp 1347-1355.
- 55.- Mazzola, J.B., Neebe, A.W. and Dunn, C.V.R., "Production Planning of a Flexible Manufacturing System in a Material Requirements Planning Environment ", International Journal of Flexible Manufacturing System, vol 1 (1989) pp 115-142.

56.- Moreno, A.A. and Ding, F., "Goal Oriented Heuristics for FMS Loading (and Part Type Selection) Problems, Proc. 3rd ORSA/TIMS, Conf. on FMS, Elsevier (1989) pp 105-110.

57.- Murison, A.E., "Why we went to flexible manufacturing system at Victor Products", Proc. of Conference on Planning for Automated Manufacture, Institute of Mechanical Engineers (1986).

58.- Nof, S. Y., Barash, M. M. and Solberg, J.J., "Operational Control of Item Flow in Versatile Manufacturing Systems", International Journal of Production Research vol 17 (1979) pp 479-489.

59.- O'Keefe, M. and Rao, R., "Part Input into a Flexible Flow System: An Evaluation of Look-ahead Simulation and a Fuzzy Rule Base", The International Journal of Flexible Manufacturing System, vol. 4 (1992) pp 113-127.

60.- Raghav, H., Sherman, B. and Suresh, N., "Evaluation of Flexible Automation Investments: A Model Management perspective", Journal of Intelligent Manufacturing vol 4 (1993) pp 307-322.

61.- Rajagopalan, S., "Flexible Versus dedicated Technology: A Capacity Expansion Model", The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, vol 5 (1993) pp 129-142.

62.- Rubio, S., "Simulación On-line de un FMS", Proyecto Fin de Carrera, Facultad de Informática y Estadística, Sevilla (1992).

63.- Russell, R. and Tanchoco, J.M.A., "An Evaluation of Vehicle Dispatching Rules And Their Effect on Shop Performance", Material Flow, vol 1 (1984) pp 271-280.

64.- Sabuncuoglu, I. and Hommertzheim, D.L., "An Investigation of Machine and Scheduling Rules in an FMS", Proc. 3rd ORSA/TIMS, Conference on FMS, Elsevier (1989) pp 261-267.

65.- Sawik, T., "Modelling and Scheduling of a Flexible Manufacturing System", European Journal of Operational Research, vol 45 (1990) pp 177-190.

66.- Schriber, T.J. and Stecke, K.E., "Machine Utilizations Achieved Using Balanced FMS Production Ratios in Simulated Setting", Annals of Operations Research, vol 15 (1988) pp 229-267.

67.- Schweitzer, J. and Seidman, A., "Processing Rate Optimization For FMS's With Distinct Multiple Job Visits to Work Centers", Proc. 3rd ORSA/TIMS, Conference on FMS, Elsevier (1989) pp 79-84.

68.- Schweitzer, J., Seidmann, A. and Goes, P., "Performance Management in Flexible Manufacturing Systems", International Journal of Flexible Manufacturing Systems", vol 4 (1991) pp 17-50.

69.- Seidmann, P.J. and Schweitzer, A., "Part Selection Policy for a Flexible Manufacturing Cell Feeding Several Production lines", IIE Transactions, vol 16 (1984) pp 355-362.

70.- Seidman, A. and Tenenbaum A., "Throughput maximization in Flexible Manufacturing System", IIE Transaction, vol 26 (1994) pp 90-100.

71.- Shanker, K. and Rajamarthandan, S., "Loading Problem in FMS: Part Movement Minimization", Proc. 3rd ORSA/TIMS, Conference on FMS, Elsevier (1989) pp 99-104.

72.- Shanker, K. and Tzen, Y.J., "A loading and dispatching problem in a random flexible manufacturing System", International Journal of Production Research, vol 23 (1985) pp 579-595.

73.- Sherali, H.D., Sarin, S.C. and Desai, R., "Models and Algorithms for Job selection, Routing, and Scheduling in a Flexible Manufacturing System", Annals of Operations Research, vol 26 (1990) pp 433-453.

74.- Stecke, K.E., "Production Planning Problems for Flexible Manufacturing Systems", Ph.D. Dissertation, Purdue University (1981).

75.- Stecke, K.E. and Solberg, J.J., "Loading and control policies for a flexible manufacturing system", International Journal of Production Research, vol 19 (1981) pp 481-490.

76.- Stecke, K.E., "Formulation and Solution of Nonlinear Integer Production Planning Problems for Flexible Manufacturing Systems", Management Science, vol 29 (1983) pp 273-288.

77.- Steudel, H.J. and Berg, L.E., "Evaluating the Impact of Flexible Manufacturing Cells Via Computer Simulation", Large Scale Systems, vol 1 (1986) pp 121-130.

78.- Tetzlaff, U., "Capacity OPTimization of Flexible Manufacturing Systems under Budget Constrains", International Journal of Flexible Manufacturing Systems, vol 6 (1994) pp 55-67.

79.- Tetzlaff, U., "Optimal Design of Flexible Manufacturing Systems", Physica-Verlag Heidelberg (1990).

80.- Van Looveren, A.J., Gelders, L.F. and Wassenhove, L.N., "A review of FMS planning models, in Modelling and Design of FMS", edit. A.Kusiak, Elsevier (1986) pp 3-31.

81.- Vinod, B. and Solberg, J.J., "Performance Models for Unreliable Flexible Manufacturing Systems", OMEGA, vol 12 (1984) pp 299-308.

82.- Warnecke, H.J., "Production System with highly automated information and Material Flow - State of de Art and Applications", Material Flow, vol 1 (1985) pp 219-233.

83 Warnecke, H.J. and Steinhilper, R., "Flexible Manufacturing System", Springer-Verlag (1985).

84.- Werra, D. and Widmer, M., "Loading Problems With Tool Management in Flexible Manufacturing Systems: A Few Integer Programming Models", International Journal of Flexible Manufacturing Systems, vol 3 (1991) pp 71-82.

85.- Wilhelm, W.E. and Shin, H., "Effectiveness of alternate operations in a flexible manufacturing system", International Journal of Production Research, vol 23 (1985) pp 65-79.

86.- Wilson, J.M., "Approaches to Machine Load Balancing in Flexible Manufacturing Systems", Journal of the Operational Research Society, vol 43 (1992) pp 415-423.

87.- Yao, D.D., "Material and Information Flows in Flexible Manufacturing Systems", Material Flow, vol 2 (1985) pp 143-149.

88.- Yao, D.D. and Pei, F.F., "Flexible Parts Routing in Manufacturing Systems", IIE Transactions, vol 22 (1988) pp 48-55.

89.- Zelenovic, D.M., "Flexibility - A Condition for Effective Production systems", International Journal of Production research, vol 20 (1982) pp 319-337.